HAL open science

Outils de planification de la production et de la distribution des produits en vrac : cas de l'OCP Maroc

Sabah Belil

▶ **To cite this version:**

Sabah Belil. Outils de planification de la production et de la distribution des produits en vrac : cas de l'OCP Maroc. Modélisation et simulation. Université Clermont Auvergne, 2021. Français. NNT : 2021UCFAC021 . tel-03564340

HAL Id: tel-03564340

https://theses.hal.science/tel-03564340

Submitted on 10 Feb 2022

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.

Université Clermont Auvergne

ECOLE DOCTORALE

SCIENCES POUR L'INGENIEUR DE CLERMONT FERRAND

THESE

Présentée par

Sabah BELIL

Diplômée de l'Ecole Nationale Supérieure d'Electricité et de Mécanique-Casablanca MAROC

(2015)

Ingénieur en Génie Industriel

pour obtenir le grade de

Docteur d'Université

Spécialité : INFORMATIQUE

Outils de planification de la production et de la distribution des produits en vrac : Cas de l'OCP Maroc

Soutenue publiquement le 17 Mars 2021 devant le jury :

Monsieur	Pierre CASTAGNA	Rapporteur
Monsieur	Lionel AMODEO	Rapporteur
Madame	Valérie BOTTA-GENOULAZ	Examinateur
Monsieur	Nicolas CHEIMANOFF	Examinateur
Monsieur	Nikolay TCHERNEV	Co-Directeur de thèse
Monsieur	Sylverin KEMMOE	Co-Directeur de thèse

Je dédie ce modeste travail

À mes parents…Ma raison de vivre

Aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être. Je mets entre vos mains, le fruit de longues années d'études, de longs mois de distance de votre amour de votre tendresse, de longs jours d'apprentissage. Je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et qui m'ont donné de la force pour persévérer et pour prospérer dans la vie. Puisse Dieu, le Très Haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie et que vos bénédictions m'accompagnent toujours.

À ma très chère mère,

À qui je dois la réussite, pour l'éducation qu'elle m'a prodigué;
À une personne qui m'a tout donné sans compter et qui m'a appris la patience ;
Sans toi, je ne suis rien, mais grâce à toi je deviens docteur ;
Tes prières ont été pour moi un grand soutien tout au long de mes études,
J'espère que tu trouveras dans ce modeste travail un témoignage de ma gratitude, ma profonde affection et mon profond respect ;
Puisse le tout-puissant te donner santé, bonheur et longue vie afin que je puisse te combler à mon tour ;

À mon très cher père,

À celui qui a su m'inculquer le sens de la responsabilité, de l'optimisme de la persévérance et de la confiance en soi face aux difficultés de la vie ;
Merci d'avoir été toujours là pour moi, un grand soutien tout au long de mes études ;

Je te dois ce que je suis aujourd'hui et ce que je serai demain et je ferai toujours de mon mieux pour rester ta fierté et ne jamais te décevoir ;

Des mots ne pourront jamais exprimer la profondeur de mon respect, ma considération, ma reconnaissance ;

À mon mari Majid…le cadeau de la vie

À la fleur de ma vie. Ton amour est un don du dieu. Aucune dédicace, aussi expressive qu'elle soit, ne saurait exprimer la profondeur de mes sentiments et l'estime que j'ai pour toi. Dans tes yeux, j'ai toujours pu lire de la tendresse, tu es une étoile dans ma vie.

À une personne qui m'as toujours soutenu, compris, réconforté et supporté mes humeurs au gré de cette thèse, qui m'a encouragé jusqu'au bout, qui a été toujours mon appui. Merci d'être toujours là à mes côtés, par ton amour dévoué et ta tendresse, pour donner du goût et du sens à notre vie de famille…

En témoignage de mon amour, de mon admiration et de ma grande affection, je te prie de trouver dans ce travail l'expression de ma profonde estime et mon sincère attachement.

À ma petite et seule Sœur Nassima

En souvenir d'une enfance dont nous avons partagé les meilleurs et les plus agréables moments. Pour toute la complicité et l'entente qui nous unissent, ce travail est un témoignage de mon attachement et de mon amour. Puisse Dieu le tout-puissant exaucer tous vos vœux.

À mon cher Professeur Nikolay Tchernev et sa petite famille

Je vous offre de sincères et chaleureux remerciements, grâce à votre soutien inconditionnel et de votre bienveillance à mon égard, ce travail a pu enfin voir le jour… Le mérite d'un mémoire appartient certes à l'auteur, mais également à son directeur qui l'encadre. Dans mon cas, vous avez été d'un soutien et d'une attention exceptionnels. La confiance que vous m'avez accordée ainsi que le soutien moral que vous avez manifesté à mon égard m'ont permis d'accumuler des expériences professionnelles et personnelles marquantes qui font de moi une personne grandie.

Grâce à votre bonté, à votre gentillesse et à votre engagement tout au long de ce travail, j'ai pu persévérer tout au long de cette belle aventure…Je vous suis reconnaissante pour l'énergie positive que vous avez partagé avec moi à chaque rencontre, et je n'oublierai jamais votre phrase « On va y arriver …», je ne saurai trouver les mots qui pourront décrire ma reconnaissance, mon respect envers votre personne. Enfin je souhaite vous dédier ce travail avec tous mes sincères vœux de bonheur, de santé et de réussite…

Je ne peux passer outre ma reconnaissance et mes remerciements envers votre fille Alexandra pour la relecture de ce manuscrit, je lui souhaite tout le succès dans sa vie…

À toute ma famille et mes ami(e)s

Aucun langage ne saurait exprimer mon respect et ma considération pour votre soutien et encouragements. Je vous dédie ce travail en reconnaissance de l'amour que vous m'offrez quotidiennement et votre bonté exceptionnelle. Que Dieu le Tout Puissant vous garde et vous procure santé et bonheur.

Enfin…

À toutes les personnes m'ont aidé et encouragé tout au long de ce labeur mais que je ne peux citer tous, je vous dédie ce travail.

Remerciement

Ma thèse était une aventure unique et passionnante qui m'a beaucoup apporté sur tous les plans. Elle est l'aboutissement de plusieurs années de travail et n'aurait jamais pu voir le jour sans les nombreuses personnes que j'ai eu l'honneur et le plaisir de côtoyer et qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ces travaux, que ce soit par leur aide, leur soutien ou même des moments de détente bienfaisants. Je tiens donc ici à les remercier et leur témoigner de ma reconnaissance.

Je tiens à remercier tout particulièrement et à témoigner toute ma reconnaissance au professeur Nikolay TCHERNEV mon directeur de thèse pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail durant ces années de thèse, pour la qualité de son encadrement, sa disponibilité et ses directives si précieuses, ainsi que son aide scientifique pour m'avoir aiguillée dans mes travaux de recherche. Je le remercie infiniment pour son aide et ses implications sur tous les niveaux pour accomplir cette aventure. Un grand merci pour cet encadrement de qualité intellectuellement et humainement. Je souhaite aussi le remercier vivement pour sa relecture scrupuleuse de chacun des chapitres de ce manuscrit, ce qui m'a sans aucun doute permis de préciser mon propos.

Toute ma gratitude et mes remerciements s'adressent également à Sylverin Kemmoé-Tchomté, d'avoir accepté de co-diriger ma thèse. Je souhaite le remercier pour son encadrement, sa qualité de réflexion et son apport sur des questions techniques, son assistance et ses conseils judicieux. Je garderai bien sûr en mémoire toutes les discussions diverses que nous avons eues sur la politique, l'économie et d'autres…

Mes vifs remerciements vont aussi tout naturellement à la direction de l'EMINES-School of Industrial Management, Professeur Nicolas CHEIMANOFF et Professeur Frédéric FONTANE de m'avoir donné l'occasion extraordinaire de réaliser mon projet de thèse dans un magnifique cadre. Je souhaite les remercier pour leur qualité d'encadrement et suivi ainsi que leurs encouragements tout au long de ma thèse. Je remercie également le Professeur Vincent GIARD pour la formation acquise durant l'année propédeutique, et pour sa disponibilité de me rencontrer et répondre à mes questions durant mes recherches. Ces années riches en découvertes resteront longtemps gravées dans ma mémoire.

Mes remerciements s'adressent ensuite à tous les membres du laboratoire LIMOS sous la direction du Professeur TOUMANI Farouk pour leur accueil, leur convivialité et leur soutien. Merci de m'avoir accueilli dans de si bonnes conditions pendant mes séjours réguliers.

Mes sincères remerciements vont également aux membres de mon jury qui ont accepté d'évaluer ce travail de thèse. Je remercie tout particulièrement les professeurs Pierre CASTAGNA et Lionel AMODEO pour l'intérêt qu'ils ont porté à cette thèse en acceptant d'être rapporteurs. J'en suis honorée. Je remercie aussi le professeur Valérie BOTTA-GENOULAZ de m'avoir fait l'honneur de présider mon jury de thèse.

Cette thèse est également le fruit d'une collaboration avec le Groupe OCP SA, qui m'a offert un terrain industriel réel sur lequel je pouvais réaliser mes travaux de recherche. Je tiens tout particulièrement à remercier tous ceux qui m'ont accueilli sur le site chimique de JORF LASFAR, pour leur disponibilité, leur assistance et leur soutien, sans lesquels je n'aurais pu collecter les données suffisantes qui ont enrichi ce travail de thèse.

Je souhaite mentionner le plaisir que j'ai eu de passer la plupart de mon temps au sein de l'EMINES et avec l'ensemble du personnel que je remercie pour leur accueil sympathique, leur aide ainsi que leur gentillesse tout au long de ces années de thèse, je cite le service scolarité, le service informatique, le service logistique, la bibliothèque, la reprographie et l'infirmerie.

Enfin, je réitère mes remerciements à mes parents, ma sœur et tous mes proches pour leur soutien inconditionnel, et grâce à qui j'ai pu poursuivre mes longues études aussi passionnantes qu'enrichissantes, ainsi je remercie mon âme sœur Majid pour son écoute, ses encouragements et son immense patience.

Une page se tourne, une autre s'ouvre, merci à tous ceux et celles qui y ont contribué et m'ont amené à faire les bons choix.

Sabah

It always seems impossible until it's done.

(Tout semble toujours impossible jusqu'à ce que ce soit fait.)

Résumé

Dans un contexte de forte concurrence internationale, et face à une forte croissance de la demande mondiale des fertilisants, une demande ainsi caractérisée par une grande diversité des produits, les entreprises soucieuses de préserver contre vents et marées leurs équilibres physiques, économiques et financiers, se trouvent largement exposées à de nombreux problèmes dus aux exigences des clients et le nouveau contexte compétitif renforcé par la mondialisation. C'est dans ce contexte tendu que ces entreprises confrontées à de multiples défis, cherchent à adopter d'urgence des plans d'ajustement structurel. Plus vite elles s'engageront sur le chemin de l'innovation et l'optimisation de leurs chaînes logistiques. En effet, il est indispensable que ces industriels se focalisent sur le développement de nouvelles approches de pilotage de flux visant à satisfaire le client final tout en minimisant les coûts, afin d'assurer sa pérennité dans une perspective de développement rapide et durable.

C'est dans ce contexte que le travail de doctorat s'intéresse à la définition des outils d'aide à la décision qui relèvent de niveaux temporels différents et de fonctions différentes de la chaîne logistique, à savoir la production, le stockage et la distribution des produits en vrac. L'objectif étant d'étudier l'intérêt d'une meilleure coordination entre ces différentes décisions de planification pour répondre aux exigences du marché.

Outre son intérêt pratique, la thèse s'inscrit dans le cadre de la recherche opérationnelle et plus précisément se réfère à l'optimisation déterministe et la simulation de flux à évènements discrets, ainsi qu'à leur couplage. Dans ce sens, nous avons développé des outils d'aide à la décision capables de répondre au besoin de l'industriel, que ce soit au niveau opérationnel, tactique ou stratégique. Ainsi, la méthodologie que nous proposons repose sur trois grands axes :

- Le premier axe vise à définir la méthodologie de modélisation adoptée pour la planification des systèmes logistiques industriels, en vue de réaliser un réseau d'écoulement de flux.
- Le deuxième axe aborde la réalisation des plans de production, de stockage et de distribution servant des marchés fortement diversifiés (exemple : marchés des engrais). Nous avons proposé trois modèles d'optimisation selon les trois niveaux de planification, minimisant les coûts totaux et maximisant le taux de satisfaction de la demande.

- Le troisième axe présente un modèle de simulation à évènements discrets pour comprendre et analyser la dynamique du système étudié, pour ainsi évaluer les différents plans fournis par les modèles d'optimisation.

Mots clés : Modélisation, graphe de flot, planification, simulation à évènements discrets, modèle mathématique.

Abstract

In a context of strong international competition, and in the face of strong growth in global demand for fertilizers, a demand thus characterized by a great diversity of products, companies appear anxious to preserve their physical, economic and financial balances against all odds, and find themselves widely exposed to many problems due to customer requirements and the new competitive environment reinforced by globalization. It is in this tense context that these companies, facing multiple challenges, are seeking to urgently adopt structural adjustment plans. They deeply need to fastly embark on the path of innovation and optimization of their supply chains. Indeed, it is essential that these manufacturers focus on the development of new flow management approaches aimed to satisfy the end customer while minimizing costs, in order to ensure its sustainability in a perspective of rapid and viable development.

It is in this context that this doctoral thesis is interested in the definition of decision support tools pertaining to different temporal levels and different functions of the supply chain, namely the production, storage and distribution of bulk products. The objective is to study the benefit of better coordination between these different planning decisions to meet market requirements. In addition to its practical interest, the thesis is part of operational research and more precisely refers to the deterministic optimization and discrete event simulation of flows, as well as their coupling. In this sense, we have developed decision support tools capable to meet industrial needs, whether at the operational, tactical or strategic level. Thus, the methodology that we propose is based on three main axes:

- The first axis aims to define the modeling methodology adopted for the planning of industrial logistics systems, with a view to creating a network flow.
- The second axis addresses the realization of production, storage and distribution plans serving highly diversified markets (example: fertilizer markets). We proposed three optimization models according to the three planning levels, minimizing the total costs and maximizing the demand satisfaction.
- The third axis presents a discrete event simulation model to understand and analyze the dynamics of the studied system, as well as to evaluate the different plans provided by the optimization models.

Keywords: Modeling, flow graph, planning, discrete event simulation, mathematical model.

Sommaire

Introduction générale 1
Chapitre I : Contexte industriel et problématique 9
1. Introduction 13
2. Contexte 13
3. Problématique 24
4. La prise de décisions lors de la planification : un processus hiérarchisé 39
5. La modélisation des problèmes de la planification 55
6. Conclusion 71
Chapitre II : Planification de la production - état de l'art 73
1. Introduction 75
2. Critères de classification des problèmes de planification 76
3. Méthodes et outils de planification dans un contexte déterministe 80
4. La planification dans un environnement incertain 101
5. La planification intégrée 110
6. Positionnement de nos travaux et conclusions 115
7. Conclusion 117
Chapitre III : Modélisation pour la planification des systèmes logistiques industriels 121
1. Introduction 125
2. Méthodologie de modélisation 128
3. Modélisation des systèmes logistiques industriels 139
4. Conclusion 168
Chapitre IV : Planification de la production, du stockage et de la distribution des produits en vrac dans un contexte déterministe 171
1. Introduction 177
2. Mise en œuvre de la méthodologie de modélisation 178
3. Modèle mathématique de planification stratégique 183
4. Modèle mathématique de planification tactique 213
5. Modèle mathématique de planification opérationnelle 234
6. Conclusion 252
Chapitre V : Amélioration des performances : simulation du système logistique industriel 253
1. Introduction 257
2. Revue de la littérature sur la simulation à événements discrets pour la planification 268
3. Mise en œuvre de la méthodologie de modélisation 275
4. Exploitation du modèle d'action pour l'évaluation des performances 288
5. Conclusion 298
Conclusion générale 300
Bibliographie 303
Annexes 333

Introduction générale

La gestion des chaînes logistiques est -depuis plusieurs années- passée de l'étude des problématiques traditionnelles de gestion de production et de gestion logistique toutes deux focalisées sur une seule entité, à une gestion de système dans sa globalité, ce qui a donné naissance aux problématiques dites de « Supply Chain Management ». Plusieurs raisons sont à la base de ce changement, notamment le recours massif des entreprises à la sous-traitance et à l'externalisation, poussant la gestion du flux produit au-delà des frontières de l'entreprise. Par ailleurs, l'augmentation des joint-ventures et des fusions entre entreprises entraîne une complexification organisationnelle considérable des moyens de production et de la logistique de chaque entreprise.

Dans le contexte économique actuel, les problèmes liés à la gestion des chaînes logistiques, et plus particulièrement aux systèmes de production, sont cruciaux pour les entreprises. En effet, l'évolution rapide des techniques de production, les exigences de la part des clients et la hausse de la concurrence, renforcée par la mondialisation, engendrent de nombreuses problématiques. Les entreprises ont modifié leurs stratégies commerciales. Ainsi, celles-ci ont par exemple diversifié leur portefeuille produit mais également raccourci la durée de vie de ces derniers. Ces différentes actions ont pour objectif de se différencier vis-à-vis des concurrents.

Les décisions en gestion de production sont traditionnellement regroupées en fonction de l'horizon de temps sur lesquelles elles s'appliquent : long terme (décisions stratégiques), moyen terme (décisions tactiques) et court terme (décisions opérationnelles). Cette décomposition permet de simplifier le processus décisionnel. Les décisions prises à un certain niveau deviennent des contraintes à satisfaire ou des objectifs à atteindre pour les niveaux inférieurs.

La résolution des problèmes de la gestion des systèmes de production se base sur des disciplines très différentes. Dans cette thèse, nous nous intéressons particulièrement aux problèmes d'optimisation et de simulation des systèmes de production. Les problèmes d'optimisation se fondent dans leur résolution sur des techniques d'optimisation, ils ont historiquement le plus d'applications en planification. On les retrouve dans les domaines de l'optimisation de la capacité (planification stratégique), l'optimisation de la charge du système

(planification tactique) et l'ordonnancement (planification opérationnelle). Les techniques de simulation permettent de reproduire et d'évaluer les performances du système de production visé par cette étude. Que l'on utilise une approche mathématique d'optimisation et/ou la simulation, l'étude d'un système logistique industriel, en vue d'apporter une aide à la décision, comporte ces différentes étapes : modélisation, résolution et évaluation du système d'après des critères clairement définis par les objectifs visés.

D'autre part, l'utilisation conjointe de la modélisation, de l'optimisation et/ou de la simulation représente une difficulté. En effet, lors de la phase de modélisation, on préfère utiliser un niveau de finesse suffisamment élevé alors qu'en optimisation, on exploite un modèle relativement simple. Les hypothèses simplificatrices doivent être déterminées lors de la phase de modélisation par les experts. Or, si on veut évaluer les performances d'un système, on est d'autant plus précis que le modèle est fin. En effet, l'utilisation d'un modèle très complexe, dont la connaissance spécifique au problème est plus difficile à exploiter, crée un espace de recherche inadapté lors de l'optimisation. Il est donc nécessaire de trouver le degré de finesse le plus juste.

La complexité de l'étude des systèmes de production réside dans le nombre important des entités qui constituent ce système ainsi que les interactions entre eux. En effet, selon le principe d'émergence, l'étude des parties d'un système ne permet pas, en général, de comprendre le système entier. Pour faire face à cette complexité, la modélisation aide au choix des entités pertinentes et donc à la négligence des entités non pertinentes. Le résultat de ces choix permet de construire un "modèle" qui permet de décrire la partie "pertinente" du système. Vu la difficulté de cette phase de construction, sa séparation explicite en deux phases de spécification et d'exploitation s'avère nécessaire. Nous obtenons donc le processus appelé "processus de modélisation" présenté dans la Figure 0.1 [Gourgand, 1984]. Ce processus détaillé dans [Tchernev, 1997] se compose de quatre phases. La première est la phase de spécification et les trois suivantes forment la phase d'exploitation.

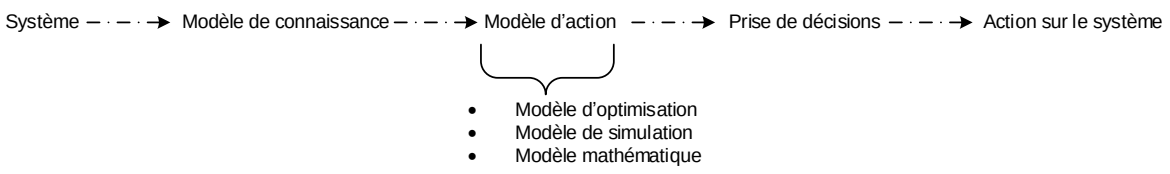


Figure 0. 1- Processus de modélisation

Lors de la deuxième phase, la connaissance que l'on a du système est formalisée sous la forme d'un modèle appelé "modèle de connaissance". Ce modèle contient la description des entités et de leurs interactions, mais ne contient aucun élément de la solution mise en œuvre. Il est généralement spécifié avec une approche transaction qui consiste à décrire, dans le formalisme choisi, le fonctionnement du système en précisant, pour chaque type de flux d'entités qui traversent ce système, le cheminement de ces entités et les traitements successifs qu'elles subissent. L'élaboration de ce premier modèle marque la fin de la phase de spécification. La phase d'exploitation du modèle peut alors commencer avec l'élaboration d'un ou de plusieurs modèles d'action. Le modèle d'action est le modèle mis en œuvre pour avoir une action sur le système. Suivant le type de modèle d'action, on parle de "modèle d'optimisation" si le modèle fait appel aux techniques d'optimisation (heuristiques, métaheuristiques, méthodes arborescentes, ...), de "modèle de simulation" s'il fait appel aux techniques de simulation (simulation à événements discrets, simulation continue, simulation par éléments finis, ...) et de "modèle mathématique" s'il met en œuvre des techniques mathématiques (programmation linéaire, en nombres entiers, quadratique, ...). L'exploitation du modèle de connaissance et du modèle d'action d'un système a comme objectif de traiter les informations concernant le système à modéliser. Le but ici étant de fournir comme résultats finaux l'information nécessaire à la prise des décisions par les experts industriels et les managers (respectivement les personnes qui détiennent la connaissance du système et celles qui ont la responsabilité d'engager des coûts financiers) de sorte à agir sur le système et/ou pour tester des hypothèses nécessitant des modifications du modèle de connaissance, ceci en vue d'améliorer les performances qualitatives ou quantitatives du système. En d'autres termes, soit on intervient sur le système et le processus de modélisation est terminé, soit on itère le processus de modélisation.

Les travaux réalisés dans le cadre de cette thèse s'intègrent dans cette mouvance. Ils portent sur une problématique liée à l'activité industrielle du Groupe OCP[1] SA Maroc et plus particulièrement à la production et à l'expédition des engrais. Nous avons choisi de mettre en

[1] Anciennement Office Chérifien de Phosphates, aujourd'hui Groupe OCP SA http://www.ocpgroup.ma/fr

œuvre le processus de modélisation destiné à concevoir des outils d'aide à la décision pour la planification de la production et l'expédition des engrais suivant les trois horizons temporels (long, moyen et court).

Au-delà de la modélisation et l'optimisation du système de production étudié pour la planification aux trois niveaux (stratégique, tactique et opérationnel), ainsi que la modélisation et simulation pour l'évaluation des performances, les travaux de recherche présentés dans la suite de ce document ont également porté sur la réalisation d'un environnement intégré de planification couvrant les horizons à long et moyen termes. L'objectif consiste à répondre aux problèmes d'incohérence entre les décisions des différents niveaux de planification. Pour cela, nous proposons un ensemble de méthodes basées sur la programmation linéaire et les modèles de flot. C'est dans ce contexte que ce manuscrit résulte des travaux réalisés au terme de la thèse. Il se structure en cinq chapitres.

Dans le chapitre 1, nous visons à définir les bases nécessaires à la compréhension de cette thèse, nous présentons le contexte industriel de notre étude et nous introduisons la problématique générale à laquelle nous nous sommes intéressés. Pour cela, des détails concernant l'industrie de phosphate du groupe OCP-SA ont été introduits en vue de déduire les spécificités du secteur ainsi que les dysfonctionnements soulevés. Ensuite, nous décrivons les problématiques liées à la planification de la production dans les trois niveaux de prise de décisions. À la fin de ce chapitre, nous exposons notre problématique qui découle de ce qui a été décrit précédemment.

Le chapitre 2 est, quant à lui, dédié à la réalisation d'un état de l'art portant sur les différentes recherches et problématiques relatives à la planification. Celui-ci n'a pas pour prétention d'établir une liste de la totalité des études menées sur le sujet, mais plutôt de présenter de la manière la plus exhaustive possible, les différents axes de recherche étudiés. Nous présentons les différents critères de classification des problèmes de planification ainsi que les différents modèles de planifications adoptés dans la littérature. Puis nous dressons une revue de la littérature qui porte, dans une première section, sur les outils et méthodes utilisés pour traiter le problème de planification dans un environnement d'abord déterministe puis dans une deuxième section dans un cadre incertain, et ceci selon les trois niveaux de décision traités par les problèmes de planification. Partant de ces travaux, nous nous intéressons, dans un second temps, aux articles de recherche abordant les approches de la planification intégrée. Ce chapitre

s'achève par un tableau synthétisant les spécificités des principaux travaux ainsi que notre positionnement par rapport à ces derniers.

Le chapitre 3 se focalise sur la présentation de la méthodologie de la modélisation adoptée pour la planification des systèmes logistiques industriels. Nous proposons dans un premier temps d'appliquer les phases d'analyse et de spécification de la méthodologie ASCI au domaine des chaînes logistiques industrielles pour élaborer un modèle de connaissance générique de ces chaînes logistiques dans le but de générer les modèles d'optimisation et d'évaluation des performances de planification.

Le chapitre 4 présente les modèles d'optimisation de la planification *via* la formalisation mathématique. Nous détaillons pour cela les modèles mathématiques proposés aux niveaux de décisions stratégiques, tactiques et opérationnelles. Puis, nous validons nos expérimentations par des cas d'études réels d'un industriel de production d'engrais, en confirmant l'intérêt de la prise en compte des contraintes stratégiques au niveau tactique, permettant un meilleur plan à la fois réaliste et optimal qui puisse répondre aux attentes des clients.

Le chapitre 5 est dédié à la discussion des leviers d'amélioration de performance de la chaîne logistique par la simulation. L'objectif est de profiter des grandes possibilités offertes par la simulation pour modéliser les détails du problème étudié. Pour ceci, nous détaillons la modélisation et la simulation du problème de la planification à l'aide d'un outil de simulation à évènements discrets. Le but étant d'évaluer les solutions trouvées par le modèle d'optimisation par cette simulation. Enfin, la mise en œuvre expérimentale clôture ce chapitre.

Afin de faciliter sa lecture et l'enchainement des parties le constituant, un synoptique de ce manuscrit de thèse est illustré sur la Figure 0.2.

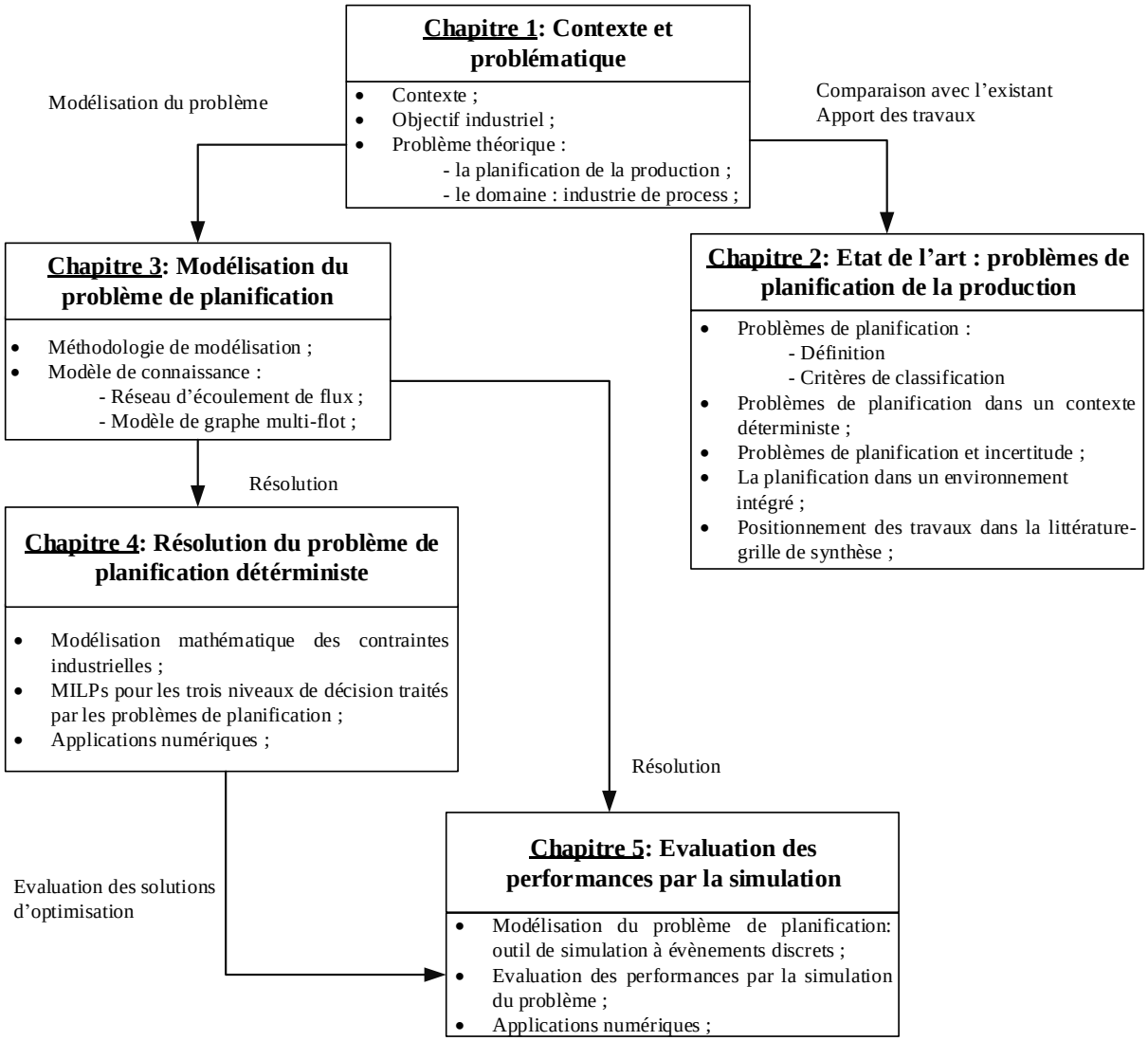


Figure 0. 2- Structure du manuscrit de thèse

Pour terminer, une conclusion générale revient sur l'ensemble des travaux de thèse par contenant et présente une synthèse du travail effectué et les perspectives éventuelles qui ouvrent les horizons sur d'autres sujets pouvant être abordés à la suite de cette étude.

Les travaux de recherche réalisés durant cette thèse ont donné lieu aux publications et communications dans des congrès scientifiques, qui sont présentées ci-dessous :

1. Belil S., Rakiz A., Tchernev N., and Fenies, P., (2020). A joint model for optimal capacitated multi-level lot-sizing and financing of the working capital requirement under delays in payments. *The 13th International Conference on Modeling, Optimization and Simulation MOSIM 2020, Agadir Maroc.*

2. Belil, S., Tchernev, N., Kemmoé-Tchomté, S., (2019). Production planning under demand uncertainty using Monte Carlo simulation approach: a case study in fertilizer industry. *IEEE IESM, the 8th International Conference on Industrial Engineering and Systems Management*, Septembre 25-27, *Shanghai, China*. DOI: 10.1109/IESM45758.2019.8948112
3. Belil, S., Tchernev, N., Kemmoé-Tchomté, S., (2019). Une approche intégrée d'optimisation et de modélisation / simulation à évènements discrets pour la planification d'une chaîne logistique hybride. *CIGI QUALITA 2019, 13ème Conférence International de Génie Industriel, École de technologie supérieure, 25-28 Juin, Montréal, Québec, Canada.*
4. Belil, S., Rakiz, A., Retmi, K., (2019). An Integrated Approach for Supply Chain Tactical Planning and Cash Flow Valuation. *APMS 2019, Advances in Production Management System, Septembre 1-5, Austin, Texas, USA. Publié dans Springer, APMS Towards Smart Production Management Systems, Part II, pp. 57-83*.
5. Belil, S., Tchernev, N., Kemmoé-Tchomté, S., (2019). Simulation based optimization decision support tool for production planning. *9th IFAC Conference on Manufacturing Modelling, Management and Control, MIM 2019, August 28-30, Berlin, Germany, IFAC PapersOnLine Vol. 52(13), pp. 2402-2407.*
6. Bamoumen, M., Belil, S., Tchernev, N., Kemmoé-Tchomté, S., (2018). An Optimization Approach for a Strategic Balance of Supply and Demand in the Process Industry of Bulk Materials. 7th *International Conference on Information Systems, Logistics and Supply Chain, ILS2018, pp. 453-462, July 8-11, Lyon, France.*
7. Belil, S., Tchernev, N., Kemmoé-Tchomté, S., (2018). MILP-based approach to mid-term production planning of batch manufacturing environment producing bulk products. *INCOM 2018, 16th IFAC Symposium on Information Control Problems in Manufacturing, 11-13 June 2018 Bergamo Italy, IFAC-PapersOnLine, Vol. 51(11), pp. 1689-1694.*
8. Belil, S., Tchernev, N., (2018). An optimization approach for production, storage and retrieval planning in the process industry of bulk products, ***PHORESNET 2018***, *The international conference for research on phosphates and derivatives*, 10-11 November 2018 Benguerir Morocco.
9. Belil, S., Tchernev, N., Kemmoé-Tchomté, S., (2017). A MILP for strategic planning of production-inventory network manufacturing bulk materials. *7th International*

Conference on Industrial Engineering and Systems Management, IESM 2017, pp. 232-237, October 11-13, 2017, Saarbrücken, Germany.

Chapitre I : Contexte industriel et problématique

Ce chapitre a pour objectif de définir le contexte et la problématique adressée dans le cadre de ce doctorat. Il débute ainsi par une présentation du contexte associé à nos travaux de recherche liés à la prise de décision lors de la planification des systèmes de production industrielle et appliqués à la chaîne logistique du groupe OCP SA.

Sommaire

Chapitre I : Contexte industriel et problématique 9
1. Introduction 13
2. Contexte 13
2.1. Limos 14
2.2. Groupe OCP (SA) 14
2.2.1. Présentation générale 14
2.2.2. Missions et activités du groupe 15
2.2.3. Structure du groupe 17
2.2.4. Chaîne logistique de l'axe Nord du groupe OCP 19
2.3. Complexe de transformation Jorf Lasfar 19
2.4. Unité de production d'engrais 21
3. Problématique 24
3.1. Définition des systèmes industriels de production 24
3.2. Organisation des systèmes de production industriels 25
3.3. L'industrie de process 27
3.3.1. Les types de processus 27
3.3.2. Les topologies des systèmes de production dans l'industrie process 30
3.3.2.1. Topologie en réseau 31
3.3.2.2. Topologie séquentielle 31
3.3.3. Les types d'opérations 37
4. La prise de décisions lors de la planification : un processus hiérarchisé 39
4.1. Définition de la planification 39
4.2. Le PIC dans le cadre de la planification stratégique 45
4.3. Le PDP dans le cadre de la planification tactique 50
4.4. La planification opérationnelle 52
4.4.1. Le calcul des besoins nets dans le cadre de la planification opérationnelle 52
4.4.2. L'ordonnancement dans le cadre de la planification opérationnelle 54
5. La modélisation des problèmes de la planification 55
5.1. Notion de modèle 56
5.2. Formalismes de modélisation utilisés 58
5.2.1. Formalisation mathématique 58
5.2.2. Modélisation sous forme de graphe 60
5.2.2.1. Simple flot vs Multiflot 61

5.2.2.2. Problèmes généraux d'optimisation du réseau de flux de fabrication. 63
5.2.3. Simulation à événements discrets 64
5.3. Les méthodes de résolution 65
5.3.1. Problème d'optimisation combinatoire 65
5.3.2. Méthodes d'optimisation 69
5.3.2.1. Programmation Linéaire 69
5.3.2.2. Les Heuristiques et les Métaheuristiques 70
6. Conclusion 71

Liste des figures

Figure 1. 1- Implantations internationales du groupe OCP 15
Figure 1. 2- Activités du groupe OCP 17
Figure 1. 3- Implantations du groupe OCP au Maroc 18
Figure 1. 4- Investissements sur les trois axes du groupe OCP 18
Figure 1. 5- Interactions entre les unités de production 21
Figure 1. 6- Zoom sur l'unité de production d'engrais 21
Figure 1. 7- La fabrication, le stockage et l'expédition des engrais. 22
Figure 1. 8- Structure d'un hangar de stockage 23
Figure 1. 9- Stockage et reprise des produits stockés en vrac dans un Hangar. 23
Figure 1. 10- L'évolution du stock lors de production discontinu par lot par oposition à la production continue (addaptée à partir de [Harjunkoski et al., 2014]) 29
Figure 1. 11- Evolution des stocks lors de la production process hybride 30
Figure 1. 12- Topologie en réseau dans l'industrie process (adapté à partir de [Kondili et al., 1993]]) 31
Figure 1. 13- Topologie séquencielle à une seule étape 32
Figure 1. 14- Topologie séquencielle à plusieurs étapes multi produits 34
Figure 1. 15- Topologie séquentielle à plusieurs étapes polyvalentes multi produits 34
Figure 1. 16- Classification des topologies des systèmes de production dans l'industrie process (adapté à partir de [Méndez et al., 2006]) 36
Figure 1. 17- Type de contraintes à prendre en compte dans les topologies à plusieurs étapes (adapté à partir de [Sundaramoorthy and Maravelias, 2008]) 39
Figure 1. 18- Zone commune entre la planification et ordonnancement [Larabi, 2010]) 40
Figure 1. 19- Objectifs de la planification et de l'ordonnancement [Larabi, 2010]. 40
Figure 1. 20- Matrice de décisions lors de la planification d'un système de production de bien
Figure 1. 21- Le consensus lors du processus d'élaboration du PIC 47
Figure 1. 22- Cadre décisionnel du PIC [Womack et al., 1992] 49
Figure 1. 23- Schématisation du processus décisionnel lors de la planification tactique 50
Figure 1. 24- La planification des besoins matières : le lien entre le PDP et le MRP 53

1. Introduction

Le travail de recherche dans le cadre d'un doctorat est tout aussi fortement impacté par le sujet adressé que par l'environnement dans lequel il évolue. Par conséquent, il est indispensable, pour être en mesure d'apercevoir le travail réalisé, de connaître et de comprendre ces différents paramètres ; cet aspect constitue l'objectif premier de ce chapitre.

Ainsi, dans les paragraphes suivants, seront introduites les deux entités au sein desquelles ont été réalisés ces travaux de recherche, en l'occurrence le Laboratoire d'Informatique, de Modélisation et d'Optimisation des Systèmes (LIMOS) UMR CNRS 6158 de Clermont-Ferrand et la Chaire OCP[1] d'optimisation industrielle. Porté par « l'EMINES - School of Industrial Management[2] », rattaché à l'Université Mohamed VI Polytechnique, la Chaire OCP d'optimisation industrielle a pour mission de travailler à l'harmonisation entre le pilotage opérationnel et la planification stratégique des chaînes industrielles et logistiques. Etroitement liée à l'activité industrielle du Groupe OCP, elle vise à constituer un pôle d'excellence interdisciplinaire, ayant vocation à apporter des contributions majeures sur le plan de la connaissance et de la pratique réelle. Au-delà de leur présentation, nous nous intéresserons également à la problématique de planification long, moyen et court terme de la production, du stockage et de l'expédition des engrais.

Compte-tenu de ces éléments, ce chapitre débute par une présentation du contexte dans lequel a été effectuée la thèse. Ceci facilitera l'introduction, dans une deuxième partie, de la problématique de planification du groupe OCP SA considérée selon les trois niveaux, le long le moyen et le court terme. De plus, cette partie traitera l'extension de modélisation de la chaîne logistique de l'OCP SA à un probléme théorique de graphe de flot, ainsi elle sera également constituée d'une présentation des différentes méthodes de résolution.

2. Contexte

La thèse, présentée dans ce document, a été réalisée au Laboratoire d'Informatique de Modélisation et d'Optimisation des Systèmes (LIMOS) et a été financée par la Chaire OCP d'optimisation industrielle. Elle porte sur une problématique liée à l'activité industrielle de

[1] Anciennement Office Chérifien de Phosphates, aujourd'hui Groupe OCP http://www.ocpgroup.ma/fr
[2] https://www.emines-ingenieur.org/

l'OCP et plus particulièrement à la production et à l'expédition des engrais. Une courte présentation du LIMOS et de l'OCP est réalisée par la suite.

2.1. Limos[3]

Le Laboratoire d'Informatique, de Modélisation et d'Optimisation des Systèmes (LIMOS) est une Unité Mixte de Recherche (UMR 6158) dépendant du CNRS et plus particulièrement de l'Institut des Sciences de l'Information et de leurs Interactions (INS2I). Le positionnement scientifique du LIMOS est centré autour de l'Informatique, la Modélisation et l'Optimisation des Systèmes Organisationnels et Vivants. Le LIMOS a pour vocation d'étudier et d'optimiser l'impact des décisions humaines sur son environnement. Ainsi, il adresse aussi bien des thématiques telles que l'optimisation des systèmes statiques et dynamiques, l'acquisition, le transfert, le traitement et l'analyse de données, l'optimisation et l'évaluation des performances des systèmes organisationnels réels, liés à la production de biens et de services, à la logistique, aux systèmes hospitaliers ou aux transports. Afin de mener à bien cette diversité de recherches, celui-ci est structuré en 3 axes intitulés respectivement « Modèles et Algorithmes de l'Aide à la Décisions (MAAD) », « Systèmes d'information et de communication (SIC) » et « Outils Décisionnels pour la Production et les Services (ODPS) » au sein duquel ont été effectués les travaux de recherches faisant l'objet de ce document.

Comme mentionné précédemment, le doctorat présenté dans ce manuscrit est étroitement lié à l'activité industrielle du Groupe OCP. À ce titre, au-delà du LIMOS, il a également été réalisé autour d'une entreprise, à savoir le Groupe OCP et plus particulièrement le complexe de transformation Jorf Lasfar dont les présentations sont effectuées par la suite.

2.2. Groupe OCP (SA)

2.2.1. Présentation générale

Le groupe OCP (SA) occupe une place particulière dans l'histoire industrielle du Maroc. Ce groupe est un des leaders mondiaux sur le marché du phosphate et ses produits dérivés avec un chiffre d'affaire de 54.09 milliards de dirhams marocains (MAD) en 2019. C'est un acteur de référence incontournable sur le marché international depuis sa création en 1920. Présent sur toute la chaîne de valeur, le groupe OCP extrait, valorise et commercialise du phosphate et des

[3] https://limos.fr/

produits dérivés, à savoir l'acide phosphorique et l'engrais. Il est le premier exportateur mondial de roches et d'acide phosphorique, et l'un des plus importants producteurs d'engrais.

Le groupe OCP trouve, depuis sa création, les ressources de sa croissance soutenue et de son leadership dans sa stratégie industrielle. Celle-ci est rythmée par une montée en puissance régulière de l'outil de production, une politique ambitieuse de partenariats durables, une diversité du portefeuille (produits, régions, clients), et une force de vente avec un investissement de 200 Milliards de Dirhams. Ainsi avec environ 350 clients à travers les 5 continents (Figure 1. 1), le groupe OCP consolide davantage ses positions sur les produits finis tout en renforçant sa présence en particulier en Afrique, en Amérique du Nord et en Amérique Latine (exprimée en pourcentage des parts des volumes d'exportation dans la Figure 1.1). La flexibilité industrielle et l'agilité commerciale du groupe se reflètent sur ses portefeuilles produits et régions de plus en plus diversifiés.

Figure 1. 1- Implantations internationales du groupe OCP

2.2.2. Missions et activités du groupe

Le groupe OCP se caractérise par sa présence tout au long de la chaîne de valeur, de l'extraction, la valorisation, jusqu'à la commercialisation du phosphate et des produits phosphatés. Ses missions se répartissent en quatre activités principales :

- L'extraction : c'est une opération qui se fait dans des mines à ciel ouvert, elle consiste à extraire le phosphate de la terre et s'exécute en 4 phases : forage[4], sautage[5], décapage[6] et défruitage[7]. Une fois le phosphate extrait et transporté vers d'autres unités[8], il est traité dans le but d'enrichir le minerai en améliorant sa teneur de phosphate. Le groupe OCP a produit (en 2019) 37.6 millions de tonnes de la roche phosphatée dont 11.3 millions de tonnes sont destinés à l'export.
- Le transport : cette étape consiste à alimenter d'autres sites de production pour le traitement et l'obtention des produits destinés à la vente. En matière logistique, le groupe OCP dispose du transport ferroviaire, routier et du plus long pipeline de transport du phosphate au monde. Reliant les sites miniers aux complexes de transformation sur une longueur de 235 kilomètres, le slurry pipeline permet au groupe de doubler sa capacité de transport minier, de réduire ses coûts logistiques et de diminuer considérablement la perte de phosphate tout au long de la chaîne de production.
- La transformation : le phosphate réceptionné à partir des sites miniers subit des transformations chimiques tout au long d'une chaîne de procédés continus, pour sa valorisation en produits dérivés : l'acide phosphorique et l'engrais. Le groupe OCP a produit (en 2019) 6.1 millions de tonnes d'acide phosphorique, dont 2.1 millions de tonnes sont destinés à l'export. Il a produit également 8.8 millions de tonnes d'engrais, dont 8.4 millions de tonnes sont destinés à l'export.
- L'export : le groupe OCP dispose d'une grande infrastructure portuaire, qui a pour mission de recevoir, décharger et stocker les matières premières importées, nécessaires à l'alimentation des unités de transformation, ainsi que le stockage, le transfert et le chargement des produits finis destinés à l'export.

La Figure 1. 2 donne une synthèse des activités du groupe OCP.

[4] Cette étape consiste à foret des trous, d'une profondeur donnée qui dépend la mine, qui serviront comme loges pour placer les charges explosives.
[5] Cette étape consiste à mettre de l'explosif dans les trous et procéder au tir.
[6] Cette étape sert à enlever les inutiles terrains pour accéder aux couches phosphatées.
[7] Cette étape consiste à enlever le phosphate, à le charger sur des camions pour le transfert vers d'autres opérations réalisées dans la mine.
[8] Unités de lavage, de mélange et de séchage.

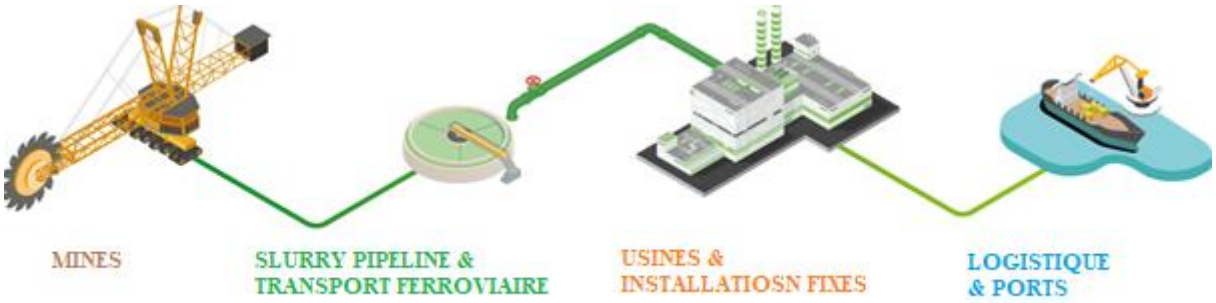


Figure 1. 2- Activités du groupe OCP

2.2.3. Structure du groupe

Pour des raisons géographiques et organisationnelles, les principaux gisements du groupe OCP et leur exploitation sont structurés en trois axes différents (Figure 1. 3) : axe nord, axe sud et axe centre. Tout au long de chaque axe, le groupe OCP extrait, valorise et commercialise du phosphate et ses produits dérivés, notamment de l'acide phosphorique et des engrais. Le groupe maîtrise toute la chaîne de création de valeur de l'industrie du phosphate : extraction et traitement du minerai, transformation de cette matière première en un produit liquide intermédiaire, l'acide phosphorique, et la fabrication des produits finis par concentration et granulation de cet acide ou par purification : les engrais et l'acide phosphorique purifié.

Chaque axe se décompose en un ou plusieurs sites (miniers ou de transformation). Trois régions au Maroc se concentrent sur les activités minières du groupe avec 4 sites miniers (Khouribga, Ben Guérir, Youssoufia, et Boucraâ). Les activités de transformation du phosphate en acide phosphorique et en engrais phosphatés sont essentiellement concentrées au niveau des sites chimiques (Jorf Lasfar et Safi). Les installations portuaires se concentrent principalement sur quatre régions (Safi, Casablanca, Jorf Lasfar, et Laayoune).

Au niveau de chaque axe et pour chaque activité, le groupe OCP met en œuvre un programme d'investissement ambitieux et modulaire, qui s'élève à près de 200 milliards de MAD sur l'horizon 2008-2027. Ce programme, qui concerne les trois produits principaux, la roche, l'acide phosphorique et l'engrais, permet de proposer un portefeuille de produits large et diversifié qui s'adapte à la volatilité et à la saisonnalité du marché.

Ce programme vise à doubler les capacités minières, à améliorer l'efficacité industrielle, à tripler les capacités d'engrais et à renforcer les capacités logistiques.

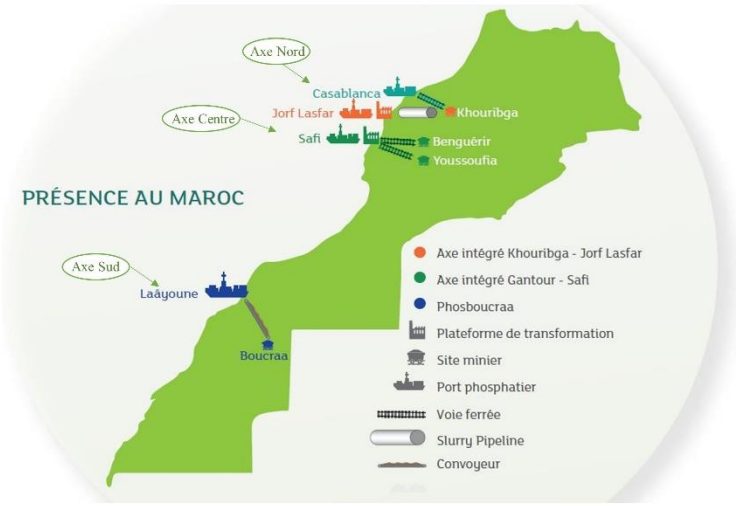


Figure 1. 3- Implantations du groupe OCP au Maroc

Sa stratégie commerciale repose notamment sur un portefeuille de produits innovants et de qualité adaptés à la diversité des sols et des variétés végétales, et une capacité industrielle massive, couplée à la flexibilité de son appareil productif, ce qui lui assure une structure de coûts optimale. Les différents volets de ce programme d'investissement sont présentés dans la Figure 1. 4.

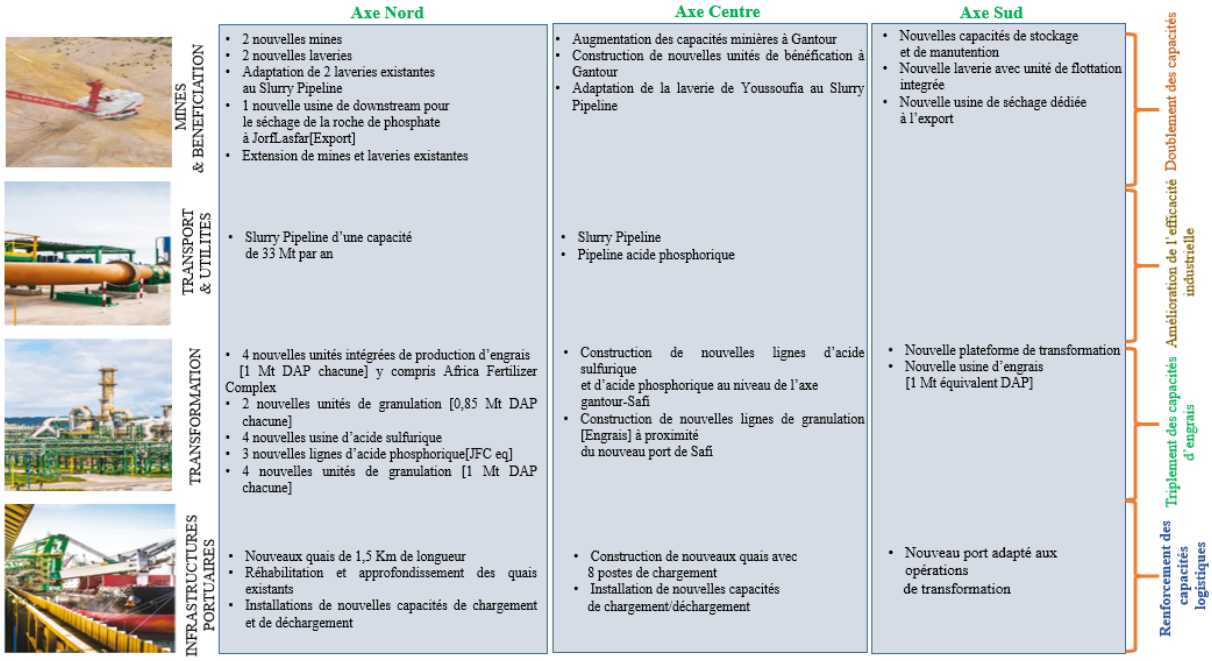


Figure 1. 4- Investissements sur les trois axes du groupe OCP

La thèse faisant l'objet de ce document a été effectuée en liaison avec l'activité de l'axe Nord du groupe OCP.

2.2.4. Chaîne logistique de l'axe Nord du groupe OCP

L'axe Nord (Khouribga – Jorf Lasfar) abrite la plateforme intégrée de transformation chimique de phosphate. Le phosphate extrait à Khouribga est transporté par train à Casablanca et par Slurry Pipeline à Jorf Lasfar, où il sera transformé en acide phosphorique et en engrais. L'exportation des produits finis s'effectue au niveau du port de Jorf Lasfar.

Les travaux de thèse faisant l'objet de ce document ont été effectués en liaison avec l'activité de l'axe Nord du groupe OCP et plus particulièrement avec le complexe de transformation de Jorf Lasfar présenté dans le paragraphe suivant.

2.3. Complexe de transformation Jorf Lasfar

Le complexe de transformation de Jorf Lasfar est le plus grand complexe d'engrais au niveau mondial. Il a permis au groupe OCP de doubler sa capacité de valorisation du phosphate. Ce complexe regroupe les industries chimiques de valorisation des minerais de phosphates, et de production des engrais phosphatés et/ou azotés. Au niveau de ce complexe deux familles de produits sont commercialisés : l'acide phosphorique marchant/purifié et l'engrais. Cette activité chimique du complexe est assurée par sa filiale Maroc Phosphore III-IV ainsi que par d'autres sites sous forme de joint-ventures résultants de partenariats entre le groupe OCP et d'autres groupes étrangers.

Le site de Maroc Phosphore III-IV et plus particulièrement la production et l'expédition des engrais représente le périmètre de nos travaux. Ce site produit, à partir du phosphate arrivant essentiellement du site minier de Khouribga, de l'acide sulfurique, de l'acide phosphorique et des engrais qui constituent le produit final. Ce site se décompose principalement :

- <u>d'unités de production</u> (la nomination interne de l'OCP les définit comme des ateliers) : une unité de production de l'acide sulfurique, une unité de production de l'acide phosphorique et une unité de production des engrais ;
- <u>des zones de stockage :</u> bacs de stockage pour le stockage des matières premières, des produits intermédiaires et hangars pour le stockage des produits finis ;
- <u>des installations portuaires</u> pour le déchargement des matières premières importés et le chargement des produits finis.

La production des engrais représente la partie aval de la chaîne logistique de Maroc Phosphore III-IV. La production est basée principalement sur trois grandes étapes réalisées par les unités de production suivantes :

- l'unité de production d'acide sulfurique qui intervient au début de la chaîne pour produire l'acide sulfurique. Celle-ci consomme du souffre importé ou fusionné dans le site, ainsi que d'autres intrants. L'acide sulfurique produit est ensuite stocké dans des bacs intermédiaires pour alimenter le processus aval.
- l'unité de production d'acide phosphorique s'alimente à partir des bacs de stockage de l'acide sulfurique, ainsi que d'un stock de phosphate réceptionné depuis le site minier. La production de l'acide phosphorique se fait sous deux concentrations 29% et 54% en du pentoxyde de phosphore (P_2O_5)[9]. Ces deux variantes de concentration sont stockées par la suite dans des bacs intermédiaires.
- le dernier maillon de la chaîne est l'unité de production d'engrais, elle est connectée aux deux unités sulfurique et phosphorique, dans la mesure où elle s'alimente à partir de leurs produits (l'acide sulfurique et l'acide phosphorique). L'unité de production d'engrais consomme en parallèle d'autres matières premières importées à savoir l'ammoniac et les enrobants. Les engrais sont enfin stockés dans des zones de stockages spécifiques pour les produits en vrac (des hangars) et/ou, chargés sur des bateaux au port pour l'export, ou transportés par camions et trains pour la vente locale.

Les interactions entre les trois unités sont illustrées sur la Figure 1. 5. Ainsi la Figure 1. 6 représente plus en détails l'unité de production d'engrais.

[9] Dans le milieu agricole on nomme souvent P_2O_5 les engrais phosphatés.

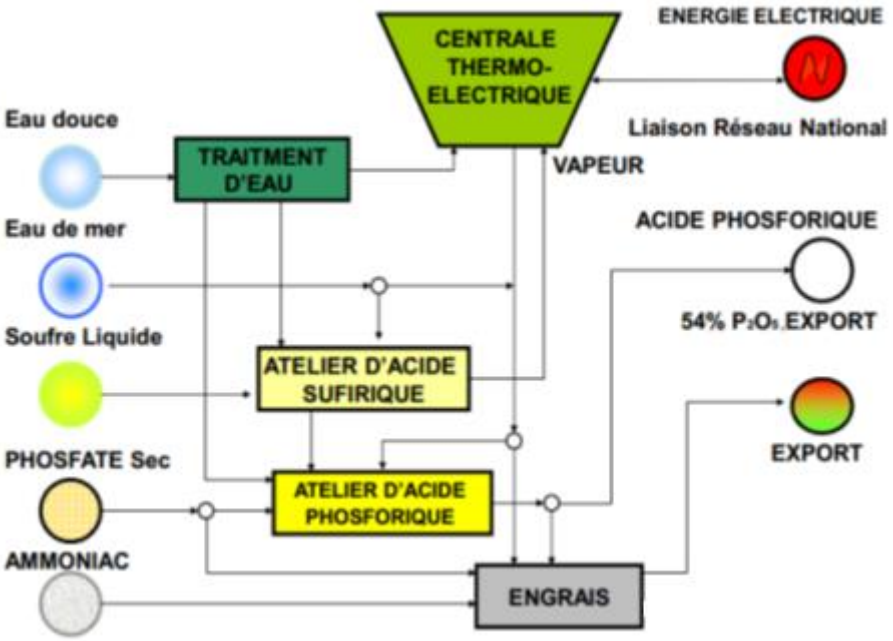


Figure 1. 5- Interactions entre les unités de production

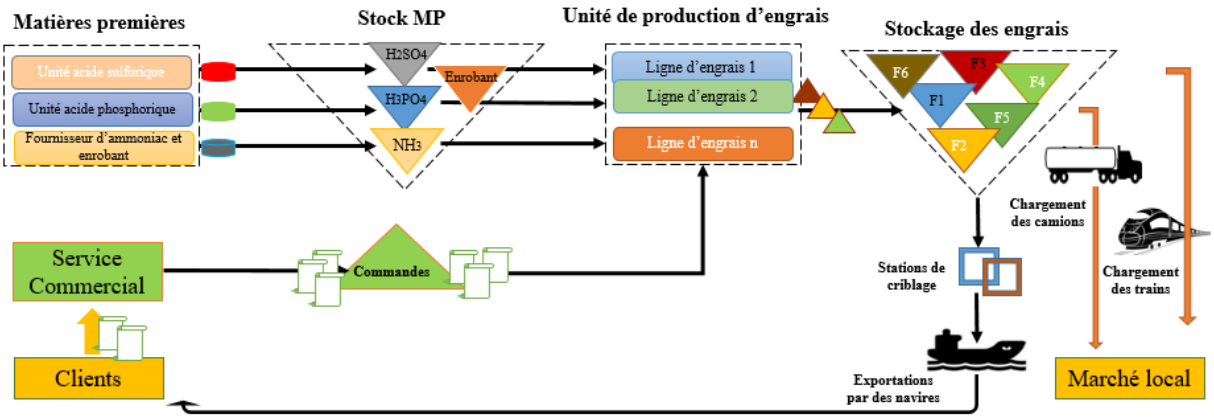


Figure 1. 6- Zoom sur l'unité de production d'engrais

2.4. Unité de production d'engrais

L'unité de production d'engrais correspond à la partie aval de la chaîne logistique du site Maroc Phosphore III-IV de Jorf Lasfar. Comme le montre la Figure 1. 7, l'unité de production d'engrais est reliée au port de Jorf Lasfar. Elle a pour mission de produire, de stocker, de trasnférer et de charger les engrais, ainsi que de garantir la maintenance mécanique et la maintenance électrique de l'ensemble des moyens de manutention, de transfert et de chargement des produits. Cette unité est dotée d'un ensemble de 7 lignes de production de capacités limitées, travaillant en parallèle, capables de produire 50 produits (engrais de qualité

différente) regroupés en six grandes familles. Actuellement la production de ces engrais à l'OCP s'effectue essentiellement à la commande.

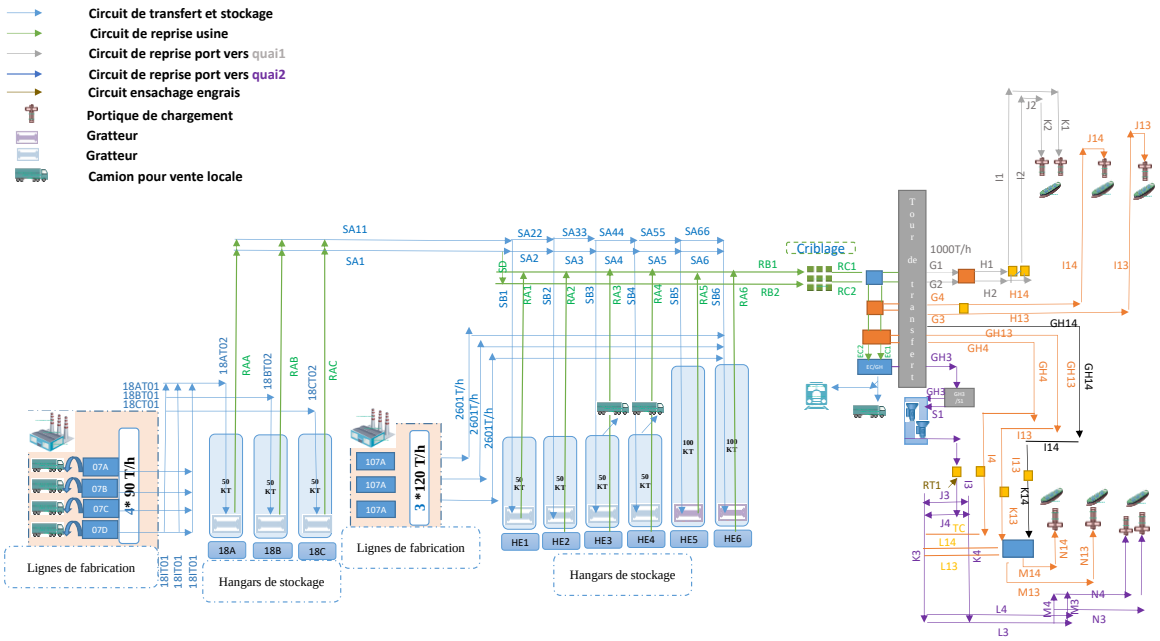


Figure 1. 7- La fabrication, le stockage et l'expédition des engrais.

Pour le stockage des engrais il existe un ensemble de 9 zones (hangars) de stockage dédiés pour entreposer les produits en vrac. La connexion entre les lignes de production et les zones de stockage se fait par le biais d'un système de convoyage composé d'un ensemble de convoyeurs à bandes. Ensuite, en fonction des demandes clients et du niveau de granularité demandé, ces engrais sont déstockés et transportés via des convoyeurs vers des stations de criblage. Ces dernières permettent de cribler le produit pour avoir la granularité désirée. Ainsi, les produits finalisés sont transférés vers des quais de chargements installés sur le port pour l'exportation au moyen des bateaux, ou vers des voies ferroviaires ou la station de chargement des camions destinés aux ventes locales.

Les engrais produits par l'unité d'engrais sont stockés dans des hangars de capacité différente, avant d'être expédiés par bateau. Ces hangars ne sont pas tous connectés aux convoyeurs qui chargent les bateaux, ce qui implique des manutentions additionnelles. Ils ne peuvent accueillir qu'un nombre limité de références d'engrais, avec des contraintes de séparation plus ou moins drastiques. Comme le montre la Figure 1. 8, à l'intérieur, chaque hangar est divisé en plusieurs zones de stockage appelées « arches » au moyen de plusieurs murs de séparation. L'allocation dynamique des zones de stockage, en fonction des capacités,

des commandes à livrer et des moyens de manutention mobilisés, induit des contraintes sur la planification de la production des engrais.

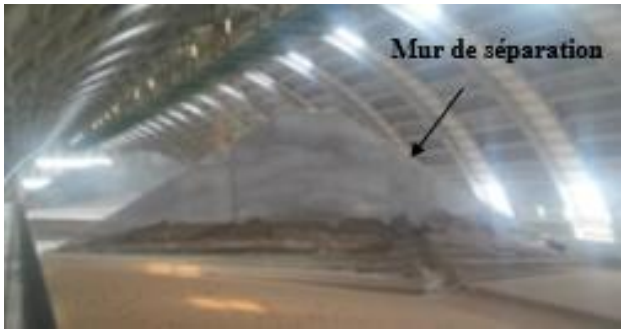


Figure 1. 8- Structure d'un hangar de stockage

Chaque hangar dispose d'un convoyeur de stockage situé dans sa partie supérieure et d'un convoyeur de reprise (Figure 1. 9). Ce dernier est lié à un engin de déstockage qu'on appelle le gratteur. A son tour le convoyeur de stockage est lié à un chariot verseur qui permet le renversement du produit dans le hangar. L'opération de stockage se fait à l'aide d'un chariot verseur, qui se positionne selon le besoin sur une zone de stockage, déplaçable tout le long du bac de stockage, et renverse le produit transféré par les convoyeurs, pour qu'il soit stocké. Les zones de stockage sont délimitées par les arches. Ainsi, dans un seul hangar plusieurs qualités peuvent être conservées.

Figure 1. 9- Stockage et reprise des produits stockés en vrac dans un Hangar.

Cette succincte présentation de l'unité de production d'engrais et son intégration dans la chaîne logistique aval du site Maroc Phosphore III-IV de Jorf Lasfar montre la complexité élevée du système auquel on s'intéresse dans ce manuscrit. D'autre part, l'accroissement prévisionnel de l'étendue du portefeuille des qualités d'engrais offerte par l'OCP, combiné avec une importante saisonnalité de la demande, militent en faveur d'une planification et d'une allocation dynamique et robuste de l'espace de stockage. Afin de répondre à ce besoin et à la

complexité, il est nécessaire d'envisager une planification conjointe de tous les moyens de production, de stockage et de manutention. Ceci nécessite, comme dans toute entreprise, la mise en place de processus de pilotage clairement établis tels que ceux relatifs à la planification ; domaine adressé dans le cadre de ces travaux de thèse.

3. Problématique

3.1. Définition des systèmes industriels de production

La notion de système de production a été définie par plusieurs auteurs dans la littérature scientifique ([Dietrich, 1991] ; [Lopez, 1991] ; [Dauzère-Pérès, 1992]; [Giard, 2003]). Nous rappelons ici la définition de quelques notions se rapportant aux systèmes de production, dans le contexte de production de biens. [Dietrich, 1991] définit un système de production comme « un ensemble de ressources qui réalisent des opérations sur des matières pour produire des produits ». Lopez considère que « la production est une opération de transformation d'un ensemble de matières premières ou de composants en produits finis et qu'un système de production est constitué de l'ensemble des éléments qui interviennent dans cette transformation et qui correspondent aux moyens ou ressources (humaines ou technologiques) » [Lopez, 1991]. Dauzère-Pérès ajoute la distribution et ainsi définit un système de production comme étant « un ensemble des ressources nécessaires, tant humaines que matérielles, qui permettent de transformer des matières premières en produits finis intégrant aussi les moyens de stockage, et même parfois ceux de distribution » [Dauzère-Pérès, 1992]. D'une manière plus détaillée, [Giard, 2003] fournit une définition tournée vers les entreprises : « La production est une transformation de ressources appartenant à un système productif et conduisant à la création de biens ou de services ». Malgré l'existence de nombreuses définitions d'un système de production, il y a un consensus de la communauté nationale et internationale pour admettre la présence des ressources pouvant intervenir dans le processus production, qui sont généralement [Giard, 2003] :

- des équipements (bâtiments, machines, outillages, etc.) ;
- des hommes (opérateurs intervenant soit directement dans le processus de transformation, soit indirectement pour en permettre le bon déroulement ou même l'existence, ce qui correspond à des activités dites de support) ;
- des matières (matières premières, composants, etc.) ;

- des informations techniques ou procédurales (gammes, nomenclatures, consignes, procédures, etc.) ou relatives à l'état et à l'utilisation du système productif (ce qui permet de programmer la production et de réagir aux perturbations observées).

Pour la suite de ce mémoire, il est considéré que la production d'un bien s'effectue par une succession d'opérations consommant des ressources et transformant les caractéristiques morphologiques de « matières » ou leur localisation.

3.2. Organisation des systèmes de production industriels

Une classification en cinq grands modes d'organisation peut être observée [Nollet et al., 1994] ; [Giard, 2003], et s'avère utile pour mieux cerner les problèmes rencontrés dans la définition des ressources requises et dans leur utilisation :

- Organisation de type « *série unitaire* » : La production de type série unitaire est un cas limité que l'on rencontre rarement dans la pratique, puisqu'il se définit comme étant la mobilisation de toutes les ressources de l'entreprise pour la réalisation d'un projet de production, et ce sur une « assez longue période ». Les exemples classiquement donnés pour illustrer ce cas de figure concernent les travaux publics (construction d'un ouvrage d'art, par exemple) ou la construction navale (construction d'un navire).
- Organisation en « *ateliers spécialisés* » : Un système productif est organisé en ateliers spécialisés lorsque tous les équipements assurant une même fonction technique (par exemple percer ou emboutir) sont réunis en un même lieu ; l'itinéraire emprunté pour la fabrication de deux produits différents n'a aucune raison d'être identique ; dans ce cas, la littérature parle de job shop [Jain and Meeran, 1999]. Lorsque le cheminement est identique pour toutes les commandes utilisant un même groupe de machines, on parle de flow shop [Emmons and Vairaktarakis, 2013] (ou selon le niveau de finesse de la modélisation de flow-shop hybride [Ruiz et al., 2010]) sachant qu'une commande peut ne pas utiliser toutes les machines de ce groupe et que les temps opératoires peuvent varier fortement sur une même machine, ce qui distingue cette structure productive de la ligne de production ou d'assemblage. Ce mode d'organisation est généralement la conséquence d'une production relativement diversifiée de produits finis ou de composants, chacun d'eux faisant l'objet d'une production limitée. Il faut noter que cette structure organisationnelle est prépondérante dans les pays industrialisés si l'on raisonne

par rapport au nombre d'entreprises (et non par rapport à la production). D'une manière générale, la production de prestations de services s'effectue avec ce type d'organisation.

- Organisation en « *ligne de production* » : Un système productif est organisé en ligne de production (ou chaîne de production) lorsque les équipements sont agencés pour permettre à un flux de transiter systématiquement par la même séquence de postes de travail, afin que soit réalisé un ensemble d'opérations de fabrication ou d'assemblage (auquel cas on parle plutôt de ligne d'assemblage ou de chaîne d'assemblage) conduisant à la création d'une gamme de produits manufacturés. On retrouve couramment de telles structures dans la production de masse (l'industrie automobile, par exemple) et plus particulièrement au niveau de l'assemblage final. De tels systèmes se caractérisent par une très bonne utilisation des ressources si la chaîne est équilibrée et par un faible pourcentage de temps perdu en attente pour les produits en fabrication. Initialement, les lignes de production étaient toutes configurées suivant une succession, en ligne droite, de postes de travail (on parle encore de stations de travail), un opérateur pouvant éventuellement intervenir sur plusieurs postes en séquence. Des lignes plus complexes ont ensuite vu le jour, avec la possibilité de parallélisme sur une partie de la ligne et des structures en U permettant à des opérateurs d'intervenir sur des postes de travail non contigus.
- Organisation en « *atelier flexible* » *ou* « *systèmes flexibles de production* » : Les systèmes flexibles de Production (SFP) sont des systèmes de production de biens hautement automatisés et adaptés à la fabrication en petites et moyennes séries de familles de produits variables à variantes (des produits similaires ayant des gammes et des nomenclatures différentes) et ceci à faible coût [Brauner et al., 2005]. Le concept de flexibilité est capital car il est intimement lié au concept d'incertitude qui apparaît aussi bien dans les activités concernant le long terme, comme les prévisions de ventes, que dans des aspects plus opérationnels comme la gestion des pannes ou la mise en place de politiques de maintenance préventive au moyen terme.
- Industries de « *process* » : Une industrie de type process est une industrie dans laquelle les matières premières subissent une transformation chimique en plus d'une transformation physique propre au procédé industriel. Ce mode d'organisation se retrouve dans les industries de transformation de matières premières (sidérurgie, pétrochimie, chimie lourde, certaines industries agro-alimentaires, les industries pharmaceutique, la fabrication des produits dérivés du phosphate…). Ce type

d'organisation se caractérise par un flux important et régulier de matières premières arrivant dans le système productif pour y être transformé en une (ou plusieurs) matières premières « élaborées » [Kallrath, 2002]. Dans ce contexte, nous pouvons par exemple citer la transformation de minerais de fer en tôles, ou de betteraves en sucre en poudre, mais également la fabrication d'engrais.

Conformément aux éléments indiqués précédemment (cf. § 2.2.2), le phosphate réceptionné à partir des sites miniers subit des transformations chimiques tout au long d'une chaîne de procédés continus, pour sa valorisation en produits dérivés : l'acide phosphorique et l'engrais. Ainsi la majorité des sites de production du groupe OCP SA font partie de l'industrie process dont les spécificités sont présentées dans le paragraphe suivant.

3.3. L'industrie de process

Le point principal lors de la définition de cette industrie c'est le type d'installation. Les éléments principaux qui permettent de caractériser le type d'installation sont : *(i)* le type de processus : discontinu, continu ou hybride ; *(ii)* la typologie du système de production, i.e. le nombre de niveaux ; *(iii)* le type d'opérations : de production, de transfert et de stockage.

3.3.1. Les types de processus

Dans l'industrie de process, on peut distinguer les systèmes de production continue et discontinue.

Dans le cas des systèmes de production continue on traite des quantités importantes d'un type de produit ou d'une famille de produits. L'organisation est réalisée en ligne de production, ce qui rend le flux du produit linéaire. Les systèmes produisent un nombre limité de produits, chacun relativement en gros volume et utilisent généralement des équipements spéciaux permettant un flux continu de matières au cours de longues campagnes de production, c'est-à-dire qu'il existe un flux continu de produits d'entrée et de sortie sans dates de début ou de fin clairement définies. Généralement, les installations sont hautement automatisées, par exemple l'industrie pétrolière. On retrouve ce type d'installation dans l'industrie pétrochimique, les cimenteries, etc…

D'autre part, lors de la production discontinue, de petites quantités d'un grand nombre de produits sont de préférence fabriquées à l'aide d'équipements multifonctionnels fonctionnant

en mode discontinu avec une succession de lots de produits différents (batch mode), c'est-à-dire qu'il y a des dates de début et de fin bien définies. La production discontinue par lots implique un nombre entier de lots où un lot est la plus petite quantité à produire, par exemple 1000 kg. Plusieurs lots du même produit qui se succèdent constituent directement une campagne. La production peut être soumise à certaines contraintes, par exemple, les campagnes sont constituées d'un nombre discret de lots, dans lesquels une longueur de campagne minimale (ou quantité de production) doit être respectée. Dans un horizon de planification déterminé, un certain produit peut être fabriqué en plusieurs campagnes.

Les deux principales différences entre les deux types de processus de production (continu et discret) sont, d'une part, la nature des restrictions de capacité et des délais de traitement et de l'autre, la manière dont ces processus affectent les niveaux de stock [Harjunkoski et al., 2014]. Dans le cadre de la production discontinue ou par lots, la capacité est essentiellement liée à la quantité de matière traitée (kg), c'est-à-dire qu'elle affecte le nombre et la taille des lots. Les délais de traitement peuvent être fixes ou dépendent de la taille du lot. Ainsi, la planification d'une production par lots implique plusieurs lots avec des temps de traitement spécifiés.

Au contraire, lors de la production continue, les contraintes de capacité en traitement continu se rapportent aux vitesses de traitement (kg/h) et les temps de traitement ne sont généralement pas limités. Cela implique que les contraintes de capacité n'affectent pas le nombre de lots ; c'est-à-dire qu'une quantité demandée peut être satisfaite en exécutant un seul lot de quantité importante (une longue campagne) ou en plusieurs petits lots ou en plusieurs quantités entre les deux.

En termes de stock, les processus par lots entraînent des modifications à des moments précis, ou alors pendant des intervalles de temps (accumulation et consommation) par rapport au début du processus. Les processus continus, quant à eux, entraînent une consommation et une accumulation des stocks tout au long de l'exécution du processus (Figure 1. 10). Soit un processus qui transforme le produit A en produit B. La Figure 1.10.1 et la Figure 1.10.2 présentent l'évolution des quantités des produits A, B et l'encours de production lors des productions discontinues et continuse. Dans le cas de la production process discontinu par lot, le moyen de production consomme au début du processus une quantité du produit A qu'il va transformer en produit B pendant une durée déterminée et ensuite le transférer vers le stock. En

revanche, lors de la production process continue, la consommation du produit A, sa transformation en produit B et son accumulation se font en continu avec un débit donné.

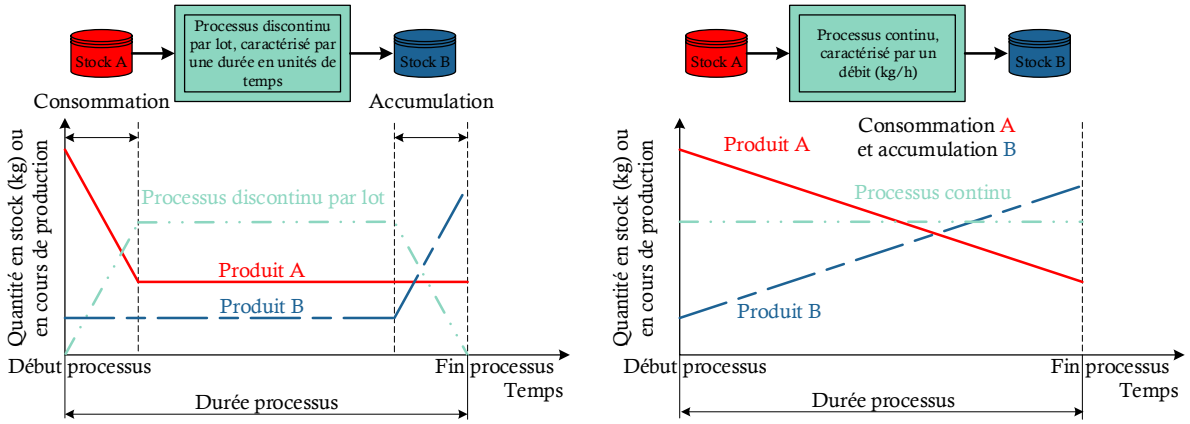


Figure 1.10. 1- Processus discontinu par lot Figure 1.10. 2- Processus continu

Figure 1. 10- L'évolution du stock lors de production discontinu par lot par oposition à la production continue (addaptée à partir de [Harjunkoski et al., 2014])

Cette différence donne lieu à différentes approches de modélisation. Enfin, il est important de noter que ces systèmes de production impliquent souvent une variété d'autres types d'opérations (par exemple, des opérations semi-batch, des transferts de matières…).

Il existe également une production process hybride qui combine les caractéristiques des deux comme le montre la Figure 1. 11. Soit un enchaînement des processus discontinus et continus produisant à partir de A les produits B et C. Ce dernier est consommé par d'autres processus. Le premier processus α discontinu par lot produit différentes entités. Pour des raisons de clarté, ils ne sont pas représentés sur la figure. Pour satisfaire les besoins du processus continu β qui consomme le produit B, le processus α produit des lots à des intervalles réguliers qui permettent d'assurer la continuité du processus continu. Entre deux lots, le processus α fabrique un des autres produits.

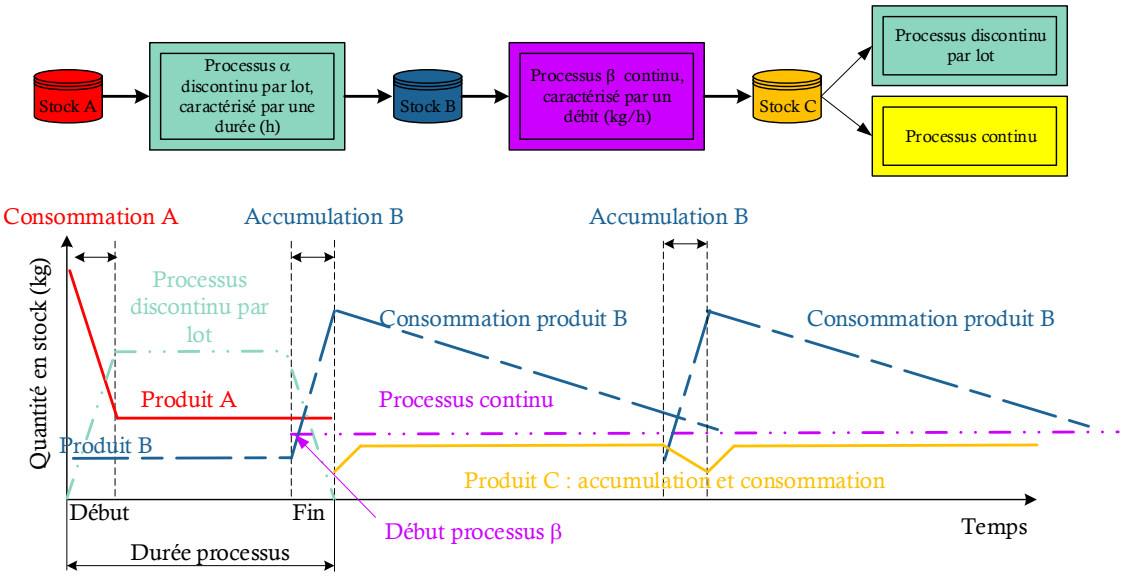


Figure 1. 11- Evolution des stocks lors de la production process hybride

3.3.2. Les topologies des systèmes de production dans l'industrie process

Les systèmes de production dans l'industrie process ont des topologies différentes en fonction du cœur de métier des entreprises et des procédés utilisés pour obtenir le produit final. Cependant, le nombre de topologies classiques référencées dans la littérature est plus restreint que les systèmes de production qu'ils représentent car ils se veulent génériques, dans le but d'être représentatifs du plus grand nombre d'environnements de production, bien qu'ils représentent des simplifications de ces derniers. D'après les informations disponibles dans la littérature [Kallrath, 2002] ; [Méndez et al., 2006] ; [Harjunkoski et al., 2014], deux types de topologies existent à savoir : topologie en réseau et topologie séquentielle, présentées par la suite.

La distinction entre les topologies en réseau et séquentielle est importante car en fonction de la topologie, les approches de modélisation sont différentes. La plupart des méthodes développées pour résoudre les problèmes dans les topologies séquentielles sont basées sur la modélisation d'un lot, tandis que les méthodes pour les topologies en réseau se fondent sur l'équilibre des stocks et la conservation des flux sur les différents nœuds du réseau. Les premières incluent généralement uniquement les décisions d'affectation et de séquencement, tandis que les dernières incluent les décisions de la taille des campagnes (lots), d'affectation et de séquencement [Harjunkoski et al., 2014].

3.3.2.1. Topologie en réseau

Il s'agit d'un environnement multifonctionnel (polyvalent) multi produits dans lequel les produits suivent des traitements selon différentes gammes. Cette topologie est utilisée lors de la fabrication simultanée de plusieurs produits intermédiaires qui entrent dans la production d'autres produits finaux. Ainsi, plusieurs lots peuvent être mélangés en entrée d'un processus et un lot peut être consommé par plusieurs processus. À titre d'exemple, une telle topologie est présentée sur la Figure 1. 12. Il s'agit d'un ensemble de processus impliquant la fusion/division de matières/lots et le recyclage qui ont été largement étudiés dans la littérature [Kondili et al., 1993] ;[Floudas and Lin, 2004] ; [Méndez et al., 2006]. Ainsi, comme le montre la Figure 1.12, le produit intermédiaire BC est obtenu à partir de B (50%) et C (50%). Le processus $\alpha\beta$, qui a en entré 40% du A et 60% du BC, permet d'obtenir 40% du produit fini 1 et 60% du produit ABC qui est ensuite utilisé par le processus γ et ainsi de suite. Ce type de topologies peut être rencontré dans l'industrie pharmaceutique [Kondili et al., 1993], dans la fabrication des polymères et des matières plastiques [Méndez et al., 2006].

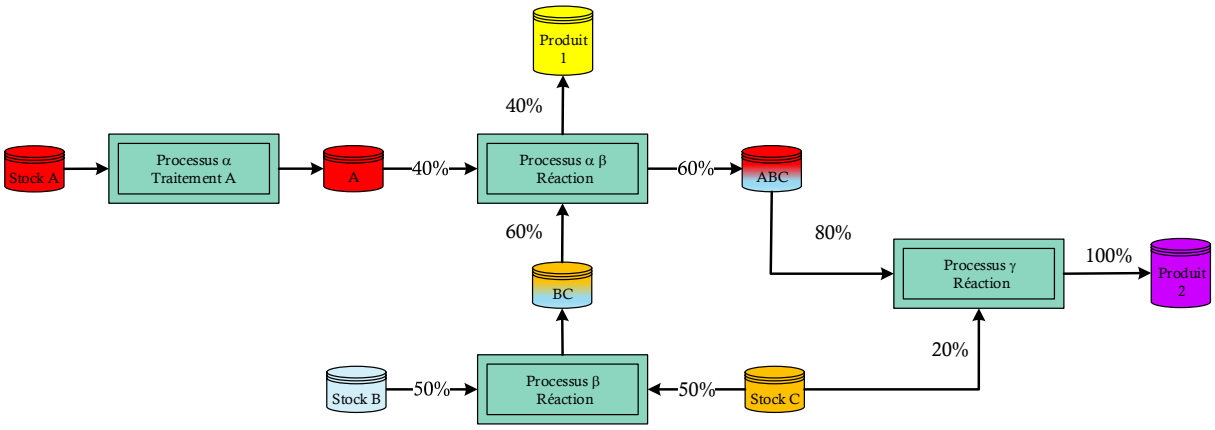


Figure 1. 12- Topologie en réseau dans l'industrie process (adapté à partir de [Méndez et al., 2006])

3.3.2.2. Topologie séquentielle

Il s'agit d'un environnement multi produits dans lequel les produits suivent les mêmes types de traitements et des recettes (gammes) similaires. En pratique beaucoup de processus dans l'industrie process sont séquentiels avec une ou plusieurs étapes où une ou plusieurs ressources[10] (machine, ligne de production…) peuvent fonctionner en parallèle. Chaque lot de

[10]Nous utilisons par la suite le terme générique « ressource » qui permet de représenter en fonction du but de l'étude et du dégrée de finesse de la modélisation une entité qui transforme fonctionnellement une matière. Ainsi, une ressource permet de modéliser une machine, une ligne de production, un atelier voir une usine.

production est traité en entier et garde son identité jusqu'à la fin des procédés de fabrication. Le lot ne peut pas être fractionné en plusieurs lots, et plusieurs lots ne peuvent pas être unifiés pour créer un nouveau lot. Les systèmes de production dans l'industrie process avec une telle topologie sont similaires à ceux de l'industrie mécanique discontinue, où des pièces (des lots de pièces) isolés passent à travers différents postes du processus de fabrication. Ce type de topologies peuvent, en fonction du nombre d'étapes (étages), se décomposer en deux sous-ensembles [Méndez et al., 2006]. En considérant la littérature de l'ordonnancement [Pinedo, 2012] à chaque sous-ensemble, il est possible d'associer plusieurs problèmes théoriques de l'ordonnancement à un modèle théorique d'atelier. Ainsi on obtient la classification suivante :

- *Une seule étape* (Figure 1. 13) : Chaque produit ne subit qu'un seul traitement sur une des différentes ressources de production. Dans le cas d'une seule ressource, il s'agit du problème à une machine [Graham et al., 1979] ; [Blazewicz et al., 2019] : le traitement consiste à visiter l'unique machine durant un temps prédéterminé et/ou dépendant du débit de la machine (Figure 1.13.1). Les environnements de production complexes sont souvent décomposés en problèmes à une machine [Pinedo, 2012]. En revanche, s'il existe plusieurs ressources, il s'agit du problème à machines parallèles [Cheng et Sin, 1990] avec des ressources identiques et/ou différentes (Figure 1.13.2).

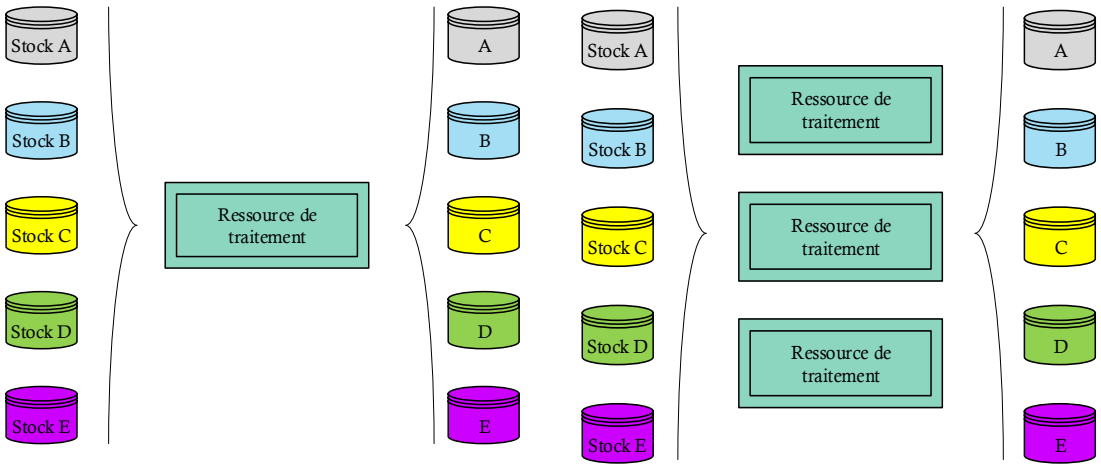


Figure 1.13.1- Une seule ressource (problème à une machine)

Figure 1.13.2- Plusieurs ressources (problèmes à machinnes paralèles)

Figure 1. 13- Topologie séquencielle à une seule étape

- *Plusieurs étapes* : Les produits subissent plusieurs traitements réalisés sur différentes ressources. On peut distinguer deux sous-ensembles de topologies en fonction de la spécialisation des ressources et de la définition des gammes :

(i) Dans le cas des ressources dédiées à un type de traitement et les gammes sont similaires, les ressources sont organisées par étape (étage) (Figure 1. 14). Le terme pour désigner ce type de topologie, accepté par la communauté internationale est « *topologie séquentielle à plusieurs étapes multi produits* » [Kallrath, 2002] ; [Méndez et al., 2006] ; [Harjunkoski et al., 2014]. S'il existe une seule ressource par étape on parle de Flow-Shop [Emmons and Vairaktarakis, 2013] (Figure 1.14.1). Tous les produits possèdent des gammes similaires qui consistent à visiter toutes les étapes dans un ordre donné. Le problème à une machine est un cas particulier du problème de Flow-Shop. S'il existe plusieurs ressources par étape, les problèmes théoriques d'ordonnancement rattachés sont : le problème de Flow-shop Flexible [Brah, and Hunsucker, 1991] et le problème de Flow-Shop Hybride [Linn and Zhang, 1999] (Figure 1.14.2), où chaque traitement d'un produit peut être traité par un ensemble de ressources regroupées en étapes (étages). Les ressources sont identiques dans le cadre du Flow-shop Flexible, alors qu'elles peuvent être différentes pour le Flow-shop Hybride. Les problèmes à machines parallèles sont des cas particuliers des problèmes de Flow-Shop Flexible/Hybride.

(ii) Dans le cas des ressources polyvalentes, plusieurs étapes de traitements et des gammes différentes, les ressources sont organisées en plusieurs lignes et colonnes (Figure 1.15). On parle donc d'une « *topologie séquentielle à plusieurs étapes polyvalentes multi produits* ». Dans ce type de systèmes de production process, les ressources polyvalentes conviennent pour effectuer différents traitements. Les produits passent par des séquences de traitements variées (gammes) et pour chaque étape, le nombre de ressources capables de réaliser le traitement peut être distinct. Si pour chaque produit toutes les étapes ne sont composées que d'une seule ressource, on parle de « Job-Shop » [Jain and Meeran, 1999] ; [Cheng et al., 2016] (Figure 1.15.1). S'il existe plusieurs ressources par étape, le problème théorique d'ordonnancement peut être rattaché au problème du « Job-Shop Flexible » [Brucker and Schlie, 1990] ; [Kemmoe et al., 2017] (Figure 1.15.2). Contrairement au problème de Job-shop, chaque traitement peut être effectué par une ressource issue d'un ensemble de ressources compatibles.

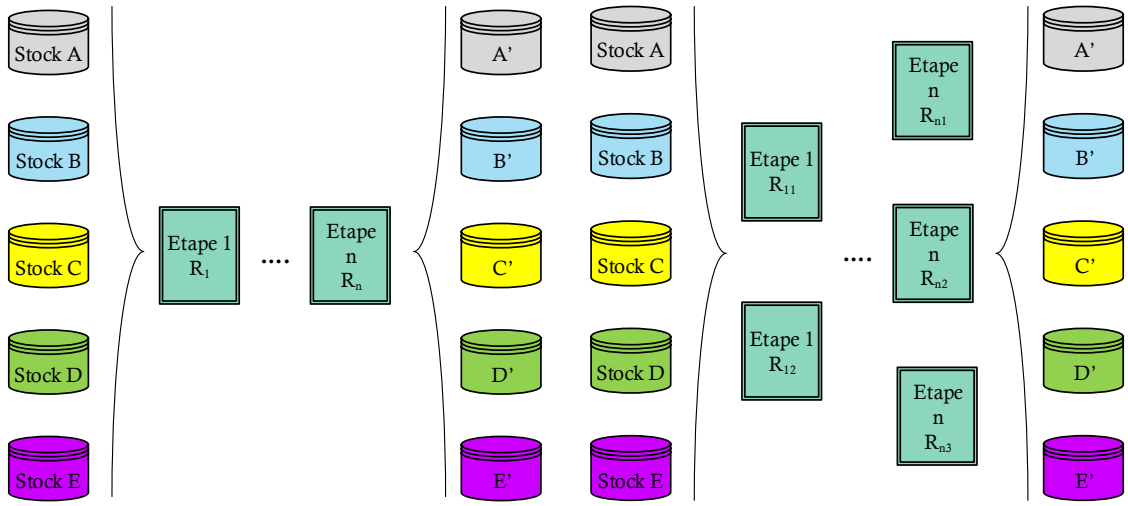


Figure 1.14.1- Une seule ressource par étape (Flow-Shop)

Figure 1.14.2- Plusieurs ressources par étape (Flow-Shop Flxible/Hybride)

Figure 1. 14- Topologie séquencielle à plusieurs étapes multi produits

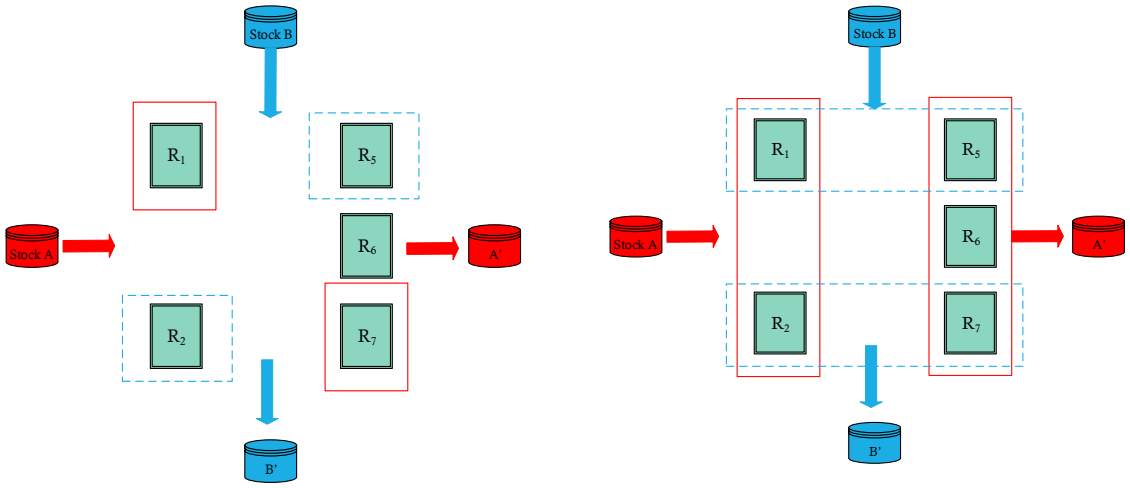


Figure 1.15.1- Une seule ressource par étape (Job-Shop)

Figure 1.15.2- Plusieurs ressource par étape (Job-Shop Flexible)

Figure 1. 15- Topologie séquentielle à plusieurs étapes polyvalentes multi produits

La Figure 1.16 présente une synthèse des différentes topologies rencontrées dans l'industrie process et les modèles théoriques issus de l'ordonnancement. Lors de l'analyse de la littérature, il a émergé que les topologies en réseau ne peuvent pas être associées à un modèle théorique d'atelier connu dans l'ordonnancement contrairement aux topologies séquentielles.

Il est important de noter, que cette classification est difficilement utilisable pour décrire en entier un site de production tel qu'une usine ou un complexe comprenant plusieurs entités. Un site de production ne doit pas nécessairement posséder une topologie séquentielle ou en réseau. En réalité, la plupart des sites de production comprennent des étapes de traitement dans lesquelles l'intégrité du lot doit être préservée (par exemple, la fabrication d'ingrédients actifs

pharmaceutiques) et des étapes dans lesquelles le mélange est autorisé (par exemple, la fabrication de comprimés). Ainsi, la classification est plus pertinente pour des opérations spécifiques ou des sous-systèmes de traitement, plutôt que pour des installations complètes. D'autre part, c'est la présence de restrictions en matière de manutention et de stockage, plutôt que de la structure de l'installation, qui détermine le type de topologie de l'environnement de production [Harjunkoski et al., 2014].

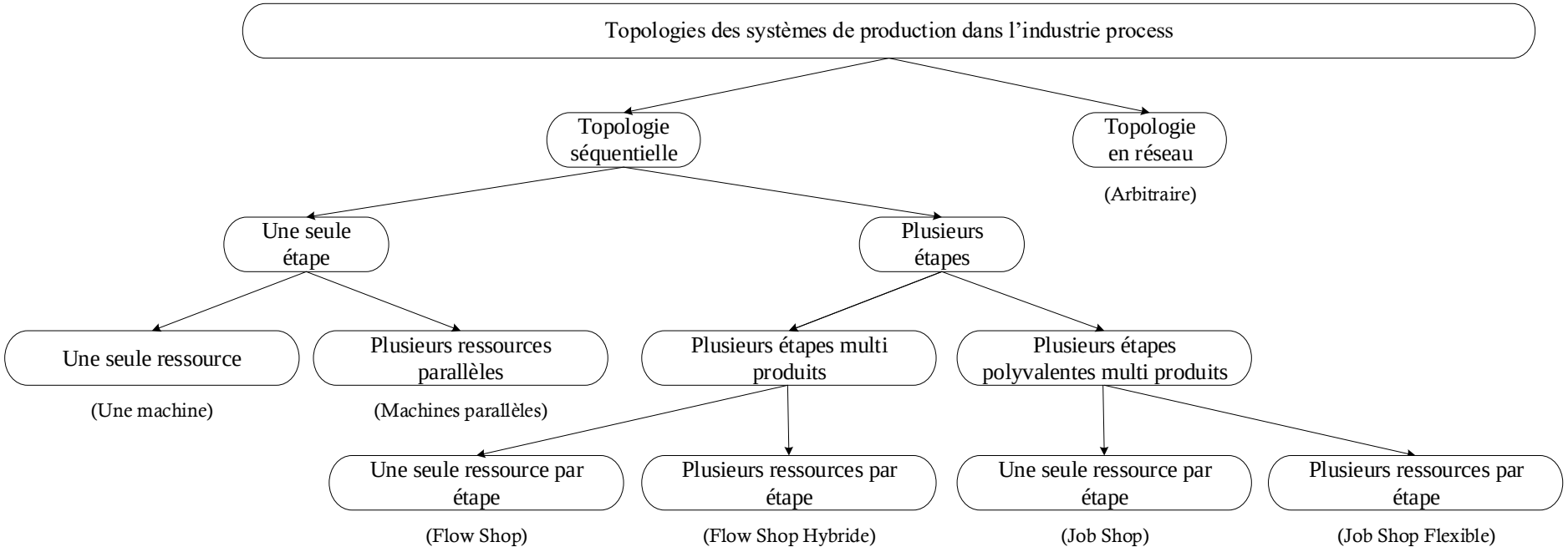


Figure 1. 16- Classification des topologies des systèmes de production dans l'industrie process (adapté à partir de [Méndez et al., 2006])

3.3.3. Les types d'opérations

La définition des différentes topologies présentée dans les paragraphes antérieurs a été construite en considérant les ressources qui réalisent les traitements fonctionnels des matières. Cependant, dans ces types de systèmes existent également des opérations de stockage et de transfert des matières entre les ressources de production et de stockage. Souvent les opérations de transfert (transport/manutention) et de stockage représentent un nombre beaucoup plus important que celui des opérations de fabrication. Les ressources utilisées pour la réalisation de ces opérations de transport/manutention et de stockage imposent souvent des contraintes difficiles à prendre en compte lors de la planification et l'ordonnancement de ces systèmes [Sundaramoorthy and Maravelias, 2008]. La prise en compte des contraintes de stockage est l'une des principales différences entre la planification de la fabrication discrète et celle de la production continue dans l'industrie process. Il existe deux types de contraintes de stockage : (*i*) des contraintes sur la durée pendant laquelle une matière peut être stockée (dans une unité de traitement ou une ressource de stockage), et (*ii*) des contraintes de capacité de stockage (nombre et taille des ressources de stockage) [Harjunkoski et al., 2014].

Le stockage est souvent réalisé en même temps que les activités de transfert des matières. Par exemple, dans de nombreuses installations (par exemple, des opérations métallurgiques), le transfert des matières est fortement contraint car il nécessite des ressources partagées telles que des grues et des portiques. De plus, les activités de transfert des matières sont souvent les principales activités à planifier. Enfin, les activités de transfert des matières avec des ressources limitées se traduisent souvent par une connectivité limitée entre les unités de traitement et par le nombre limité de ressources de stockage auxquelles une unité peut être connectée simultanément. Ils peuvent également exiger que les opérations de stockage et de déstockage des matières soient considérées comme des activités distinctes.

Lors de l'analyse des contraintes de stockage dans les topologies en réseau, une hypothèse importante est que plusieurs lots du même produit chimique (état) peuvent être mélangés dans la même ressource de stockage. Par conséquent, le stockage de chaque état peut être modélisé à l'aide d'une seule ressource. Cela implique également qu'il est possible d'appliquer facilement une contrainte de stockage pour un état dans une topologie en réseau : il suffit simplement d'exprimer des contraintes de stockage pour la seule ressource de stockage utilisée pour l'état en question (cf. la Figure 1. 12).

Le traitement du stockage dans des processus à plusieurs étapes est fondamentalement différent, car différents lots du même produit ne peuvent pas être mélangés. Ainsi, le nombre de ressources requis pour stocker les lots peut, en principe, être égal au nombre de lots, ce qui est une décision qui simplifie le problème de stockage, et non au nombre (déterminé) de produits chimiques (états) comme dans les topologies en réseau. Cela implique que la politique de stockage dans les processus à plusieurs étapes est déterminée non seulement par la taille des ressources de stockage, mais également par leur nombre relatif par rapport au nombre de lots. Si suffisamment de ressources d'une capacité suffisante sont disponibles, il est alors possible de supposer qu'il existe une capacité de stockage illimitée; sinon, la capacité de stockage est limitée et les contraintes de stockage deviennent importantes. Un autre aspect, souvent négligé, est la durée pendant laquelle un lot peut être stocké dans une ressource de stockage, c'est-à-dire la durée de stockage. La durée de stockage est importante dans les industries, telles que celles des produits alimentaires et pharmaceutiques, qui impliquent des produits intermédiaires avec une durée de vie limitée et des dates de préemption. D'autre part, le temps qu'un lot peut attendre dans une unité de traitement après son achèvement (par la suite appelé temps d'attente) devient également très important en présence de capacité limitée et des contraintes de stockage. En effet, l'attente dans une unité de traitement peut être utilisée à la place du stockage réel dans une ressource de stockage si la prochaine étape de traitement est un embouteillage et qu'il n'y a pas assez de ressources. Cependant, cette unité de traitement est bloquée et son taux d'utilisation est faible. En synthèse, pour prendre en compte de manière rigoureuse le stockage dans des topologies à plusieurs étapes, il est nécessaire de considérer les contraintes de capacité et de temps de toutes les ressources de traitement et de stockage. Les premiers dépendent à la fois du nombre et de la taille des ressources de stockage, tandis que les derniers dépendent des temps de stockage et d'attente (blocage). Il est important de souligner que le terme « *capacité* » est utilisé pour décrire une caractéristique de l'ensemble de la topologie et le terme « *taille* » pour décrire la capacité d'une ressource de stockage individuel. Le terme temps d'attente (blocage) est également utilisé pour décrire la durée pendant laquelle un lot est en attente dans une unité de traitement, tandis le terme « *durée* » de stockage est le temps passé dans une ressource de stockage. La Figure 1.17 synthétise les contraintes liées au stockage à considérer lors de la modélisation des topologies séquentielles à plusieurs étapes.

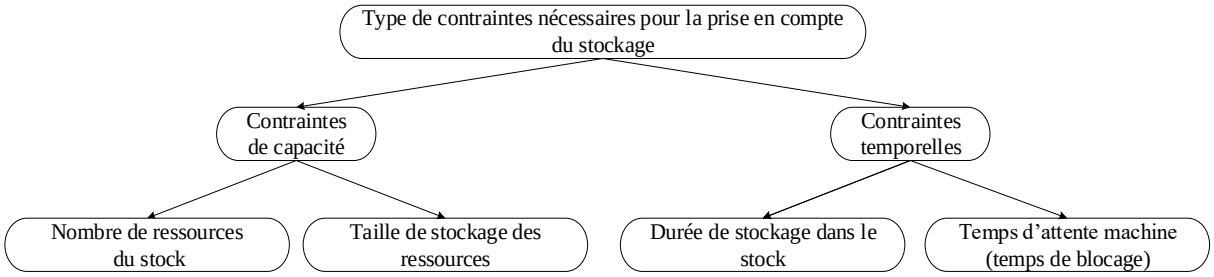


Figure 1. 17- Type de contraintes à prendre en compte dans les topologies à plusieurs étapes (adapté à partir de [Sundaramoorthy and Maravelias, 2008])

Cette partie a mis en évidence les principales spécificités des systèmes de production dans l'industrie process et a montré leur complexité. En vue de ces éléments, les différents processus de pilotage ont acquis une importance considérable, comme c'est le cas du processus de planification, qui fait l'objet de la partie suivante.

4. La prise de décisions lors de la planification : un processus hiérarchisé

Afin d'assurer une bonne gestion de ses activités et de satisfaire les objectifs industriels, tout système se doit de mettre en œuvre un processus décisionnel adéquat et clairement établi. Ceci est également le cas des systèmes de l'industrie process au sein desquelles est réalisée, notamment, la planification.

4.1. Définition de la planification

La planification, consiste à définir les grandes décisions [Anthony, 1965], généralement sur le long et le moyen terme, et l'ordonnancement consiste à placer les tâches de telle sorte que les contraintes de capacité, de disponibilité de ressources, etc…, soient satisfaites [Carlier et Chrétienne, 1988]. L'ordonnancement doit respecter les objectifs fixés par la planification. Cependant, par abus de langage, le terme « *planification* » est utilisé de manière aisée au niveau opérationnel lorsqu'en plus de l'ordonnancement, il s'agit de fournir l'affectation de chacune des ressources utilisées par les produits.

Néanmoins, comme le souligne [Larabi, 2010] il est précieux de mettre une frontière clairement définie entre planification et ordonnancement comme le montre la Figure 1.18. C'est une tâche périlleuse à laquelle nous ne souhaitons pas nous livrer. Toutefois, on peut constater que lors de la planification, on cherche à améliorer l'efficacité, i.e. maximiser le degré d'attente des objectifs visés, et que lors de l'ordonnancement, on cherche à améliorer l'efficience, i.e.

minimiser les ressources utilisées pour réaliser ces objectifs comme le montre la Figure 1.19. Cependant, il est possible, en fonction de l'horizon temporel auquel on s'intéresse et du niveau de finesse de la modélisation du système en cours d'étude et celle des données liées à la charge du système, d'utiliser des méthodes issues de l'ordonnancement pour résoudre des problèmes de planification [Harjunkoski et al., 2014].

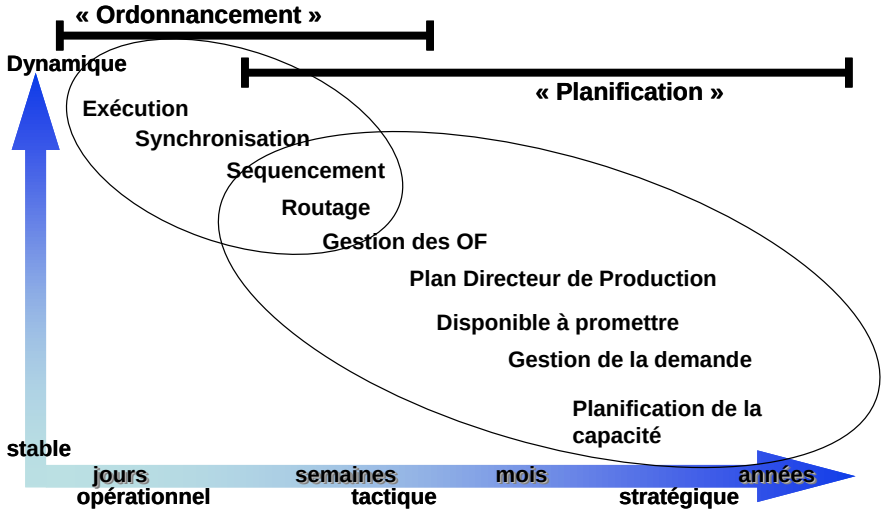


Figure 1. 18- Zone commune entre la planification et ordonnancement [Larabi, 2010])

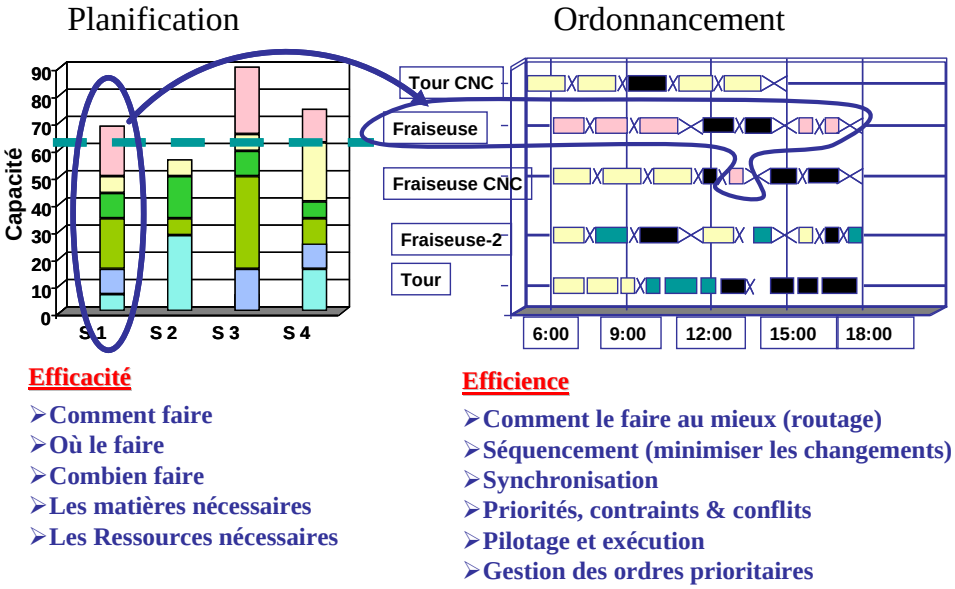


Figure 1. 19- Objectifs de la planification et de l'ordonnancement [Larabi, 2010].

Dans les documents de son référentiel qualité [Soler, 2001], le CNRS propose également une définition intéressante de la planification selon laquelle elle représente un outil incontournable pour le management de projet, dont les indications sont aisément transposables à notre domaine d'activité. « La planification est un outil de prise de décisions pour le chef de

projets, mais aussi de communication entre les différents acteurs d'un projet. Elle permet alors de maîtriser les interfaces du projet. Planifier optimise ainsi les chances de réussite d'un projet en améliorant la productivité grâce à une meilleure maîtrise de la qualité. ». Cette planification permet de :

- définir les travaux à réaliser ;
- fixer les objectifs ;
- coordonner les actions ;
- maîtriser les moyens ;
- diminuer les risques ;
- suivre les actions en cours ;

[Vollman et al., 1992] proposent une définition plus adaptée au secteur industriel : « Planifier la production c'est prendre à temps toutes les dispositions pour que les ventes puissent être satisfaites avec les quantités requises, dans les délais promis, au moindre coût. Ces trois objectifs ne peuvent pas être atteints simultanément. Les décisions de planification résultent toujours d'un arbitrage entre la qualité du service client, les risques sur les stocks et les coûts de production ». Cette vision est également partagée par [Pochet, 2001], la planification de la production est liée à la gestion des ressources productives nécessaires à la transformation des matières premières en produits finaux pour satisfaire les clients de la manière la plus efficace. Dans le même esprit, [Ackoff, 1971] résume la planification comme « consistant à concevoir un futur désiré et les moyens d'y parvenir ».

Ces définitions font intervenir de manière explicite la notion de moyens et d'objectifs. Il y apparaît également la notion de maîtrise des risques. Derrière le terme « planifier » se distinguent donc implicitement au minimum les termes prévoir, maîtriser, gérer. Quelle que soit l'entreprise considérée, elle utilise d'une manière ou d'une autre la planification. Nous souhaitons insister sur le fait que le problème de planification auquel nous nous intéressons, formalisé à la fin de cette partie, peut être issu de bon nombre d'entreprises venant de tous secteurs d'activité.

Nous avons vu que planifier la production consiste à prendre à temps toutes les dispositions pour que les ventes puissent être satisfaites avec les quantités requises, dans les

délais promis, au moindre coût, et ce, en faisant des compromis entre la qualité du service client, les risques sur les stocks et les coûts de production.

Dès 1965, Anthony et d'autres auteurs ([Anthony, 1965] ; [Fleischmann et al., 2002]; [Bertrand, 2003]; [Manzani et Gamberini, 2008]) ont distingué trois sous-processus décisionnels de planification de la production selon la longueur de l'horizon de planification : le long terme (planification stratégique), le moyen terme (planification tactique) et le court terme (planification opérationnelle) :

(i) Au niveau stratégique : les décisions prises se traduisent par une formulation à long terme de la politique de l'entreprise (i.e. pour des horizons allant de 5 à 10 ans) dont l'impact sur le système considéré se mesure sur de nombreuses années ([[Simchi-Levi et al., 2004]] ; [Pochet, 2001]. Ces décisions concernent notamment la mise au point des installations de production (par exemple, la taille et l'emplacement de nouvelles usines, l'acquisition de nouveaux équipements, l'organisation des processus de fabrication, le développement d'un nouveau produit ou d'une nouvelle gamme de production…), le dimensionnement capacitaire ainsi que le dimensionnement des ressources [Martínez-Costa et al., 2014]. Dans la partie distribution, la localisation des entrepôts ou les points de transbordement doivent être déterminés. Il s'agit des décisions stratégiques pour satisfaire la demande.

(ii) Au niveau tactique : Les décisions tactiques concernent l'organisation des produits et des ressources en fonction des prévisions commerciales [Díaz-Madroñero et al., 2014]. Elles consistent à prévoir les moyens à mettre en œuvre pour atteindre les objectifs fixés par la planification stratégique, afin de piloter les activités à moyen terme (i.e. pour des horizons allant de 6 à 18 mois, décisions tactiques pour satisfaire le client et améliorer l'efficacité en termes de trésorerie). A ce niveau on retrouve notamment la planification de la production qui vise à calculer un plan de production qui répond aux demandes au moindre coût. Ces décisions tactiques sont des directives pour la production détaillée et la planification au niveau opérationnel. Il s'agit des décisions tactiques pour satisfaire le client.

(iii) Au niveau opérationnel : les décisions opérationnelles consistent à gérer le fonctionnement quotidien des ateliers de fabrication suivant un processus court

terme (1-3 mois) afin d'ordonnancer les activités quotidiennes de production et de distribution [Pinedo, 2012]. Il s'agit donc d'un niveau de planification décentralisée qui détermine l'ordre dans lequel chaque activité doit être réalisée dans le cadre de décisions fixées au niveau tactique [Genin et al., 2001]. A ce niveau, ces décisions concernent les volumes de production et les dates de passage des produits, l'utilisation détaillée des capacités, etc. [Giard, 2003] inclut dans le cadre des décisions opérationnelles les décisions liées au suivi de la production en temps réel. Ces décisions concernent le contrôle et le suivi des éléments du système de production autonomes tels que des magasins automatiques, des machines-outils à commande numériques etc. Il synchronise les ordres de fabrication avec la disponibilité des ressources. Il s'agit des décisions opérationnelles pour satisfaire le produit.

Ces trois niveaux de planification diffèrent principalement par le moment où les décisions auront un impact sur le développement futur de l'entreprise. Selon cette catégorisation et l'horizon de la planification, les tâches de planification sont généralement assignées à l'un des trois niveaux de planification : le long terme, le moyen terme ou le court terme. L'objectif des décisions de planification est de construire et ensuite d'optimiser les différents plans sur les trois différents horizons. Chaque niveau décisionnel est caractérisé par un horizon de temps, un niveau de détail des informations traitées, et des modèles et méthodes de résolution propres à son niveau. Plus le niveau de décisions est élevé, plus les modèles associés sont agrégés et l'horizon de temps est long. Le niveau d'agrégation représente le niveau de détail des décisions prises quant aux productions à exécuter et aux moyens à mettre en œuvre.

À titre d'exemple, les décisions prises au niveau stratégique à la maille mensuelle et à la maille famille de produits seront revues dans le cadre tactique. Tout d'abord, elles seront alors désagrégées à la maille produit fini et à la maille semaine et éventuellement modifiées en fonction des prévisions tactiques et données du marché. Il existe donc une notion de hiérarchisation des différents processus de planification correspondant aussi bien à un aspect temporel que décisionnel. Cet aspect est mis en évidence par la Figure 1.20 (adaptée à partir de [Fleischmann et al., 2002] ; [Meyr et al., 2002] ; [Gruat La Forme-Chretien, 2007]). Celle-ci reprend les principales décisions relatives aux différents horizons de planification tout en les hiérarchisant selon le type d'activités du système de production de bien considéré (approvisionnement, production, distribution et vente). Les décisions stratégiques liées à la

production concernent principalement la réalisation du Plan Industriel et Commercial (PIC). Celui-ci peut être défini comme un processus permettant de déterminer les quantités globales par famille de produits à fabriquer, à partir des capacités financières de l'entreprise et d'investissement, de la demande du marché, des objectifs de vente de l'entreprise, des niveaux de stocks souhaités et des capacités de production [Vollman et al., 1992]. Le processus PIC élabore la stratégie de ventes et de production qui réalise au mieux cet arbitrage, pour des familles de produits agrégées.

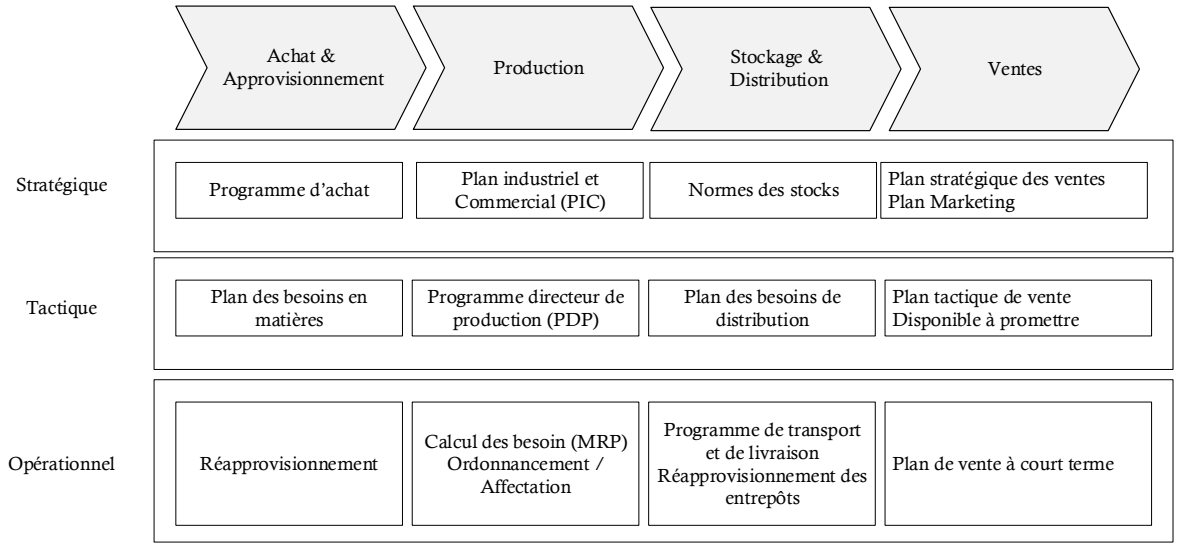


Figure 1. 20- Matrice de décisions lors de la planification d'un système de production de bien[12]

Ce PIC est ensuite désagrégé, au niveau tactique, en un Plan Directeur de Production (PDP) à la maille produit. Le PDP concrétise la stratégie de planification choisie : production synchrone avec les ventes sans stock ou production nivelée avec stock …, et il constitue une sorte de mise en œuvre du PIC. Le PDP représente la première étape de validation des éléments décidés au niveau stratégique. Il joue un rôle fondamental dans le fonctionnement d'un système intégré de planification et de contrôle de la production et des stocks, en se plaçant comme le lieu où s'établit, à chaque période, l'équilibre entre ressources de l'entreprise et demande à satisfaire. L'objectif premier du PDP est le service : livrer les commandes à temps, dans un délai concurrentiel. Le deuxième objectif est l'utilisation optimale des ressources, soit la possession minimale d'un stock d'une part, et des conditions de fonctionnement favorisant l'efficience du système opérationnel et des achats d'autre part. Ainsi, le PDP permet de résoudre des tensions engendrées par les perturbations susceptibles de survenir, tels les retards d'approvisionnements, de production, ou dans son environnement, telles les modifications de

[12] Les décisions concernant la conception des systèmes complexes de production ne sont pas mises en évidence compte tenu du fait qu'elles ne font pas l'objet des travaux de recherche présentés dans ce manuscrit.

la demande. Notons, que la réalisation du PDP s'appuie également sur d'autres décisions prises au niveau stratégique telles que la définition des normes de stocks ou encore l'affectation des ressources aux sites de production. Les décisions prise lors du processus tactique sont ensuite utilisées au niveau opérationnel afin de déterminer les quantités exactes de chaque composant et semi-fini à acheter ou produire et, ceci, selon une démarche de type MRP (Material Requirement Planning). Cette approche consiste à partir des quantités de chaque produit fini à fabriquer, des nomenclatures associées ainsi que de l'état des stocks à définir exactement le nombre de chaque composant à produire ou acheter. Cette phase opérationnelle est également complétée de la réalisation d'un ordonnancement des tâches correspondantes sur les différentes machines au sein des ateliers.

Les approches hiérarchiques des problèmes de planification permettent de résoudre la planification du niveau supérieur puis celle du niveau inférieur, mais avec la possibilité de faire des itérations dans la résolution de ces planifications. Ainsi, après la résolution du modèle du niveau inférieur avec la prise en compte des résultats du niveau supérieur, la planification du niveau supérieur est de nouveau résolue en prenant en compte, cette fois-ci, les résultats du niveau inférieur. Ces approches hiérarchiques supposent aussi que la performance générée par la planification d'un niveau inférieur est limitée par les limites de performance du niveau supérieur. Le rôle des planifications tactique et opérationnelle est donc d'assurer une performance maximale dans le cadre défini précédemment. A titre d'exemple, la performance d'une chaîne logistique sur un horizon moyen terme dépend donc en grande partie de la planification tactique [Van Landeghem et Vanmaele, 2002]. En effet, le nombre de variables d'action et la liberté quant à leur détermination font de la planification tactique un maillon essentiel de la performance de la chaîne logistique.

Les plans correspondant à ces trois horizons de planification sont détaillés dans les paragraphes suivants.

4.2. Le PIC dans le cadre de la planification stratégique

Le PIC permet la réalisation des objectifs stratégiques établis par l'industriel lors du Plan d'Entreprise (PE). Il assure la liaison entre la planification des ventes et la production, et permet également de fournir un cadre d'obtention des différents Plans Directeurs de Production (PDP). Cette étape permet de répondre aux questions importantes comme « est-il possible de résorber les fluctuations de la demande avec une stratégie de planification de la production synchrone

en variant la capacité main d'œuvre ? » ou encore « est-il préférable d'utiliser une stratégie de planification nivelée de la production, de stocker des produits finis, d'avoir recours à la sous-traitance ou encore de combiner ces deux moyens avec d'autres pour répondre à la demande ? » [Nollet et al., 1994]. Sa préparation suppose que la stratégie et la politique de l'entreprise sont fixées et connues. Le choix de l'horizon de planification est une décision déterminante pour les opérations de l'entreprise : on considère les ressources de production comme fixes et le levier d'action devient le taux d'utilisation des ressources. Cet horizon peut donc différer selon l'entreprise, en fonction de sa gestion de la demande et des technologies de production.

Dans la mesure où les systèmes industriels ne sont pas assez flexibles pour suivre l'évolution des ventes au jour le jour, le PIC fournit un outil de décision et d'arbitrage sur les compromis à réaliser. Il répond essentiellement à la question suivante : « Comment les capacités du système de production peuvent suivre les fluctuations du volume des ventes ? ». Ce sont les capacités budgétaires qui vont orienter la politique du PIC. Le PIC sert à déterminer les quantités globales par familles de produits à fabriquer, et ce à partir : des capacités financières et d'investissement, de la demande du marché, des objectifs de vente de l'entreprise, des niveaux de stock souhaités et des capacités de production. Ainsi, le PIC permet de trouver un consensus entre la stratégie financière, la stratégie commerciale et la stratégie de gestions des opérations comme le montre la Figure 1.21. L'élaboration du PIC impose de trouver le meilleur compromis entre des objectifs parfois contradictoires :

- l'objectif commercial - disposer rapidement de produits, nécessite une production très flexible, et demande une production en petites séries ;
- l'objectif financier - diminuer les stocks de matières premières, des composants, des sous-ensembles et des produits finis - suppose de standardiser le plus possible les produits ;
- l'objectif de la gestion des opérations de production, qui n'admet pas les ruptures, les arrêts et les reconfigurations des unités de production, suppose des grandes séries et des stocks volumineux de sécurité

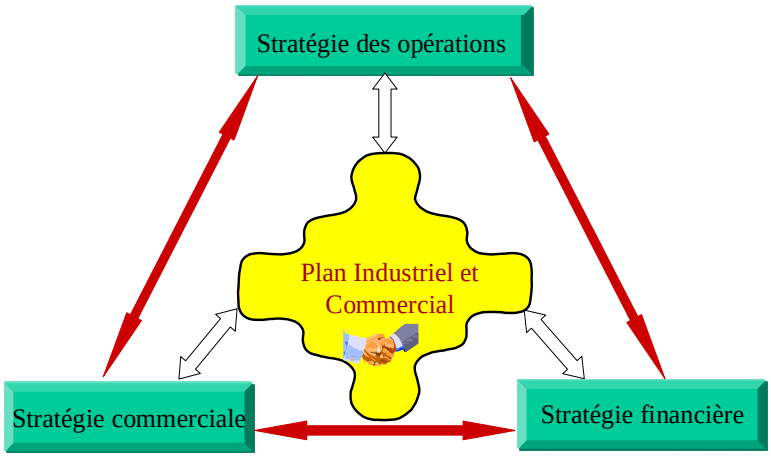


Figure 1. 21- Le consensus lors du processus d'élaboration du PIC

Communément, le PIC est vu comme un processus décisionnel permettant au management d'une entreprise d'évaluer sur un horizon la future adéquation charge/capacité. Il est important de souligner que la définition des horizons et des mailles de ce processus dépend du domaine industriel. Cette vision du PIC comme étant un outil d'équilibrage charge/capacité devant fournir des prévisions de charge est partagée par [Olhager et al., 2001] qui le définit comme « *Sales and Operations planning (S&OP) is the long term planning of production levels relative to sales within the framework of a manufacturing planning and control system* ». Le lecteur peut se référencer aux états de l'art de [Grimson and Pyke, 2007]; [Thomé et al., 2012] ; [Tuomikangas et Kaipia, 2014] et plus particulièrement pour l'industrie process [Noroozi et Wikner, 2017].

On retrouve également dans la littérature le terme « Planification agrégée de la production » qui est défini comme « *Aggregate production planning (APP) involves the simultaneous determination of company's production, inventory and employment levels over a finite time horizon. Its objective is to minimize the total relevant costs while meeting non-constant, time varying demand, assuming fixed sales and production capacity* » [Nam et Logendran, 1992].

Le S&OP comme une terminologie a été initialement trouvé dans les articles concernant le MRP II [Wight, 1981], la planification des ressources de production, ou des systèmes similaires, dans lesquelles certains auteurs l'ont utilisé de manière interchangeable pour désigner le terme planification agrégée de la production [Feng et al., 2008]. Sur ce dernier terme, le lecteur peut se référencer aux états de l'art de [Nam et Logendran, 1992] ; [Luss, 1982] ; [Van Mieghem, 2003] ; [Wu et al., 2005]. Depuis les années 1980, le sens du S&OP a été étendu et la planification des ventes a été incluse dans le processus de S&OP. Ainsi, le

S&OP comporte deux composantes, notamment la planification des ventes (basée sur les prévisions de la demande) et la planification de la production, qui détermine les besoins en capacité, le niveau des stocks et/ou le niveau des commandes non satisfaites [Olhager et al., 2001] [Wallace, 2004].

En revanche, d'autres articles considèrent le S&OP comme un processus de planification tactique. Ces articles définissent le S&OP comme un processus de planification périodique au niveau tactique, qui lie verticalement les plans stratégiques et commerciaux à long terme avec les plans opérationnels à court terme, et lie horizontalement la demande aux capacités d'approvisionnement, où les capacités d'approvisionnement se réfèrent aux capacités de production et de stockage [Wallace, 2004] ; [Genin et al., 2001] ; [Genin et al., 2005]. Cependant, quel que soit l'horizon temporel considéré par les auteurs, il existe un consensus de la communauté internationale sur la maille temporelle et la maille d'élément de la demande prévisionnelle, qui sont respectivement le mois et la famille de produits.

Toutes ces définitions définissent le PIC comme un processus continu de planification intégrée qui sert à vérifier l'adéquation entre les ressources disponibles, les moyens financiers et les prévisions commerciales. En vue des éléments préalablement soulevés, le processus d'élaboration du PIC est considéré comme appartenant à l'horizon long terme dans le contexte de planification des opérations de la Figure 1.20.

Le processus PIC est vu comme un processus qui rassemble des acteurs venant d'horizons différents. Ce côté transversal est une vertu qui permet d'assurer l'accroissement de la cohérence entre les différents services concernés de l'entreprise. [Womack et al, 1992] offre ainsi ce cadre décisionnel du PIC (Figure 1.22). Ce dernier décrit le PIC comme un outil exigeant l'entente des deux parties, celle de la partie production et de la partie commerciale, afin d'anticiper au mieux l'inadéquation charge/capacité. Cette dimension de collaboration est encore plus présente chez [Marty, 1997] qui définit le PIC comme « *…l'expression d'une concertation entre les directions techniques, commerciales et financières de l'entreprise. Il permet d'évaluer l'activité à venir, les volumes à produire, le chiffre d'affaire (CA) et les niveaux de stock* ». [Marty, 1997] considère donc le PIC comme un processus de décision et un espace de négociation où la direction générale établit ses choix stratégiques, c'est un outil décisionnel qui ne se limite pas à déterminer la charge future de production mais aussi le CA ou les niveaux de stock d'où son rôle stratégique.

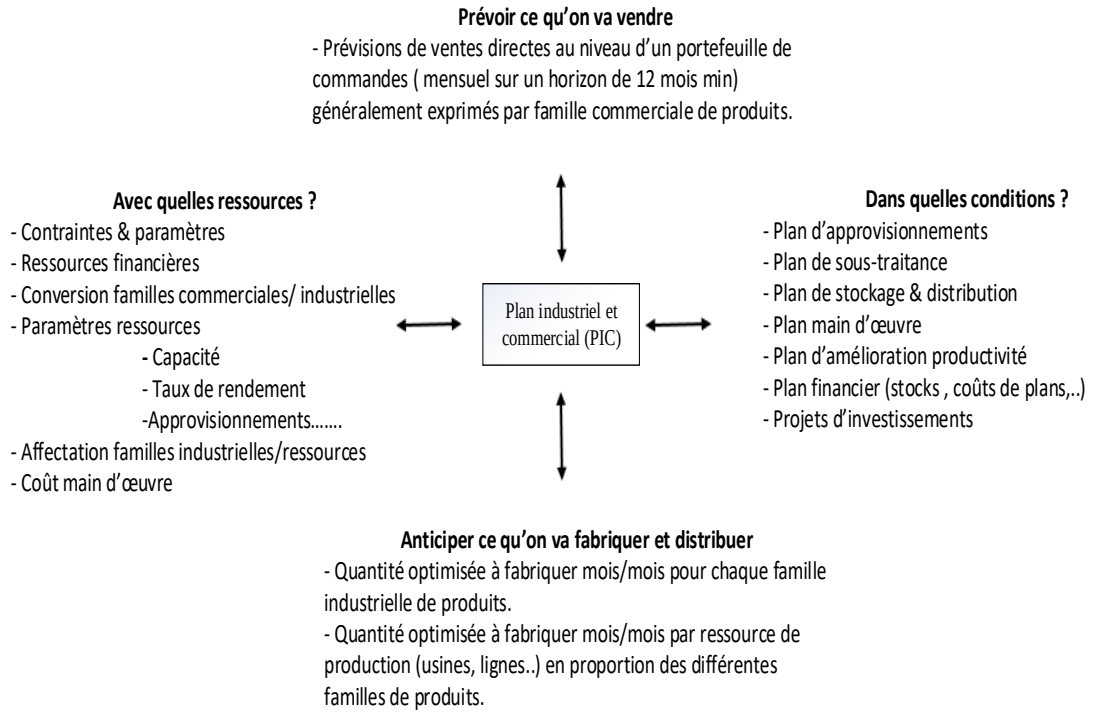


Figure 1. 22- Cadre décisionnel du PIC [Womack et al., 1992]

En effet, l'enjeu principal du PIC est d'assurer la faisabilité et l'adéquation charge/capacité sur un horizon long terme, et ceci par un équilibrage de la charge de travail induite par les demandes des clients, ou par l'équilibrage de la capacité pour répondre à cette charge, ou bien enfin par un recours au stockage. Le PIC détermine le niveau de production des familles de produits considérées par période et par ressource de production, ce qui permet de définir le niveau de stock qui répond aux besoins des périodes suivantes. Ce niveau de production est limité par la capacité des ressources, et peut varier par l'ajustement de la capacité (ouverture les week-ends et les jours fériés), le recours à la sous-traitance ou les heures supplémentaires, l'avance ou les retards de la production, ou encore la location de ressources de production. D'autre part, le PIC consiste à déterminer la charge de l'entreprise illustrée par les prévisions de commerciales. Le recours à une planification à horizon glissant n'empêche pas le PIC à prendre des décisions fermes qui engagent définitivement l'entreprise. La prise en compte d'une partie de ces décisions implique leur mise en place sans le recours à un niveau de planification plus fin, et ainsi sans génèrer de coûts.

Le PIC fournit donc le plan de capacité, les normes de stock et le plan stratégique de vente, qui sont des points d'entrée au niveau suivant de la planification tactique qui a pour but de définir un plan directeur de production.

4.3. Le PDP dans le cadre de la planification tactique

Le processus décisionnel lors de la planification tactique a pour but d'équilibrer les besoins et les ressources sur un horizon qui dépend des délais cumulés liés à l'approvisionnement, la fabrication, l'assemblage et à la livraison au client. Également nommé équilibrage, ce processus exploite une agrégation des informations et fournit des résultats qui permettent aux entreprises de prendre leurs décisions. Il porte sur la demande indépendante, c'est-à-dire les produits finis livrés aux clients.

Les plans tactiques fournissent une liste d'ordres planifiés, c'est-à-dire en ensemble d'informations prévisionnelles par produit fini répondant à la demande prévisionnelle (quantité globale, dates de début et de fin de production). Ces ordres vont devoir ensuite être convertis en ordres de fabrication réels, identifiés à des commandes fermes ou à des prévisions. Leur gestion « sur le terrain » consiste désormais à fabriquer, sous contrainte de ressources. Le processus décisionnel lors de la planification tactique est schématisé dans la Figure 1.23.

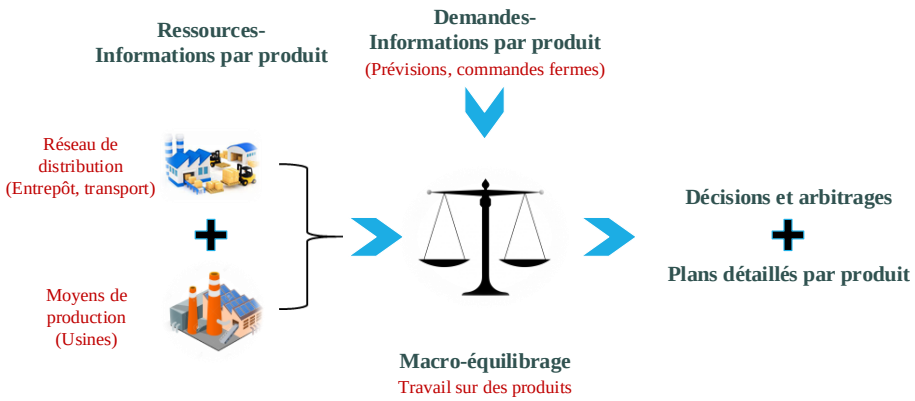


Figure 1. 23- Schématisation du processus décisionnel lors de la planification tactique

Lors de l'élaboration du PDP, il est indispensable de prendre en compte les contraintes de stock, et de coût d'exploitation, en tenant compte des stratégies commerciales et industrielles. Ce processus agit aussi bien sur les ressources que sur la demande (arbitrages de ventes, actions commerciales) et sur les règles de pilotage (normes, taux de service…).

La planification tactique suit la planification stratégique. Lorsque le plan industriel et commercial propose une vision à long terme des activités, le plan directeur de production (PDP) reprend les données commerciales du PIC sur un horizon plus court de 3 à 6 mois et les convertit en données de production en établissant pour chaque période (semaine, plus rarement à la journée) les quantités des principaux produits qui seront fabriquées sur un horizon de 3 à 6

mois. Il est établi en moyenne chaque semaine. Le but de ce plan de production est de déterminer les quantités qui devront être fabriquées pour chaque période de l'horizon. Les prévisions chiffrées de chaque famille de produit sont décomposées par produits finis et les quantités de chaque produit fini sont affectées à l'aide de clefs de répartition. Ces quantités fabriquées, et en fonction des spécificités du système industriel, sont déterminées pour chaque ressource de l'usine considérée comme critique. En effet, la planification tactique met à disposition au service commercial le disponible à vendre, ou un plan de vente, et ainsi le PDP peut être considéré comme un calendrier qui définit de façon précise l'échéancier des quantités à produire pour chaque produit fini, ce qui induit par la suite le calcul des besoins-matières au travers des nomenclatures. Si les prévisions auparavant effectuées sont justes, les besoins bruts exprimés dans le programme directeur de production seront essentiellement composés de commandes fermes. Il assure de plus la fonction de mesurer l'évolution des stocks. Le PDP permet aussi de chiffrer plus précisément les demandes de produits finis, informations qui vont constituer la base de la production des composants en amont. Il permet de transformer des prévisions commerciales en un programme de production tenant compte de l'état des stocks et des capacités de production de l'entreprise. Lorsque ce plan est établi, la direction de la production dispose à la fois des quantités à produire et des dates auxquelles ces quantités de produits finis doivent être disponibles. Il est essentiel pour maintenir de bons taux de service et pour stabiliser la production dans un environnement MRP [Tang et Grubbström, 2002].

Au niveau de la modélisation du système physique, les produits réels ou les produits directeurs sont planifiés, et la capacité usine n'est pas considérée globalement, mais elle est exprimée plutôt en ressources critiques. Au-delà de cela, en respectant le cadre hiérarchique de planification, les variables de décision sont restreintes à la quantité fabriquée par période (heures supplémentaires et intérimaires à la rigueur). Le plan de production gère les fonctions de fabrication, de stockage, et vise à minimiser l'ensemble des coûts liés à la production via l'utilisation optimale des ressources de production mobilisées et la livraison à temps des commandes clients dans les délais prescrits. Il a de plus la particularité de fournir un premier engagement client en évaluant le disponible à promettre. Il joue donc un rôle majeur dans le fonctionnement d'un système de planification intégrée et de contrôle de la production et des stocks, puisqu'il établit à chaque période l'équilibre entre ressources de l'entreprise et demandes à satisfaire.

Le programme directeur de production est exploité par une équipe pluridisciplinaire de l'entreprise composée des responsables commerciaux, logistiques, financiers, techniques, administratifs, juridiques et des responsables de la production. Ainsi, le PDP permet :

- d'obtenir la demande prévisionnelle par produit, et de prévoir ainsi une meilleure organisation des ressources de production ;
- de fournir diverses informations (évolution des stocks, évolution des coûts de mains d'œuvre, évolution des autres éléments de coûts de production …) et par la suite d'établir un plan de financement, de trésorerie et d'investissement ;
- d'établir un plan de distribution, de proposer de meilleurs délais de livraison aux clients, et aussi d'assoir une image fiable de l'entreprise auprès de ces derniers ;
- de faire le calcul des besoins en composants. Des informations qui sont par la suite utilisées pour la planification des approvisionnements, de la production et l'équilibrage des ressources de production.
- d'établir un planning des besoins en main d'œuvre, la nature des contrats à préparer, suivi des recrutements et formations.

4.4. La planification opérationnelle

La planification opérationnelle consiste à piloter l'approvisionnement, la production et la distribution pour atteindre les objectifs fixés au niveau tactique. Il s'agit donc d'un niveau de planification décentralisée qui détermine l'ordre dans lequel chaque activité doit être réalisée dans le cadre de décisions fixées au niveau tactique [Genin et al., 2001]. La planification opérationnelle est réalisée au moyen de lancements d'ordre de fabrication (produits finis, composants) et de livraison (matières premières, produits finis, etc…). Ces ordres ont été déterminés par le PDP et/ou par le calcul des besoins nets. Au niveau opérationnel, ces ordres sont sujets également à l'ordonnancement.

4.4.1. Le calcul des besoins nets dans le cadre de la planification opérationnelle

Le PDP ne traitant que de la planification en produit fini, le calcul des besoins nets permet de planifier, sur le même horizon, la fabrication de la demande dépendante en remontant les besoins au moyen de nomenclatures (il est possible de noter la limite de cette technique pour

les industries de process et les industries à gammes multiples). Le calcul des besoins nets génère des ordres planifiés pour la production des articles (sous-ensembles, composants, demande d'achat…) faisant partie de la demande dépendante. C'est ainsi qu'il fait partie de la planification opérationnelle présentée par la suite.

La planification des besoins-matières est réalisée suivant le concept MRP (Material Requirements Planning) et se situe à l'interface de la planification des opérations et de l'ordonnancement [Nollet et al., 1994] : « Son rôle est de déterminer les quantités et les dates de fabrication, d'assemblage des articles à demande dépendante, c'est-à-dire des matières premières et des composants, afin de produire à temps des quantités prévues dans le plan directeur de production. Elle assure la coordination entre ce que l'entreprise s'est engagée à livrer sur le marché et la mise en branle des opérations de production devant être réalisées pour pouvoir terminer les commandes à temps ».

Comme le montre la Figure 1.24, les ordres de fabrication planifiés par le PDP vont générer des besoins dépendants (BD). Ces derniers portent sur les produits semi-finis (PSF), les composants et les matières premières (MP). En considérant toute la demande (indépendante et dépendante), le calcul des besoins nets est réalisé par le MRP en analysant l'état des stocks, les commandes et les ordres de fabrication en cours. Ainsi, chaque besoin est couvert par un ordre planifié (OP) ou une demande d'achat (DA) avec une date de fin qui correspond à la date du besoin ; celle-ci étant la date de début d'un ordre planifié d'un article situé au niveau supérieur de la nomenclature.

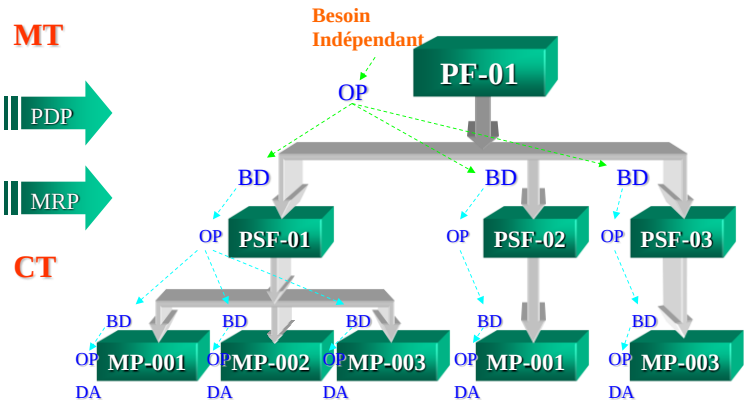


Figure 1. 24- La planification des besoins matières : le lien entre le PDP et le MRP

En d'autres termes, le calcul de besoin est un outil de programmation à capacité infinie sur un horizon qui corrobore avec celui du PDP et qui génère des propositions d'achats, de

fabrication et d'assemblage de l'ensemble des articles planifiés par le PDP et assure la transition vers l'ordonnancement.

Le passage du niveau tactique au niveau opérationnel introduit la nécessité de considérer une problématique fondamentale : l'ordonnancement.

4.4.2. L'ordonnancement dans le cadre de la planification opérationnelle

Le plan de production déterminé au niveau de la planification tactique est transmis au niveau opérationnel. Les quantités fixées dans ce plan correspondent à des ordres de fabrication dans l'atelier, à ce niveau de très court terme, et le département production se trouve confronté à ces d'ordres de fabrication (OF) à exécuter. Chaque OF consiste en une liste d'opérations à effectuer, mais ne précise pas nécessairement l'ordre dans lequel ces opérations doivent être exécutées, ni l'instant auquel elles doivent être entamées, ni les postes de production auxquels elles doivent être affectées. Une gamme correspond à la suite des machines par lesquelles doit passer un ordre de fabrication. La gamme peut varier d'un ordre de fabrication à l'autre. Ordonnancer consiste à gérer l'allocation (ou l'accès) à des ressources au cours du temps, tout en satisfaisant au mieux un ensemble de critères [Rodammer et al., 1988]. Pour cela, on détermine les dates de lancement et de fin des opérations ainsi que l'affectation de ces opérations aux différents postes de production susceptibles de les exécuter. On classe généralement la fonction d'ordonnancement parmi les activités de planification à très court terme.

Au niveau opérationnel, l'allocation des ressources pour chaque ordre de fabrication doit être décidée, allocation dont l'objectif est de garantir un plan de production réalisable en respectant toutes les contraintes, mais aussi de fournir la meilleure solution. Ces décisions opérationnelles doivent permettre de fixer les dates de début et de fin des ordres de fabrication les plus pertinentes, ainsi que le meilleur séquencement des ressources. Les mauvaises décisions d'ordonnancement peuvent occasionner des délais et des stocks de produits semi-finis additionnels, ce qui peut déstabiliser la chaîne logistique. Dans des systèmes complexes, avec des produits diversifiés et plusieurs ressources, il est difficile d'estimer la capacité de production à l'avance, et par conséquent, de calculer un plan de production réalisable au niveau ordonnancement. De plus, des incertitudes liées aux activités de maintenance et aux opérations manuelles peuvent aussi conditionner la mise en œuvre des décisions opérationnelles.

Les objectifs à optimiser dans un problème d'ordonnancement portent généralement sur les dates de fin des OF et/ou sur le coût de réalisation de l'ordonnancement. Parmi les objectifs portant sur les dates de fin, on trouve la minimisation de la date de fin du dernier OF réalisé dans l'ordonnancement ou encore la date de fin moyenne des OF de l'ordonnancement, ces critères sont généralement normalisés dans la littérature. Cependant les objectifs portant sur les coûts sont moins « normalisés » dans la littérature, ils sont généralement une fonction de l'utilisation des ressources (notamment dans le cas de ressources non renouvelables) ou encore de la séquence des OF sur les machines. Dans la plupart des problèmes d'ordonnancement, on distingue deux sous-problèmes : l'affectation des OF aux machines (problème d'affectation) et le séquencement des OF sur chaque machine (problème de séquencement).

5. La modélisation des problèmes de la planification

Face à la diversité et à la complexité des systèmes qu'ils doivent piloter et optimiser, les managers industriels ont besoin d'outils d'aide à la décision leur permettant de prendre en compte l'ensemble des spécificités des systèmes de leur domaine en vue d'améliorer leur fonctionnement et d'assurer une viabilité financière à long terme. Ainsi, à partir d'un système réel étudié, une représentation fidèle et affinée doit être obtenue afin de proposer des solutions. Cette représentation permet de construire un « modèle » à partir de la phase d'acquisition des informations pertinentes qui le constitue. L'étude de la modélisation du système, de sa structure et des possibilités de décomposition peut permettre de rapporter la résolution d'un problème globalement très complexe à celle d'un ensemble de sous-problèmes plus faciles à résoudre, et/ou mieux connus. C'est également le modèle qui permet de définir les axes de recherches qui permettent à la fois de déterminer la structure de la solution, sa valeur après son évaluation, ainsi que les algorithmes d'optimisation, qui ont pour but d'explorer un ensemble de solutions destinées à trouver la meilleure possible. Le rôle de la démarche de modélisation est de guider l'expert dans la création d'applications en optimisation. Ces applications peuvent être scindées en deux modules : le module d'optimisation et le module d'évaluation des performances. Outre l'aide méthodologique, la détermination de la finesse du modèle nécessite l'introduction des hypothèses simplificatrices, elle consiste à repartir des modèles théoriques classiques des problèmes de la littérature. Ensuite, ces hypothèses simplificatrices sont supprimées les unes après les autres, puis réintroduites au fur et à mesure. La prise en compte de nouvelles contraintes peut nécessiter de modifier la façon dont les solutions sont évaluées et dont l'espace des solutions est parcouru par les algorithmes d'optimisation proposés.

Le processus de modélisation est donc essentiel et nécessite des outils méthodologiques. Dans la suite, nous introduisons la notion de modèle, puis les formalismes de modélisation adaptés aux applications d'optimisation et de simulation sont proposés. Enfin, les méthodes de résolutions associées sont présentées.

5.1. Notion de modèle

« Nous n'accédons à nos raisonnements que par les modèles que nous nous sommes construits... » (P. Valéry)

Cette citation démontre comment face à un problème, nous élaborons les modèles sur lesquels nous allons raisonner. En effet, les systèmes de production sont des systèmes conçus par l'homme, mais leur complexité empêche bien souvent la possibilité qu'un individu en détermine un fonctionnement optimal. C'est pour cette raison qu'il est généralement nécessaire d'avoir recours à la modélisation pour pouvoir travailler sur des simplifications et sur des décompositions du système à étudier.

[Drouin, 1988] donne une définition de la notion de modèle comme « "quelque chose" (objet concret, représentation imagée, système d'équations...) qui se substitue au réel trop complexe, ou inaccessible à l'expérience, et qui permet de comprendre ce réel par un intermédiaire plus connu ou plus accessible à la connaissance ».

Pour illustrer cette définition, nous introduisons trois propriétés que le modèle doit avoir relativement au système modélisé [Popper, 1973]. Le modèle doit :

- présenter une simplification du système. Si le modèle renferme toute la complexité, c'est que le modèle sera probablement difficile à exploiter. Les simplifications usuelles sont l'ablation d'une partie du système ou la négligence de phénomènes observés (pannes, événements aléatoires, ...).
- ressembler au système qu'il modélise. On dit que le modèle ressemble au système si on peut apprendre quelque chose d'utile sur le système avec le modèle. C'est donc tardivement, au moment de l'exploitation du modèle, que l'on peut se rendre compte si un modèle est ressemblant ou non. Cette ressemblance n'est malheureusement ni quantifiable ni formalisable.

- présenter une idéalisation du système. Pour certaines parties ou pour certains phénomènes, on peut vouloir ne pas les supprimer mais les prendre en compte de manière idéale (opération de durée constante, disponibilité complète des matières premières, etc.). Sur le schéma, les contours du modèle sont plus réguliers que ceux du système.

Parmi ces trois propriétés, la propriété de ressemblance est la plus implicite. Pendant la phase de modélisation, on discute principalement des propriétés de simplification et d'idéalisation du modèle. Ces deux propriétés sont regroupées sous le vocable "hypothèses simplificatrices". Une hypothèse simplificatrice consiste à ne pas modéliser un élément du système réel s'il ne participe pas à l'amélioration du système de production dans les objectifs qui sont fixés. Ces simplifications font partie du processus de modélisation et ont vocation à permettre d'améliorer les performances du système de production.

Chaque modèle définit des objets et des concepts très différents selon le milieu dans lequel ils sont employés. A priori, chaque nouvelle problématique nécessite donc le développement d'un nouveau modèle. De nombreux types de modèles existent. Un modèle physique se traduit par une forme concrète, manipulable (une maquette par exemple). Un modèle symbolique, par opposition au modèle physique, se traduit par un formalisme abstrait. Il peut s'agir d'un formalisme mathématique (on parle de modèle mathématique), d'un langage de simulation (on parle de modèle de simulation) etc. En effet, la construction d'un modèle est une tâche complexe car elle prend en compte non seulement la création, mais aussi la validation, la vérification, ainsi que l'utilisation du modèle.

Malgré l'existence de nombreux formalismes de modélisation, la phase de modélisation reste difficile. Il est largement reconnu que "la modélisation est un art", car le succès de la phase de modélisation ne peut être assuré et dépend largement des compétences de l'expert en modélisation (il n'existe pas une méthode qui détermine les hypothèses simplificatrices à réaliser, rien ne permet d'affirmer que le modèle ressemble suffisamment au système étudié, le modèle est tributaire de la qualité des connaissances recueillies auprès des experts. Notons tout de même qu'un modèle peut être vérifié (la cohérence interne du modèle est étudiée) et validé (les résultats sont comparés avec des états connus du système).

5.2. Formalismes de modélisation utilisés

Dans ce paragraphe, trois formalismes mis en œuvre pour la résolution des problèmes traités dans cette thèse sont présentés : une formalisation mathématique, une approche par graphe et la simulation à événements discrets. L'objectif de la modélisation consiste à élaborer des modèles du système étudié en vue d'apporter une aide à la décision.

Ces trois modèles sont quasiment équivalents, c'est-à-dire que presque toutes les contraintes qui constituent le ou les problèmes traités peuvent être reformulées dans les trois types de modèles. Pour autant, la difficulté de prise en compte de certaines contraintes dépend fortement du formalisme utilisé pour décrire le modèle. Autrement dit, il y a des contraintes qui s'écrivent très simplement en formalisation mathématique et qui sont plus difficiles à modéliser en simulation, et vice-versa.

La possibilité de disposer de plusieurs approches visant à résoudre un problème donné révèle d'un réel avantage. En effet, à chaque type de modèle est associé un ensemble de méthodes possibles. Ainsi, tandis qu'un modèle mathématique peut permettre de trouver des solutions optimales, un modèle de simulation sera plus à même de faire apparaître certaines caractéristiques d'un système nécessitant par exemple une solution non optimale au sens de la résolution du modèle mathématique. De plus, en fonction de la taille croissante des problèmes, un modèle de simulation peut mettre en évidence la qualité de règles de gestion au sein d'un système de production, permettant d'assurer les performances du système, sans avoir pour autant à résoudre un modèle mathématique. Pourtant, un programme linéaire en nombre entier qui consiste en la mise en œuvre d'un modèle mathématique, peut permettre d'évaluer plus finement la qualité d'un modèle de simulation. Ainsi, ces approches sont complémentaires.

5.2.1. Formalisation mathématique

La formalisation mathématique (ou "modèle mathématique") a pour intérêt de formaliser de manière univoque la connaissance du système lorsqu'un modèle de connaissance est précisément connu, ainsi elle permet la résolution optimale des problèmes traités par des solveurs génériques. Cette formalisation a l'avantage d'être relativement facile à écrire, d'être non ambigue et de pouvoir être traduite en un modèle linéaire facile à mettre en œuvre.

A ce titre, il ne faut pas confondre un modèle mathématique qui vise à représenter d'une manière formelle les contraintes à l'aide des notations mathématique, et un modèle linéaire qui

permet d'exprimer un problème sous forme de contraintes linéaires. Certaines contraintes du formalisme mathématique ne sont pas linéaires, faisant souvent apparaître des termes quadratiques, ou dont l'expression des indices utilise des variables. Le passage d'un modèle non linéaire à un modèle linéaire n'est pas toujours aisé.

Il est indispensable de passer d'un modèle mathématique à un modèle linéaire. Ce dernier est notamment utile pour vérifier ou valider la qualité de la solution optimale ou valider les méthodes approchées. La vérification et la validation permettent de s'assurer que toutes les contraintes ont été prises en compte et de détecter si certaines ont été oubliées ou si d'autres doivent être supprimées.

La vérification permet de prouver que le modèle est conforme à ce qu'on a initialement prévu et que l'on n'a pas introduit d'erreurs pendant sa réalisation. L'utilisation d'un support visuel de la solution tel qu'un diagramme de Gantt peut être appropriée afin d'analyser les résultats obtenus. La vérification peut consister, par exemple, à générer des solutions optimales pour des problèmes simples. Les solutions trouvées permettent de mettre en évidence certains problèmes de modélisation :

- les solutions générées respectent les contraintes, mais sont manifestement fausses ou sous optimales.
- une solution manifestement fausse respecte toutes les contraintes formalisées, mais n'est pas une solution du problème. C'est ce qui arrive quand des contraintes manquent dans la formalisation.
- une solution manifestement sous optimale est une solution respectant toutes les contraintes, mais dont la qualité est inférieure à des solutions connues. C'est ce qui arrive quand certaines contraintes sont trop restrictives, quand par exemple certains cas limites ont été oubliés.

La validation de la solution permet de montrer que le modèle est conforme aux objectifs fixés ou aux exigences initiales. On distingue la validation ad-hoc qui consiste à modifier une solution pour vérifier si la solution optimale évolue dans le sens attendu, et la validation par comparaison au système réel, qui se réalise généralement après la validation ad-hoc. Elle consiste à évaluer la solution en la confrontant au système réel et à la faire valider par les experts. Pour faciliter la validation du modèle, il peut être intéressant d'opter pour une

résolution directe de taille réduite, car un petit exemple est plus facile à appréhender et à discuter. Ainsi, il est aisé de constater que des contraintes qui devraient être respectées sont violées.

Un modèle réalisé est souvent associé à un objectif précis à atteindre. Dans ce sens, il est essentiel que le modèle réponde aux objectifs pour lesquels il a été réalisé. Pour cela, il est possible soit de comparer le modèle au système réel s'il existe, soit de montrer qu'une solution correspond bien aux contraintes auxquelles le modèle est soumis. Dans le premier cas, si une solution est déjà appliquée sur le système industriel, il suffit de vérifier que l'évaluation par le modèle mathématique de la solution en cours permet d'obtenir le résultat attendu. Dans le second cas, il faut utiliser une approche par expérimentation, et s'assurer que l'application d'une solution, en répondant aux objectifs fixés, ne présente aucun risque quant au bon fonctionnement du système de production.

Comme mentionné ci-dessus, un modèle mathématique permet de vérifier et de valider la qualité des solutions obtenues à l'aide de méthodes approchées. En effet, un modèle linéaire permet d'obtenir des solutions exactes sur des petites instances et éventuellement de bonnes solutions issues de résolutions optimales tronquées. Ces solutions sont utiles pour valider les méthodes approchées, car celles-ci sont supposées trouver les solutions optimales sur les petites instances ou tout du moins des solutions de très bonne qualité.

La formalisation mathématique a donc un triple intérêt : représenter le système de manière non ambigüe, obtenir des solutions optimales sur des problèmes à taille réduite, et enfin, valider les performances d'une méthode approchée.

5.2.2. Modélisation sous forme de graphe

Les réseaux sont omniprésents dans diverses applications contenant des paramètres différents. Les chercheurs ont commencé à analyser les réseaux de flot des réseaux physiques, qui sont les classes de réseaux les plus courantes et facilement identifiables. Ces différents modèles de réseaux de flots se sont révélés théoriquement intéressants et pratiquement utiles [Ahuja et al., 1993] [Murty, 1992]. Cependant, un réseau de flot ordinaire a ses limites dans la modélisation des scénarios de fabrication plus complexes. Parmi ces réseaux physiques, le « réseau de transport » était l'un des domaines les plus proches de la vie des gens et a attiré l'attention de [Kantorovich, 1960].

Au cours des dernières décennies, la recherche sur les réseaux de flot ne s'est pas limitée aux réseaux physiques dans les contextes de transport ; ils impliquent également plusieurs autres scénarios issus des sciences appliquées et du génie, tels que les mathématiques, la chimie les communications…etc. Lorsque des réseaux se produisent dans ces différentes disciplines, leurs nœuds, leurs arcs et leurs valeurs modélisent de nombreuses entités. Par exemple, dans le réseau de télécommunication, les nœuds sont les lieux où les signaux sont générés ou où se trouvent les hubs d'échange, les arcs désignent le cuivre ou les câbles optiques reliant différents nœuds, et le flot signifirait la transmission de paquets de signaux ou de données.

Les problèmes de réseau de flot se posent également de manière surprenante pour des problèmes qui, sous la surface, peuvent sembler n'avoir aucun rapport avec les réseaux physiques. Des problèmes tels que le réseau social, le réseau de classement de pages pour la recherche de sites Web et les travaux de développement de logiciels n'ont pas de réseau physique, mais les chercheurs peuvent faire une abstraction en problèmes de réseau de flot. Ainsi nous distinguons dans la partie suivante les réseaux de simple flot et de multiflot.

5.2.2.1. Simple flot vs Multiflot

Les problèms de flot sont des problèms fondamentaux et très souvent utiles dès qu'il s'agit de trouver des chemins dans des graphes. Ils se dévisent en deux types, le simple flot et le multiflot. Le premier type qui est un problème de simple flot prend en entrée un graphe où chaque arc a une capacité, et deux sommets particuliers, la source et le puits.

Un problème de flot peut se formaliser par un programme linéaire. Soit $G=(N,A)$ un graphe, et $g:A\rightarrow\mathbb{R}^{+}$ une fonction de capacité sur les arcs, Q la quantité de fot à transporter, s le sommet représentant la source et p le sommet représentatnt le puits. Il s'agit de trouver une fonction $f:A\rightarrow\mathbb{R}^{+}$ satisfaisant les contraintes suivantes :

- contrainte de capacité : $\forall\{x,y\}\in N$:

$$0\leq f(x,y)\leq g(x,y)$$

- contrainte de conservation : $\forall y\in N\setminus\{s,p\}$:

$$\sum_{\{x|(x,y)\in A\}} f(x,y)-\sum_{\{x|(y,x)\in A\}} f(y,x)=0$$

- respect de la demande :

$$\sum_{\{y|(s,y)\in A\}} f(s,y) - \sum_{\{y|(y,s)\in A\}} f(y,s) = -\sum_{\{y|(p,y)\in A\}} f(p,y) + \sum_{\{y|(y,p)\in A\}} f(y,p) = Q$$

$f(x,y)$ représente la quantité de flot passant par l'arc (x,y)

Le problème de flot étant un programme linéaire, il est évidemment polynomial si l'on considère des flots fractionnaires, c'est-à-dire lorsque les variables et les constantes sont réelles : $Q \in \mathbb{R}^+$; $f,g : A \to \mathbb{R}^+$. Cela dit une propriété fondamentale du simple flot est qu'il reste polynomial lorsque les variables et les constantes du problème sont entiers : $Q \in \mathbb{N}$; $f,g : A \to \mathbb{N}$ ce qui n'est pas le cas pour les programmes linéaire en général.
Plusieurs types de problèmes de flot existent, nous citons à titre d'exemples :

- le problème de la demande fixée, où il faut faire passer une quantité définie de flot. C'est un problème de décision qui ne fait pas intervenir une fonction objectif.
- le problème de flot maximum, où le flot entre la source et le puits est à maximiser.
- le problème de coût minimal, où la quantité du flot est fixée et où chaque arc a un coût volumique, la fonction objectif étant la minimisation du coût de flot $\sum_{\{x\in A\}} f(x) \times coût(x)$.

Le deuxième type de flot qui est le prblème de multiflots réprésente une génaralisation du problème de flot. Il s'agit de faire passer plusieurs flots simultanément dans le réseau entre plusieurs couples (source, puits). La conservation de chaque flot est indépendante des autres. Toutefois il ne s'agit pas de plusieurs simple flots « parallèles » car la contrainte de capacité est globale : la somme des flots traversant un arc ne doit pas excéder sa capacité.
On note s_F la source du flot F, p_F le puits du flot F, et Q_F la quantité du flot F que l'on désire faire passer. Il s'agit de trouver pour chaque flot F une fonction f_F satisfaisant les contraintes suivantes :

- contrainte de capacité : $\forall \{x,y\} \in N$:

$$0 \le \sum_F f_F(x,y) \le g(x,y)$$

- contrainte de conservation : $\forall F, \forall y \in N \setminus \{s_F, p_F\}$:

$$\sum_{\{x|(x,y)\in A\}} f_F(x,y) - \sum_{\{x|(y,x)\in A\}} f_F(y,x) = 0$$

- respect de la demande : $\forall F$

$$\sum_{\{y|(s_F,y)\in A\}} f_F(s_F,y) - \sum_{\{y|(y,s_F)\in A\}} f_F(y,s_F) = -\sum_{\{y|(p_F,y)\in A\}} f_F(p_F,y) + \sum_{\{y|(y,p_F)\in A\}} f_F(y,p_F) = Q_F$$

$f_F(x,y)$ représente la quantité de flot F passant par l'arc (x,y).

La résolution du programme linéaire est bien entendu polynomiale pour le multiflot fractionnaire, mais devient Np-complet pour le multiflot entier $(\forall F, f_F : A \to \mathbb{N}, Q_F \in \mathbb{N}, g : A \to \mathbb{N})$.

5.2.2.2. Problèmes généraux d'optimisation du réseau de flux de fabrication.

Le problème du flot maximum se pose dans un large éventail de situations et sous plusieurs formes. Cela peut faire partie d'un problème de réseau plus difficile, tel que le problème de flot à coût minimum ou le problème de flot généralisé. Cela pourrait également être lié à des problèmes tels que la planification des machines, l'attribution de modules informatiques à des processeurs informatiques et la publicité en ligne. Le problème traditionnel du flot maximum est formulé comme suit : dans un réseau capacitif, on souhaite envoyer autant de flot que possible entre deux nœuds spéciaux, un nœud source et un nœud puits sans dépasser la capacité d'aucun arc. Bien que ce problème ait été posé il y a un demi-siècle, il est toujours attrayant pour les chercheurs qui recherchent des algorithmes plus efficaces pour sa solution.
Tout en travaillant sur des problèmes de réseau de flux dans le monde réel, les gens se sont rendu compte qu'il existe de nombreuses structures de réseau qui ne pourraient pas être dans le cadre de réseau de flux traditionnel ou résolues avec les algorithmes existants sans modification. Pour modéliser tout type de structure, [Fang et Qi, 2003] ont proposé un modèle de réseau plus général appelé réseau de fabrication. Ils ont introduit six types de nœuds différents: les nœuds ordinaires (nœuds O) pour la transition des flux, les nœuds sources (nœuds S) pour fournir les matières premières, les nœuds de terminaison (nœuds T) pour collecter les produits finaux, les nœuds intermédiaires (nœuds I) qui permettent d'utiliser / stocker des matériaux ou semi-produits en cours de fabrication en excès de la dernière / prochaine période, des nœuds de distribution (nœuds D) pour les opérations de distribution , et des nœuds de combinaison (nœuds C) pour les opérations d'assemblage. Puisque le problème de flot maximum est un cas particulier du problème de flot à coût minimum, la plupart des recherches sur le réseau de flux

de fabrication visent à développer des algorithmes pour un problème de flot à coût minimum basé sur l'algorithme simplex sur un réseau.

Ces deux problèmes de flot maximale/ flot à coût minimum sont tous deux des problèmes de programmation linéaire avec une structure de réseau de flux général. Mais ils sont plus compliqués que les problèmes du réseau classique [Ahuja et al., 1993] [Murty, 1992].

5.2.3. Simulation à événements discrets

La troisième approche utilisée dans cette thèse est une approche par simulation. La simulation est un outil d'analyse très puissant qui vise à concevoir et à mettre en œuvre un modèle d'un système réel sur lequel des expérimentations sont faites. Elle consiste à construire une abstraction de la réalité et de la faire évoluer en fonction du temps. Cette abstraction construite représente un modèle du système étudié et on parle de "modèle de simulation". L'objectif de l'approche par simulation est de permettre de reproduire les activités des différentes entités du système simulé et donc d'extraire de la connaissance d'un système sur ses comportements et ses performances. À l'inverse des méthodes empiriques, la simulation fournit une réponse scientifique et étayée à des problèmes difficiles. L'avantage de l'approche par simulation, dans certains cas, est de permettre d'étudier les systèmes sans avoir à les construire, de les analyser sans les perturber, et enfin de ne pas les détruire quand l'objet de l'étude vise à déterminer la capacité du système à résister à des événements critiques, ou à fonctionner dans ses conditions limites d'utilisation.

La simulation permet d'analyser le système et d'évaluer sa performance, en prenant en compte ses différents états. Ces derniers doivent pouvoir être formalisés, ainsi que les entités du système. Le passage d'un état à un autre peut se baser sur des règles préétablies et généralement appliquées sur le système réel (Ex : l'ordre de passage des produits en attente devant une ressource du système). Plusieurs environnements dédiés à la simulation sont utilisés et permettent de mettre en œuvre des modèles réalisés (langages qui fournissent les primitives de base d'écriture de modèle, composants réutilisables, outils statistiques…). L'utilité de ces langages consiste à fournir des éléments visant à évaluer la performance du système modélisé (calcule de taux d'utilisation des ressources par exemple), ainsi ces informations sont facilement enregistrées sous forme de rapports détaillés. Par exemple, les environnements de simulation SIMAN Arena, Witness, AnyLogic ou SIMUL8 sont fréquemment utilisés et implémentant des langages de simulation.

Un modèle de simulation "ne prend pas de décision", il ne fait que répondre à une question du type "que se passe-t-il si ?". La simulation permet de tester plusieurs scénarii, dans ce cas, la recherche de la configuration du système dans laquelle il est le plus performant implique l'utilisation d'autres approches. Dans le cas contraire, lorsque le nombre de scénarii testés est faible, une de ces approches consiste en un plan d'expérience, mais ces plans ne sont efficaces que pour un nombre relativement restreint de configurations à explorer. Lorsque ce nombre devient trop important, il est nécessaire d'avoir recours à d'autres techniques. L'utilisation du module de simulation dans le but d'optimiser un système requiert un couplage Optimisation-Simulation, ou Simulation-Optimisation.

5.3. Les méthodes de résolution

Les méthodes permettant de résoudre les problèmes d'optimisation sont nombreux. Nous ne présentons donc, dans ce paragraphe, que les principaux problèmes d'optimisation et les principales méthodes. Pour cela, nous présentons les problèmes d'optimisation combinatoire en général (§5.3.1). Puis, nous présentons les grandes familles de méthodes (§5.3.2). La programmation linéaire (§5.3.2.1) forme une famille de méthodes à laquelle on s'intéresse plus particulièrement dans la suite de cette thèse.

5.3.1. Problème d'optimisation combinatoire

Définition : problème d'optimisation combinatoire mono-objectif [Papadimitriou et Steiglitz, 1998]

Soit P un problème et S un ensemble discret et fini. Soit R un sous-ensemble de S constituant les solutions réalisable de P. Soit c une fonction appelée "fonction objectif".

Trouver $x^* \in R$ tel que $c(x^*) = \min_{x \in R} c(x)$ *et* $x^* \in R$ tel que $c(x^*) = \max_{x \in R} c(x)$ *sont deux problèmes d'optimisation combinatoire.*

Un des éléments les plus importants dans cette définition est la nature discrète des problèmes d'optimisation combinatoire. Les problèmes auxquels on s'intéresse sont en général modélisés de manière discrète et sont donc naturellement des problèmes d'optimisation combinatoire.

Un problème d'optimisation combinatoire mono-objectif peut être un problème de minimisation ou un problème de maximisation. Notons qu'on peut toujours transformer un problème de maximisation en un problème de minimisation et vice versa. Dans cette thèse, les problèmes de maximisation sont considérés. Cependant, les remarques effectuées dans cette section restent vraies dans le cas de problèmes de minimisation.

En complément de cette définition, dans le cas d'une maximisation, la fonction coût est généralement appelée "fonction profit". De plus, l'objectif dans la définition énoncée ci-dessus est de trouver une "solution" appartient à l'espace des solutions réalisables. Une solution en optimisation combinatoire est un point de l'espace de recherche. Suivant les problèmes considérés, il se peut que tous les points de l'espace de recherche ne correspondent pas à des solutions du problème de départ. Autrement dit, lors du développement du problème d'optimisation combinatoire, il est possible que l'on soit contraint ou que l'on préfère introduire dans l'espace de recherche des points qui ne représentent pas des solutions. Pour reconnaître ces points, on utilise les notions de "solution réalisable" / "solution irréalisable". La recherche d'un ensemble de solutions émerge principalement lorsque l'objectif n'est pas d'optimiser un critère mais plusieurs. On parle alors de problèmes multiobjectifs. L'énoncé d'un tel problème est donné ci-dessous :

Définition : problème d'optimisation combinatoire multi-objectif [Collette et Siarry, 2002]

Soit P un problème et S un ensemble discret et fini. Soit R *un sous-ensemble de S constituant les solutions réalisable de P. Soit un ensemble T de critères à optimiser et* c_i *la fonction objectif associée au i-ème critère de T à optimiser.* $Opt\{c_i(x) \mid x \in R\}_{i \in T}$ *est un problème d'optimisation combinatoire multiobjectif.*

L'optimisation multi-objectifs trouve ses racines dans les travaux en économie de [Edgeworth, 1881] et de [Pareto, 1896]. L'étude de méthodes d'optimisation avancées et dédiées à ces problèmes a pris son essor dans les années 80 [Steuer, 1986], mais surtout avec l'application des algorithmes évolutionnistes multi-objectif dans la seconde moitié des années 90 [Deb, 2001] . Si les études se sont principalement centrées dans un premier temps sur les méta-heuristiques, un intérêt croissant s'est récemment porté sur les méthodes de recherche arborescente et les méthodes issues de la programmation mathématique. La principale différence avec l'optimisation mono-objectif vient de la définition d'optimalité. Il s'agit de l'optimalité de Pareto qui est définie par la dominance de Pareto [Pareto, 1896].

Dans la définition ci-dessus le terme 'Opt' est utilisé au sens du critère d'optimisation, à savoir minimiser ou maximiser. En effet, un problème multiobjectif ne cherche pas toujours à minimiser ou maximiser tous les critères. Par exemple, la minimisation du coût d'achat d'un logement tout en maximisant la superficie. Cependant, de nombreux problèmes peuvent être ramenés à la minimisation ou la maximisation de tous les critères. Dans cette thèse, un problème où un critère est maximisé et un autre où il est minimisé son proposés.

Les problèmes d'optimisation combinatoire considérés ci-dessus doivent être résolus par des algorithmes. Ces algorithmes sont organisés en fonction de la classe de problèmes qu'ils sont à-même de résoudre. La mise en œuvre de l'algorithme consiste en l'écriture des opérations qui le compose dans un langage de programmation dans le but d'être exécuté par un ordinateur. La modélisation d'un tel ordinateur est admise par la machine de Turing. Nous distinguons deux types, la machine de Turing déterministe et la non-déterministe. La première exécute les étapes de l'algorithme les unes après les autres, à chaque étape elle désigne la prochaine étape à réaliser. Par opposition, la deuxième propose, à une étape donnée, un ensemble d'étapes suivantes possibles, raison pour laquelle elle ne permet pas de choisir quelle sera la prochaine étape. La notion de complexité de l'exécution d'un algorithme est souvent associée au nombre d'actions effectuées dans l'algorithme ; la complexité d'un problème est liée à la plus faible complexité des algorithmes qui permettent sa résolution. Généralement, les algorithmes souhaités sont dits polynomiaux.

Définition : Algorithme polynomial [Garey et Johnson, 1979]

Si l'nsemble des actions qu'effectue un algorithme suit une fonction polynomiale, l'algorithme est dit polynomial, ou polynomial-temps. La complexité est souvent notée à l'aide des notations de Landau. $O(n^i)$ *avec i un nombre entier et n la taille des données.*

Si $i = 0$, on parle de compléxité constante, et de complexité linéaire lorsque $i = 1$. La première classe de problèmes se base sur la notion d'algorithme polynomial, et par conséquent, sur la définition d'une machine turing déterministe. Cette classe se nomme classe P.

Définition : Classe P [Garey et Johnson, 1979]

Un problème est dit polynomial ou polynomial-temps et qui appartient à P, s'il peut être résolu en un temps polynomial par une machine de Turing déterministe.

Un problème de classe *P* est donc un problème qui peut être résolu à l'aide d'un algorithme polynomial (par un ordinateur). Le tri d'une liste de valeurs est un des problèmes *P*. La classe de problèmes suivante est la classe *NP*.

Définition : Classe NP [Garey et Johnson, 1979]

Un problème appartient à la classe NP (Nondeterministic Polynomial time), s'il peut être résolu en un temps polynomial par une machine de Turing non déterministe.

Les problèmes appartenant à la classe *P* sont aussi des problèmes de la classe *NP*, car un algorithme qui est en temps polynomial sur une macine de Turing déterministe et aussi en temps polynomial sur une machine de Turing non déterministe. On a donc $P \subseteq NP$. Par contre, les problèmes dans la classe *NP* ne sont pas forcément dans la classe *P*. En effet, il n'a jamais été prouvé que les ensembles des problèmes *P* et *NP* sont distincts ou égaux. Ce problème fait partie des problèmes du prix de millénaire et reste à résoudre. Après les problèmes *NP*, viennent les problèmes de la classe *NP*-complet. Cette classe repose sur la notion de réduction polynomiale. Un problème P1 est réduit en un problème P2, si les données du problème P1 peuvent être transformées en données du problème P2. Ainsi, si on dispose d'un algorithme polynomial pour P2, tout problème P1 peut être résolu.

Définition : Classe NP-complet [Garey et Johnson, 1979]

Un problème appartient à la classe NP-complet s'il appartient à la classe de problèmes NP et si tout problème de NP peut être plunomialement réduit en ce problème.

Les problèmes *NP-complets* sont donc des problèmes essentiels pour la résolution des problèmes dans NP. Car tout algorithme polynomial sur une machine de Turing déterministe pour un problème *NP-complet* trouvé peut être adapté pour résoudre en temps polynomial tout problème dans *NP*. Mais vu que $P \neq NP$, toute résolution exacte d'un problème *NP-complet* passe donc par l'utilisation d'un algorithme polynomial sur une machine de Turing non déterministe. Cela suppose l'utilisation d'un algorithme "exponentiel" qui consomme des ressources (temps et espace mémoire) de manière non polynomiale. De ce fait, pour des applications industrielles de grandes tailles, il est courant d'utiliser d'autres méthodes de résolution. Dans le paragraphe suivant, nous présentons les différentes méthodes d'optimisation incluant les méthodes exactes et les méthodes approchées.

5.3.2. Méthodes d'optimisation

Pour résoudre un problème d'optimisation, il existe plusieurs types d'approche. Une méthode exacte est un algorithme qui permet l'obtention d'au moins une solution optimale du problème à résoudre. Une fois une solution optimale obtenue, l'algorithme doit également être capable d'en prouver l'optimalité, ce qui peut parfois être tout aussi difficile à faire que d'obtenir cette solution. Ce type d'algorithme nécessite généralement un temps d'exécution important et/ou d'importantes ressources mémoires sur des instances de grande taille. La complexité de ces algorithmes est donc souvent trop importante pour qu'ils puissent être appliqués sur des problèmes comprenant de nombreuses variables et/ou contraintes. Sans rentrer dans le détail, nous pouvons citer quelques approches exactes classiques utilisées en recherche opérationnelle (la programmation linéaire ; la programmation dynamique ; les méthodes de séparation et évaluations ; les approches polyhédrales). Dans la suite de ce mémoire, nous revenons sur la programmation linéaire.

5.3.2.1. Programmation Linéaire

Lorsque les contraintes et la fonction objectif du problème à résoudre peuvent s'exprimer sous la forme d'équations linéaires, l'utilisation d'outils génériques issus de la programmation mathématique peut être envisagée. Nous distinguons trois types de programmes linéaires : les programmes linéaires simples, les programmes linéaires en nombres entiers, et les programmes linéaires mixtes. Tous ces programmes font intervenir des équations et /ou inéquations linéaires ainsi que des variables de manière linéaire.

Pour les programmes linéaires simples, lorsque l'ensemble des variables nécessaire à l'expression du problème sont "continues", le problème peut être efficacement résolu par la méthode du simplexe ou la méthode du point intérieur. La méthode du point intérieur est polynomiale, la méthode du simplexe est exponentielle dans le pire des cas. En pratique, la méthode du simplexe est plus performante et plus répandue dans les outils de résolution.

Lorsque les variables nécessaires à l'expression du problème sont entières, on parle de programmes linéaires en nombres entiers (PLNE). Vu que le nombre de solutions possibles est fini, ces programmes peuvent paraître plus simples que les précédents. Pourtant, c'est ce type de problème qui est le plus difficile à résoudre. D'ailleurs, certains programmes linéaires en

nombres entiers sont reformulés (sous certaines réserves et sous certaines conditions) en programmes linéaires simples.

Lorsque certaines variables nécessaires à l'expression du problème sont entières, on parle de programmes linéaires en nombres entiers mixtes (MILP). Il n'existe pas d'algorithme polynomial permettant de résoudre ce modèle (ce qui n'implique pas forcément que le problème modélisé soit *NP-Difficle*). D'un point de vue résolution, ces programmes linéaires ressemblent fortement au programme linéaire en nombre entiers et on ne retient en général que la taille du sous problème en nombre entiers pour mesurer la taille du problème mixte. Des méthodes génériques basées sur des techniques de coupe et branchement sur les valeurs possibles des variables existent (Ilog Cplex, Xpress-MP…) et permettent suivant les problèmes à résoudre des instances de taille « moyenne ».

5.3.2.2. Les Heuristiques et les Métaheuristiques

Lorsque l'algorithme utilisé ne permet pas nécessairement d'obtenir une solution optimale du problème, la méthode est appelée méthode approchée ou heuristique. Ce genre d'approche est souvent adapté au problème à résoudre, et elle permet généralement la génération d'une solution réalisable de bonne qualité en des temps de calcul peu importants et en nécessitant également qu'une charge mémoire limitée. L'expression « de bonne qualité » signifie ici que l'algorithme permet de trouver une solution de valeur assez proche de la valeur optimale du problème. Les heuristiques sont très utiles pour traiter les problèmes de grande taille, ou encore pour générer des solutions rapidement dans un contexte spécifique, tel que les applications en temps réel.

Les algorithmes constructifs ou les heuristiques de construction sont des exemples classiques de ce type d'approche. Ils procèdent par construction progressive de la solution : à chaque étape, une nouvelle partie de la solution est construite. Ces algorithmes sont à la base de nombreuses heuristiques dédiées. Certains algorithmes constructifs sont optimaux, citons par exemple le problème de sous-arbre de poids minimum pour lequel l'algorithme de [Kruskal, 1956] offre une solution optimale. De nombreuses familles d'algorithmes constructifs existent. Citons les algorithmes gloutons, les méthodes de listes, ...etc. Devant la limite des résultats des heuristiques pour certains problèmes, d'autres approches communément appelées métaheuristiques sont apparues. Une métaheuristique peut être perçue comme un processus incluant souvent plusieurs heuristiques. Elle les guide vers une solution proche d'une solution

optimale du problème à l'aide de différentes stratégies pour utiliser l'information générée au cours de la recherche. Elle permet aussi d'éviter que le processus ne reste bloqué dans ce qui est appelé un optimum local. Une des particularités des métaheuristiques est qu'elles sont souvent générales et adaptables à de nombreux problèmes, alors qu'une heuristique est plus spécifique à un problème donné. Parmi les métaheuristiques les plus connues, nous citons La recherche tabou ; Le recuit simulé ; La recherche dispersée ; Les algorithmes génétiques ; etc.

6. Conclusion

Cette thèse, dont les travaux associés sont présentés dans ce document, a fait l'objet d'un financement par la chaire OCP d'optimisation industrielle Porté par « l'EMINES - School of Industrial Management », rattaché à l'Université Mohamed VI Polytechnique. À ce titre, elle a été réalisée au sein d'un laboratoire de recherche ainsi qu'une entreprise, en l'occurrence respectivement le LIMOS et le groupe OCP SA. De par cette caractéristique, lui a été associé un objectif industriel correspondant à la réalisation d'un outil d'aide à la decision pour la planification de la chaîne logistique interne de l'OCP –Maroc Phosphore : Axe engrais-. Cette dernière entité, responsable de la production, ainsi que de la distribution des engrais du groupe OCP, est, en effet, soumise à un environnement complexe nécessitant la mise en oeuvre de processus de pilotage clairement établis, tel que celui relatif à l'affectation long, moyen et court termes des productions. Celui-ci a pour but de définir, sur chaque horizon, les entités au sein desquelles seront fabriqués les différents éléments du portefeuille des produits fértilisants actuels et futurs, ainsi que les espaces de stockage et les quais de distribution des engrais à affecter à ces produits. Outre cet aspect relatif aux affectations, ce processus de décision est également soumis à un nombre important de paramètres, telles que des contraintes opérationnelles de durée minimale de séjour dans les espaces de stockage, ou encore des contraintes relatives à la contamination des engrais dans les espaces de stockage. À ces éléments s'ajoute la prise en compte de la capabilité des lignes de production d'engrais ainsi que des contraintes liées au changement du taux de production de ces lignes, c'est-à-dire la prise en compte de la variation de la consommation de la capacité de chacune des lignes de production en fonction de la famille de produits/produits fabriqués lors de la période considérée de l'horizon de planification.

La réalisation d'un tel outil d'aide à la decision nécessite des modèles et des méthodes adaptés à ce problème, et ceci afin de répondre à l'objectif industriel. Compte-tenu de ces

éléments, nos travaux se rattachent à la thématique de la planification de la chaîne logistique, ainsi que de la modélisation / simulation de cette chaîne. Ces différents axes de recherche ayant fait l'objet d'un nombre important d'études et de publications, il apparaît important d'en dresser un bon aperçu afin de les comparer à nos travaux, et ainsi d'identifier la valeur ajouté de ces derniers ; cet aspect faisant l'objet du chapitre suivant.

Chapitre II : Planification de la production - état de l'art

Ce chapitre constitue une revue de la littérature vis-à-vis de la thématique de la planification de la production à laquelle ont été rattachés nos travaux de recherche. Une thématique qu'il s'agit de définir ici, tout comme les critères de classification associés. Elle présente différentes études relatives au problème posé par la planification dans divers contextes. Plus précisément, le cadre déterministe et le cadre incertain, ainsi que l'aspect de l'intégrité des différents niveaux de planification. Partant de cet état de l'art, ce chapitre permet également de démontrer l'impossibilité d'utiliser les modèles existants pour répondre à la problématique adressée dans le cadre de ces travaux de recherche. Il a également pour objectif de mettre en véracité l'apport de nos travaux.

Sommaire

Chapitre II : Planification de la production - état de l'art 73
1. Introduction 75
2. Critères de classification des problèmes de planification 76
2.1. Les niveaux de décision 76
2.2. Le domaine de la planification 76
2.3. Le type d'approche de modélisation 77
2.4. La nature de la demande 78
2.5. L'approche de résolution 78
2.6. Le nombre de produits 79
2.7. Les contraintes de capacité ou de ressource 79
3. Méthodes et outils de planification dans un contexte déterministe 80
3.1. Modèles de planification stratégique 81
3.1.1. Aggregate production planning (APP) 82
3.1.2. Sales and Operations Planning (S&OP) 89
3.2. Le processus de planification tactique 95
4. La planification dans un environnement incertain 101
4.1. Incertitude : Définition et classification 101
4.2. Modèles de planification sous incertitude 102
4.2.1. Modèles conceptuels 103
4.2.2. Modèles analytiques 103
4.2.3. Modèles d'intelligence artificielle 105
4.2.4. Modèles de simulation 106
4.2.5. La planification de la production agrégée sous incertitude 107
5. La planification intégrée 110
6. Positionnement de nos travaux et conclusions 115
7. Conclusion 117

Liste des figures

Figure 2. 1- Le PIC et les fonctions de gestion industrielle [Genin et al., 2005] 82
Figure 2. 2- Schématisation du processus de planification stratégique 90
Figure 2. 3- Les descripteurs S&OP (à partir de [Thomé et al., 2012]) 92
Figure 2. 4- Schématisation du processus de planification tactique 95
Figure 2. 5- Stratégies de résolution du problème intégré de planification et d'ordonnancement 112
Figure 2. 6- Approche par intégration de contraintes opérationnelles [Dauzère Pérès et Lasserre 1994] 114

1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est d'offrir dans un premier temps une vision globale et transversale des travaux de recherche les plus pertinents pour notre étude, de présenter ensuite les principales méthodes qui nous aideront à résoudre notre problème, et enfin, d'identifier les opportunités de recherche dans la littérature existante. Ainsi, cette revue de littérature permet de mieux positionner la thèse par rapport à la recherche actuelle et d'expliciter les principaux aspects originaux de nos travaux.

Ce chapitre est destiné à présenter l'état de l'art des travaux rattachés, exposés lors du précédent chapitre, à la thématique et les problèmes de planification de la production rencontrés dans l'industrie. Cette dernière a fait l'objet d'un nombre relativement important de recherches [Pochet, 2001] [Stevenson et al., 2005]. L'analyse de l'état de l'art permettra d'identifier les différentes problématiques considérées, les méthodes et outils employés pour résoudre ces problèmes, et leurs applications dans les deux contextes certain et incertain, et ceci selon plusieurs axes :

- Les modèles et les méthodes d'optimisation dédiée à la planification stratégique ;
- Les modèles et les méthodes d'optimisation dédiée à la planification tactique ;
- Les modèles et les méthodes d'optimisation dédiée à la planification opérationnelle ;
- L'approche intégrée de la planification ;

Dans ce contexte, et afin de comparer les problèmes traités dans la littérature, nous définissons, dans la partie suivante (§2) les différents critères de classification des travaux antérieurs. La troisième partie (§3) est, quant à elle, dévolue à l'étude des différents modèles de la planification dans un contexte certain tandis que la partie suivante (§4) les aborde dans un environnement incertain. La cinquième partie (§5) présente, enfin, l'approche intégrée de la planification. Pour conclure, nous effectuons une synthèse des études antérieures nous permettant de positionner nos travaux de recherche et d'affiner la problématique traitée de sorte à mettre en exergue les contributions de notre travail.

2. Critères de classification des problèmes de planification

La littérature concernant les modèles de planification apparaît comme étant très conséquente. On peut à cet égard citer les états de l'art suivants [Melo et al., 2009] [Mula et al., 2014] [Stevenson et al., 2005]. Certains de ces articles proposent des classifications utilisant différents critères [Mula et al., 2014] [Karimi et al., 2003], dont nous présenterons une synthèse par la suite.

2.1. Les niveaux de décision

Les problèmes de la planification de la production peuvent être décomposés en fonction des horizons temporels considérés. Plusieurs auteurs, tels que [Anthony, 1965], [Min et Zhou, 2002] et [Gupta et Maranas, 2003] distinguent les problèmes de planification de la production selon trois niveaux ; stratégique, tactique et opérationnel. Certains travaux traitent l'intégration de deux niveaux de décision, qui a attiré aussi l'attention de plusieurs auteurs. [Dauzère-Pérès et Lasserre, 1994] ont été les premiers à développer un modèle et une méthode de résolution pour le problème global de planification et d'ordonnancement. Dans cet état de l'art, nous nous intéressons à la planification de la production dans les deux niveaux stratégique et tactique.

2.2. Le domaine de la planification

Comme souligné dans le premier chapitre, il existe différents termes utilisés pour désigner les problèmes de planification. Ainsi, on retrouve dans la littérature cinq types de problèmes étudiés [Mula et al., 2006] [Mula et al., 2014] :

- La planification des besoins matières basée sur la méthode *Material Requirement Planning (MRP)* qui est utilisée par les entreprises [Vollmann et al., 1988].

- L'élaboration du *Plan Directeur de Production* (*PDP*) en anglais *Master Production Schedule (MPS)* [O'Grady, 1982] qui vise à établir un plan de production optimal qui répond aux commandes des clients et qui fournit les quantités de produits finaux à fabriquer en minimisant les différents coûts associés. Le MRP et le PDP (MPS) sont considérés comme des problèmes que l'on qualifie de mono-site.

- La planification de la chaîne logistique ou *Supply Chain Planning* (*SCP*), et plus particulièrement *Sales and Operations Planning* (*S&OP*) compte tenu du fait que

la question de l'intégration et la coordination entre les différentes maillons de la chaîne (fournisseurs, fabricants et distributeurs) est devenue très importante ces dernières décennies [Gupta et Maranas, 2003].

- La planification hierarchisée ou le problème *Hierarchical Production Planning (HPP)* [Hax et Meal, 1975], qui décompose le problème global de la planification de la production en un certain nombre de sous-problèmes correspondant aux différents niveaux d'une hiérarchie de plans.

- Le problème de la planification industrielle et commerciale et de l'élaboration du PIC ou *Aggregate Production Planning (APP)* [Hax, 1975] qui détermine simultanément la production, le stock et les niveaux de main-d'œuvre nécessaires, tout en minimisant les coûts totaux pour répondre aux besoins fluctuants de la demande sur un horizon de planification fondé sur l'existence d'un agrégat en quantité, en volume, en temps de fabrication ou en valeur économique.

2.3. Le type d'approche de modélisation

Stochastique vs. Déterministe. Il existe un nombre relativement important de travaux de recherche ayant abouti à plusieurs grandes approches destinées à modéliser les problèmes de la planification de la production. Ces approches peuvent être classées aussi en deux catégories principales :

- L'approche stochastique qui est fréquemment utilisée dans le but de résoudre des problèmes de planification dans un contexte incertain [Mula et al., 2006] [Peidro et al., 2009], et qui se base sur la programmation stochastique [Birge et Louveaux, 1997], la programmation floue [Zimmermann, 1991], l'optimisation robuste [Leung et al., 2006], et la programmation dynamique stochastique [Cristobal et al., 2009]. Ces quatre approches sont les plus utilisées lors de la modélisation de l'incertitude dans les problèmes de planification de la production [Sahinidis, 2004].

- L'approche déterministe, quant à elle, suppose que toutes les données nécessaires à la résolution des problèmes sont connues précisément, sur un horizon de planification divisé en périodes discrètes, et attribut aux produits une capacité à chaque période, tout en satisfaisant un ensemble de contraintes. La majorité des

travaux existants ont recours à des approches déterministes. Nous citons, à titre d'exemple, les travaux de [Da Silva et al. 2006] [Ramezanian et al. 2012] [Masud et Hwang. 1980] [Gulsun et al., 2009].

2.4. La nature de la demande

La demande est un paramètre important ayant un impact significatif sur les modèles de planification de la production et sa nature peut affecter leur complexité. Si les niveaux de la demande sont connus exactement, la demande est appelée déterministe. [Masud et Hwang. 1980] [Leung et Chan, 2009] [Leung et al., 2003] présentent des modèles destinés à résoudre le problème de planification de la production en considérant une demande déterministe. Pourtant, si la demande n'est pas connue exactement, on peut parler d'incertitude [Rosenhead et al., 1972]. Ces auteurs désignent par « certain », un environnement dans lequel l'intégralité des paramètres est connue précisément. Par opposition, une situation « incertaine » correspond, selon ces mêmes auteurs, à une situation durant laquelle les données ne sont pas connues précisément, mais également où aucune estimation quant à l'occurrence de la réalisation d'un certain nombre de scénarios ne peut être déterminée. Dans les modèles de planification de la production, l'incertitude est modélisée par l'utilisation des distributions de probabilité [Shi et al., 2011]des ensembles flous [Shen et Huang, 2010][Liang, 2007][Zhao et al., 2011], des approches stochastiques basées sur des valeurs stochastiques [Leung et al., 2006], ou de plusieurs scénarios et approches robustes [Wei et al., 2011].

2.5. L'approche de résolution

Plusieurs techniques de la recherche opérationnelle sont employées pour résoudre les problèmes de la planification de la production. On distingue deux types de méthodes [Elmaghraby, 1978] : les approches exactes et les méthodes approchées. Les approches exactes s'arrêtent après l'obtention d'une solution optimale, quels que soient les efforts déployés en termes de temps, de calcul et de mémoire requis. La programmation linéaire en nombres entiers (PLNE) et la programmation linéaire mixte (Mixed Integer Linear Programming – MILP) représentent les formes classiques des méthodes exactes, qui permettent de formuler les contraintes du problème et une fonction objectif afin d'optimiser une prise de décision. En plus de ces deux méthodes, nous trouvons aussi la programmation non linéaire, et la programmation stochastique pour formuler le problème dans un environnement incertain. [Sullivan et Fordyce, 1990] soulignent que les PLNEs peuvent nécessiter un temps très long pour générer les fichiers

de données d'entrée dans le logiciel de planification mathématique. Elles nécessitent aussi un volume important de mémoire indispensable pour stocker ces données. Ainsi, pour simplifier les problèmes, plusieurs méthodes approchées, à savoir les heuristiques et les méta-heuristiques, ont été développées [Williams, 1981] [Salomon et al. 1993]. Les heuristiques explorent uniquement des parties de l'espace et tentent de trouver une bonne solution réalisable de manière raisonnable. Parmi les heuristiques utilisées, nous trouvons les heuristiques lagrangiennes et les heuristiques de décomposition et d'agrégation. Les heuristiques lagrangiennes [Shi et al., 2011]s'appuient sur la relaxation des contraintes couplantes et incluent des approches de solutions itératives basées sur la relaxation lagrangienne. On trouve aussi les méthodes de décomposition [Denton et al., 2006] [Lang et al., 2011] qui divisent le problème initial en sous-problèmes, puis coordonnent les solutions obtenues, telles que les algorithmes itératifs et les heuristiques basées sur des programmes linéaires. Les algorithmes génétiques et certaines des techniques de recherche locale sont les méta-heuristiques les plus employées pour la résolution des problèmes de planification de la production [Jamalnia et Soukhakian, 2009] [Palaniappan et al., 2011].

2.6. Le nombre de produits

La complexité ne réside pas seulement dans le problème de la planification de la production, mais aussi dans sa modélisation, qui peut être influencée par le nombre d'articles fabriqués au sein du système de production. En termes de nombre de produits, nous considérons des modèles mono-produit [Chaturvedi et Bandyopadhyay, 2015][Nowak, 2013], où la production est prévue pour un seul produit final, ainsi que des modèles à multi-produits [Liang, 2007][Luis et al., 2016] qui fournissent la planification de la production de plusieurs articles, pouvant être des produits finis, des pièces ou des composants.

2.7. Les contraintes de capacité ou de ressource

Un système de production peut être caractérisé par des restrictions imposées par les ressources disponibles. Ces contraintes de capacité peuvent augmenter la complexité des modèles de planification de la production et leur résolution, tout en permettant la mise en œuvre de modèles plus réalistes. Nous distinguons les problèmes de planification à capacité infinie et à capacité finie. Nous identifions les contraintes liées à la limitation des stocks [Li et al., 2009] [Liu et Tu, 2008][Naeem et al., 2013], à la fourniture des pièces et des matières premières auprès des fournisseurs, ainsi que les ressources productives telles que les machines, la main-

d'œuvre et les moyens de transport [Baptiste et al., 2008] [Rizk et al., 2008]. Ces contraintes peuvent être incluses dans les modèles de manière isolée, ou en combinaison avec d'autres. [Liang, 2007] [Da Silva et al. 2006] [García et al., 2009] considèrent de façon simultanée les contraintes liées à la limitation des stocks et aux ressources productives.

3. Méthodes et outils de planification dans un contexte déterministe

Les travaux réalisés dans le cadre de cette thèse sont basés sur l'hypothèse que la structure de l'entreprise est connue. En d'autres termes, il s'agit d'une étude a posteriori d'un système de production existant. Les problèmes de conception de la chaîne logistique connus sous le terme « Supply Chain Network Design » sont supposés résolus. A ce sujet, le lecteur peut se référencer aux états de l'art de [Klose et Drexl, 2005] [Melo et al., 2009].

La planification industrielle met généralement en œuvre un grand nombre de décisions de natures variées (répartition des quantités à produire entre la production interne et les sous-traitants, définitions des niveaux de capacité, approvisionnement depuis les fournisseurs, etc.) qui sont soumises à de nombreuses contraintes (capacité de production, satisfaction des clients, délais de production et d'approvisionnement, etc.). Pour un décideur, il est difficile de maîtriser l'ensemble de ces leviers décisionnels et les contraintes associées. Devant l'étendue et la complexité de ces décisions qui constituent un processus de gestion de la production, le recours à une structure hiérarchisée devient inéluctable. L'architecture décisionnelle d'une entreprise est alors divisée en trois niveaux de décision correspondant à des horizons à long, moyen et court termes. Cette approche hiérarchisée décompose le problème global en une succession de sous-problèmes, et par la suite cherche à réduire le nombre de variables pour chaque niveau de décision [Lopez, 1991]. La performance des systèmes industriels dépend assurément des trois niveaux de planification. Néanmoins, les gains ou les pertes de performance ne sont pas générés par ces niveaux de manière identique.

Ces trois niveaux de décision se basent sur des niveaux de détail, des horizons de temps et de quantités de production différents. Plus le niveau de décision est élevé, plus l'horizon de temps est long, et plus les données et les modèles associés sont agrégés [Giard, 2003]. Cette approche hiérarchisée simplifie d'une part le processus de décision, puisque chaque niveau de décision correspond à différents décideurs dans l'entreprise, mais pose d'autre part des

problèmes de cohérence entre les acteurs des différents niveaux. Les décisions prises à un niveau deviennent des contraintes à satisfaire par les niveaux inférieurs [Wolosewicz, 2008].

De nombreux chercheurs et industriels accordent de l'importance aux différentes méthodes mathématiques comme celles liées à la recherche opérationnelle et à l'optimisation. Ces méthodes vont permettre aux décideurs d'envisager et de sélectionner différentes solutions avant d'en choisir une. Ce constat étant largement partagé au sein de la communauté scientifique, de nombreuses recherches ont été menées afin de proposer des méthodes de résolution et d'aide à la décision pour des problèmes relatifs à la planification. Les premières recherches se situaient dans un environnement déterministe qui suppose que toutes les données nécessaires à la prise de décision sont connues.

3.1. Modèles de planification stratégique

Le schéma de la Figure 2.1 représente la place de la planification stratégique dans le cadre de la gestion et du pilotage d'une entreprise [Genin et al., 2005]. Ce schéma montre que la finalité de la planification stratégique est l'élaboration du PIC en vue d'assurer les ressources nécessaires sur le long terme et ainsi de permettre la détermination d'un Programme Directeur de Production (PDP). Le PDP donne les volumes de fabrication des produits finis pour chaque période sur l'horizon de planification. Il s'établit dans une maille temporelle plus fine que le PIC et constitue donc le résultat de la planification détaillée. Il joue un rôle fondamental dans le fonctionnement d'un système intégré de planification et de contrôle de la production et des stocks, en se plaçant comme le lieu où s'établit à chaque période l'équilibre entre les ressources de l'entreprise et la demande à satisfaire.

Le positionnement et le périmètre du PIC dans la hiérarchie des décisions de planification peuvent varier selon l'étude établie et le contexte défini. Ainsi les frontières entre les trois niveaux de décision peuvent différer selon le contexte d'étude. Pour [Genin et al., 2001] le PIC se situe entre les deux niveaux stratégiques et tactiques, et permet ainsi d'adapter le système productif et logistique au marché pour anticiper l'évolution des ventes d'une famille de produits. Généralement l'horizon du PIC peut varier de six mois à plusieurs années et le niveau de détails est celui de la famille de produits. Néanmoins, ces deux paramètres peuvent différer selon le contexte d'étude. A titre d'exemple, dans [Kok et al., 2005], le PIC est étudié au niveau du produit final.

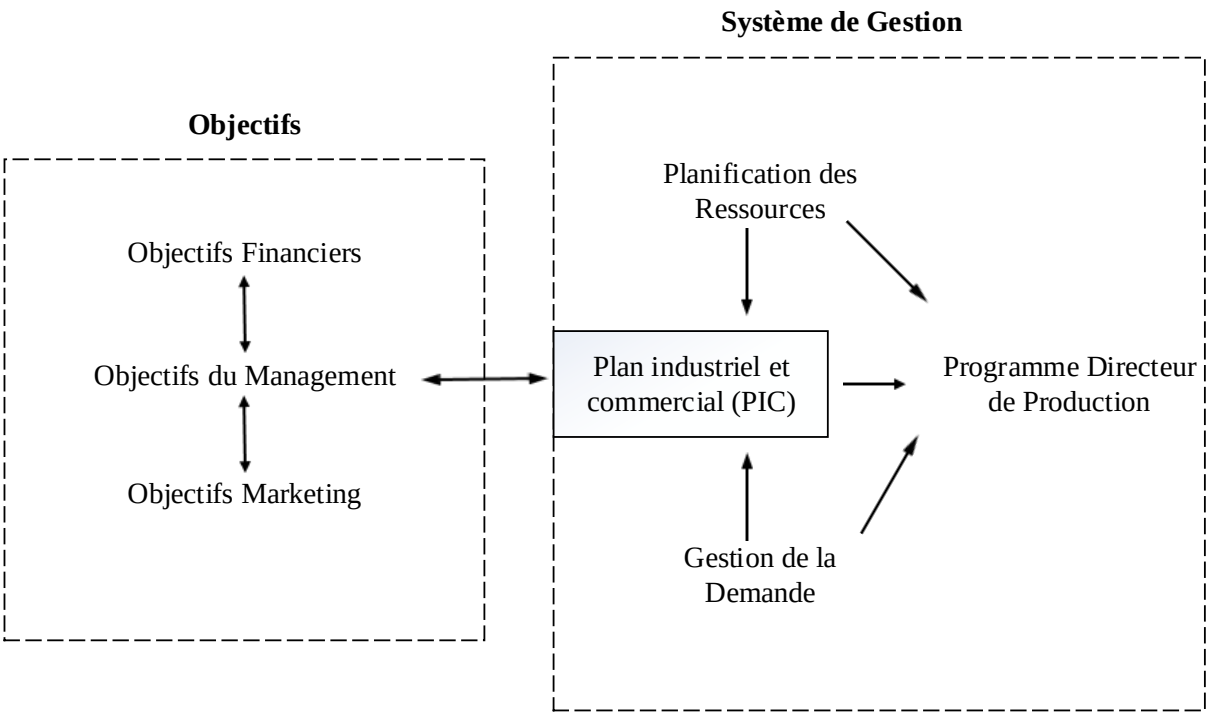


Figure 2. 1- Le PIC et les fonctions de gestion industrielle [Genin et al., 2005]

Comme nous l'avons mentionné dans le premier chapitre, on retrouve les termes « Aggregate production planning (APP) » et « Sales & Operation planning » dans la littérature scientifique pour définir le processus de planification stratégique. Ainsi, à la suite de cette partie du chapitre, les travaux liés à l'APP et le S&OP sont présentés séparement.

3.1.1. Aggregate production planning (APP)

Dans les systèmes de fabrication, de planification et de contrôle (Manufacturing, Planning and Control (MPC)), la planification de la production globale ou agrégée (Aggregate production planning (APP)) a attiré une attention considérable des deux communautés : à la fois de la part des praticiens et de celle du monde universitaire [Shi et Haase, 1996]. Depuis les travaux pionniers de [Holt, Modigliani et Simon, 1955], [Holt, Modigliani et Muth, 1956], et de [Bowman, 1956] les chercheurs ont mis au point différentes méthodes pour pouvoir traiter ce problème. Pour mettre en œuvre le processus APP, il est d'abord nécessaire de regrouper toutes les familles de produits dans un seul ou plusieurs produits agrégés ou bien de substitution. En utilisant ce(s) produit(s) agrégé(s) comme intrant, diverses techniques d'APP peuvent ensuite être utilisées pour assurer, à un niveau global, l'existence des ressources et capacités suffisantes pour satisfaire les différents niveaux de la demande sur différentes périodes de l'horizon de planification [McGarrah, 1983] [Silver, 1972].

La planification de la production agrégée est probablement le domaine de planification le plus critique dans la conception des systèmes de production. L'objectif de l'APP est de fournir un moyen de traduire les prévisions de la demande en plans de ressources appropriés pour l'entreprise sur un horizon de planification souhaité. Il s'agit aussi de déterminer simultanément le taux de production, le niveau des stocks et les niveaux de capacité, tout en minimisant les coûts totaux pertinents (masse salariale, embauche/mise à pied, heures supplémentaires/sous-traitance, stocks/pénurie, etc.). Ainsi, cette planification est soumise à des contraintes non constantes et variables dans le temps [Taubert, 1968] [Schroeder et al., 1986] [Nam et Logendram, 1995] [Da Silva et al. 2006].

Dans la démarche employée pour établir des plans agrégés, le mot « agrégé » signifie que les plans sont préparés selon les différentes familles de produits. Celles-ci sont définies comme étant des regroupements de produits qui partagent des installations de fabrication et des temps de configuration communs. Comme il est habituellement impossible de prendre en compte tous les détails précis qui sont associés au processus de production ainsi que de maintenir un horizon de planification aussi long, il est souhaitable, voire obligatoire d'agréger les informations en cours de traitement. L'approche de la production globale est fondée sur l'existence d'une unité de production agrégée ou unité équivalente, comme l'item « moyen », ou en termes de poids, de volume, de temps de production ou de valeur monétaire. Les plans sont ensuite basés sur la demande agrégée pour un ou plusieurs items agrégés. Une fois le plan de production global généré, des contraintes sont imposées au processus de planification détaillée de la production qui détermine les quantités spécifiques à produire pour chaque item individuel.

La planification de la production agrégée est réalisée pour utiliser au mieux les ressources humaines et matérielles d'une entreprise, afin de répondre à la demande anticipée des clients. Il établit simultanément les niveaux de la production, du stock et d'effectifs optimaux sur un horizon de planification donné, afin de répondre à la demande totale de toutes les familles de produits qui partagent les mêmes ressources limitées [Buffa et al., 1972] [Hax, 1978] [Hax et Candea, 1984]. L'objectif est de réduire le coût global total de sorte à satisfaire une demande non constante tout en supposant une capacité de vente et de production fixe. Ce problème est particulièrement complexe dans les systèmes de production qui conçoivent plusieurs familles de produits différentes avec des demandes qui nécessitent le maintien d'un stock important.

En général, l'APP peut suivre une stratégie ou une combinaison de plusieurs stratégies (parmi les trois stratégies ci-dessous) pour répondre à la demande fluctuante [Buffa et al., 1972] [Mula et al., 2014]:

- Ajuster le taux de production par les heures supplémentaires / temps partiel ;
- Ajuster la main-d'œuvre par l'embauche et le licenciement ;
- Maintenir un niveau de production constant en absorbant les fluctuations de la demande par l'accumulation des stocks ou en permettant la perte des ventes ;

Comme la planification a lieu au niveau agrégé, il n'est pas nécessaire que l'APP fournisse pour chaque produit des besoins détaillés en ressources matérielles et en capacité tout comme des plannings détaillés pour les installations et le personnel. [Nam et Logendran, 1992] présentent un état de l'art et définissent l'APP comme un processus décisionnel qui vise à traduire les prévisions des ventes et la capacité de production prévue en plans de fabrication futurs pour une famille de produits dans laquelle les ressources humaines et matérielles d'une entreprise sont pleinement utilisées. C'est pour cette raison que le processus de planification globale a une importance économique en matière de décisions associées (à propos de la capacité et les niveaux de stocks nécessaires pour répondre à la demande prévisionnelle durant la période de planification). En effet, ces décisions ont un impact sur la performance de l'entreprise, c'est-à-dire la maximisation des profits. Ceci nécessite des informations complètes et précises sur : la capacité des machines, l'utilisation de la main-d'œuvre, les niveaux (stocks, stock de sécurité, sous-traitance, …), le temps (heures régulières/heures supplémentaires), et les coûts (de production, de stockage, des heures supplémentaires/ des heures chaumées, de sous-traitance, de pénurie, de ventes perdues, de panne, de rupture de stock, d'embauche, de formation et de licenciement).

Divers modèles ont été utilisés pour résoudre le problème de la planification agrégée (APP) dans le cadre de la planification stratégique. A cet égard, on peut citer les règles de décision basées sur une résolution successive de modèles linéaires simplifiés [Holt, Modigliani et Simon, 1955], [Holt, Modigliani et Muth, 1956], le modèle du problème général de transport [Bowman, 1956], la programmation dynamique [Kamien et Li, 1990], la programmation linéaire (la méthode la plus largement acceptée [Wang et Liang, 2005]), les heuristiques [Tadei, 1995], la simulation Gansterer, 2015, la programmation par objectif [Leung et al., 2003], l'analyse de micro-tableurs [Chien et Cunningham, 2000], l'optimisation multi-objectifs [Al-e-

hashem et al., 2011], les modèles de programmation linéaire floue [Wang et Fang, 2001] [Tang et al., 2000], les algorithmes génétiques (GA) [Fahimnia et al., 2012], et la programmation mixte en nombres entiers à critères multiples [Sillekens et al., 2011]. La plupart des modèles de planification globale tentent de trouver le plan le moins coûteux [Vollmann et al., 2005]. Cependant, d'autres problèmes peuvent être encore considérés. Lisser les niveaux de la main d'œuvre, baisser les niveaux des stocks ou assurer un taux de service élevé, sont généralement sous l'attention des gestionnaires. Par conséquent, la planification globale constitue un problème de prise de décision multicritères.

D'après [Holt, 1983], dans le domaine des modèles de planification/ordonnancement des systèmes de production-stockage, deux types de modèles peuvent être identifiés : *(i)* Des modèles statiques qui sont utilisés sur un horizon de planification défini, avec l'hypothèse que la demande est connue et déterministe ; *(ii)* Des modèles dynamiques qui tiennent compte d'un horizon de planification glissant (rolling) et indéfini, avec l'hypothèse que la demande est connue seulement sur un nombre de périodes de l'horizon de planification. Ainsi les décisions sont revues à chaque période lors du processus décisionnel en fonction de l'évolution de la demande.

La plupart des modèles de planification agrégés existants que l'on trouve dans la littérature possèdent les caractéristiques suivantes [Kim et Kim., 2001] : *(i)* elles essaient de minimiser une fonction objective représentant les « coûts totaux pertinents » (comme la production, les stocks, la pénurie, …) sur un horizon de planification fixe. Cette dernière est formulée sous la forme d'une fonction mono-objectif en programmation linéaire. *(ii)* Les contraintes habituelles utilisées sont les contraintes de stockage et de capacité [Leung et Chan, 2009]. La littérature sur les modèles de planification de la production globale qui ont été introduits au cours des quatre dernières décennies, ainsi que les différentes approches suivies (conceptuelles, analytiques, etc.) sont résumées dans [Cheraghalikhania et al., 2019][Mehdizadeha et al., 2018][Mula et al., 2006].

Dans [Da Silva et al. 2006], les auteurs présentent un modèle de programmation linéaire mixte en nombres entiers à critères multiples (Multiple Criteria Mixed Integer Linear Programming MCMILP), Le modèle a été développé dans le but d'optimiser trois critères de performance pour un ensemble de contraintes liées aux effectifs, à la production et aux stocks. Les critères de performance incluent : le profit, les commandes en retard et la variation de l'effectif. Afin d'améliorer son application dans la pratique, un système d'aide à la décision,

basé sur le modèle a également été conçu. Un problème similaire de prise de décision à critères multiples est adressé dans [Nowak, 2013], où l'auteur propose cette fois-ci une nouvelle approche du problème de la planification de la production globale. Celui-ci combine la programmation linéaire et la simulation intégrées dans une approche interactive. Les modèles de programmation linéaire sont utilisés pour générer des solutions initiales. Ensuite, des expériences de simulation sont effectuées afin de vérifier comment les fluctuations de la demande affecteront les résultats obtenus, et enfin, une procédure interactive est utilisée pour identifier la solution finale du problème. Au lieu de minimiser les coûts, trois autres critères sont pris en compte : la minimisation des stocks, la minimisation du volume de production sous-traité et la minimisation des fluctuations du taux de production.

Un autre modèle de programmation linéaire mixte en nombres entiers (MILP) à deux phases est proposé par [Ramezanian et al. 2012] pour la planification de la production agrégée. Le modèle concerne les systèmes multi-périodes, multi-produits et multi-machines avec des décisions de setup. En raison de la classe NP-difficile de l'APP, les auteurs ont implémenté un algorithme génétique et une recherche taboue pour résoudre ce problème. Dans ce sens, [Masud et Hwang. 1980] présentent aussi une formulation par objectifs multiples du problème de planification de production globale multi-produits et multi-périodes. Le modèle proposé permet d'évaluer individuellement des objectifs multiples conflictuels par l'application de trois méthodes de prise de décision à objectifs multiples. Ces trois méthodes sont la programmation par objectifs (Goal Programming), la méthode par étapes (Step Method) et la résolution séquentielle de problèmes à objectifs multiples (Sequential Multiple Objective Problem Solving). Leur but étant de maximiser la contribution au profit et de minimiser les changements de personnel et les investissements en stock. [Leung et al., 2003] présentent aussi un modèle de programmation par objectifs pour résoudre ce même problème sur plusieurs sites de l'entreprise. Trois objectifs principaux avec des valeurs cibles sont optimisés de façon hiérarchisée. Les trois objectifs sont la maximisation du profit, la minimisation des coûts liés à l'embauche et au licenciement des travailleurs, ainsi que la minimisation des pénalités dues à la variation des commandes suite aux changements des quotas d'importation par les pays importateurs. [Chen et Liao, 2003] traitent des méthodes de sélection de plans de production optimaux efficaces pour résoudre les problèmes de planification de la production globale impliquant des fluctuations de la demande de produits. Les auteurs commencent par proposer un nouveau modèle incorporant plusieurs critères de production, puis développent des stratégies de production simplifiées via le nouveau modèle. Des approches de prise de décision multi-

attributs (Multi-Attribute Decision Making : MADM) sont utilisées pour sélectionner la stratégie APP la plus efficace. En outre, différentes approches MADM d'évaluation de ces stratégies simplifiées sont comparées. Ensuite une analyse de sensibilité est effectuée sur les variations de pondérations subjectives attribuées aux critères.

[Ferland et al., 2004] proposent une méthode heuristique basée sur la recherche tabou pour résoudre le problème de la planification de la production dans une scierie. Cette méthode peut traiter les problèmes formulés sans simplifier les hypothèses. En outre, elle peut résoudre des problèmes plus complexes et de tailles plus importantes que les méthodes exactes. En plus de la flexibilité qu'elle offre, cette méthode permet de l'adapter facilement à d'autres problèmes de production. Plus récemment, [Akhil et Udatta, 2005] ont présenté des formulations basées sur la configuration nécessaire à la résolution des problèmes d'APP. Ces formulations supposent que la production puisse impliquer différentes machines effectuant des opérations similaires à des cadences différentes et que les équipements puissent être reliés entre eux pour former différentes lignes de production, tout cela dans un environnement de production où le processus est continu et où aucun stock en cours ne peut être conservé. En parallèle, ils ont défini les limites des modèles traditionnels d'APP basés sur des formulations utilisant les ressources qui considèrent l'hypothèse selon laquelle toutes les machines produisent à leur capacité maximale. De plus, il est possible qu'une machine qui exécute une opération particulière ne puisse pas être reliée à toutes les machines capables d'effectuer l'opération suivante. Ceci crée une restriction sur la disponibilité des machines pour la production. Pour ces auteurs, l'un des éléments-clés de la réussite de la mise en œuvre de la formulation basée sur la configuration est la génération des données d'entrée. Une mauvaise implémentation du modèle, générant un grand nombre de variables, peut rendre cette formulation intraitable. Dans ce sens, ils présentent et comparent plusieurs heuristiques pour générer ces données d'entrée et limiter le nombre de variables.

D'autre part, la prise en compte de tous les paramètres réalistes dans un modèle APP rend le modèle difficile à résoudre et sa solution non optimale. Par conséquent, il est nécessaire de trouver un compromis entre la sélection d'une approche non exacte avec une solution proche de l'optimale et d'un modèle exact avec une solution optimale. Évidemment, il est préférable d'utiliser un modèle exact avec une solution optimale. De nos jours, les méta-heuristiques sont largement utilisées en tant qu'approches quasi optimales pour la résolution de problèmes NP-difficiles, tels qu'un APP généralisé, etc. Pour cette raison, [Moghaddam et Safaei, 2006] examinent l'efficacité d'un algorithme génétique (GA) pour résoudre un problème APP

généralisé lié à une ressource unique, avec des conditions semi-réalistes dans lesquelles la plupart des paramètres réels sont pris en compte. Les résultats suggèrent que l'AG proposée vise à trouver des solutions quasi optimales dans un temps de calcul raisonnable. Dans le même sens, [Fahmnia et al., 2008] présentent une méthodologie basée sur un ensemble de stratégies permettant de modéliser le problème de la planification de la production agrégée, de nature combinatoire, lorsqu'il est optimisé avec des algorithmes génétiques. Ceci est fait en prenant en compte une multitude de contraintes de nature contradictoire et le critère d'optimisation - coût global, composé des coûts de production, de main-d'œuvre, des stocks et de la sous-traitance.

Même si tous les modèles APP cités dans la littérature ont démontré une bonne performance dans le domaine académique, cette performance n'existe pas dans la vie pratique. Selon [García et al., 2009], plusieurs raisons expliquent cette mise en œuvre rare du processus APP. Les modèles et les techniques développés ne reflètent pas exactement le processus APP dans le monde réel. L'hypothèse selon laquelle tous les produits sont homogènes et peuvent être facilement agrégés et l'hypothèse que la main-d'œuvre a le même niveau de compétence sont non réalistes. Dans la modélisation mathématique, les domaines fonctionnels tels que les ressources humaines, le marketing et la finance sont ignorés, les ventes prévues et les informations sur les coûts fournis par l'industrie ne sont pas précises, et enfin, les modèles mathématiques utilisés pour décrire le problème APP sont complexes.

Généralement, en raison des contraintes très complexes du problème d'APP, les solutions optimales exactes fournies par les méthodes d'optimisation traditionnelles peuvent très bien ne pas être réalistes. Il est vrai qu'un certain nombre d'approches de l'intelligence artificielle combinées avec des modèles de programmation mathématique ont été utilisés pour résoudre le problème d'APP [Mula, 2004], mais peu d'attention a été accordée à la considération marquant la différence entre un traitement académique pur du problème APP, et un résultat avec des implications pratiques et réelles.

Les travaux pionniers sur le APP réalisés par Holt, Modigliani, Muth et Simon (HMMS) au début des années 1950 ont forgé les bases de changement dans les paradigmes de la gestion des opérations, et ont initié ce qui est désormais connu sous le nom de S&OP (Sales & Opérations Planning). Initialement, leurs travaux étaient décrits comme une « étude de la prise de décision sous incertitude » dans le contexte de prévisions inadéquates, d'une demande fluctuante pour de multiples produits et de déséquilibres entre les plans de production au niveau agrégé et au niveau des produits. Cette étude a généré des gains économiques substantiels pour

les entreprises participantes. Cependant, le résultat le plus important a été que des fonctions de gestion apparemment sans lien sont apparues dans le cadre d'un nouvel environnement de planification de la production intégrée visant à harmoniser l'offre et la demande de l'entreprise. Conceptuellement, le S&OP est passé de la planification de la production globale (APP) au début des années 1950 à la MRP II au milieu des années 1980 [Thomé et al., 2011]. Il a évolué en un processus commercial qui aligne les ventes et la production au sein d'une entreprise et dans la chaîne logistique [D'Amours et al., 2008]. De ce fait, le processus S&OP occupe une place centrale dans la gestion de la chaîne logistique.

3.1.2. Sales and Operations Planning (S&OP)

Il est important de rappeler que dans la littérature anglo-saxonne plusieurs termes sont utilisés pour définir les objectifs liés au PIC. Ainsi, on retrouve dans la littérature le terme S&OP (Sales and Operations planning) [Jan Olhager, 2013]. La définition de la planification des ventes et des opérations (S&OP) a été récemment documentée dans le dictionnaire APICS (2002). Il est considéré comme étant un processus d'élaboration des plans tactiques permettant à l'entreprise de diriger ses activités d'une manière stratégique pour obtenir un avantage concurrentiel permanent en intégrant des plans marketing axés sur le client. Ce processus regroupe tous les plans de l'entreprise (ventes, marketing, développement, fabrication, achats et finances) en un ensemble intégré de plans. Il est effectué au moins une fois par mois et est examiné par la direction au niveau agrégé (famille de produits). C'est l'énoncé définitif des plans de l'entreprise à moyen terme couvrant un horizon suffisant pour planifier les ressources et soutenir le processus annuel de planification des activités. Exécuté correctement, le processus de planification des ventes et des opérations lie les plans stratégiques de l'entreprise à son exécution et examine les mesures de performance pour une amélioration continue.

Ce processus S&OP est encore utilisé par de nombreux chercheurs et praticiens aujourd'hui. Le lien entre les fonctions ventes et opérations, ainsi que son importance dans la performance organisationnelle sont abordés par [Wahlers et al., 1994] et [Thomé et al., 2012]. Ils supposent que le lien entre les fonctions ventes et opérations peut être établi par des facteurs concurrentiels et des mesures de performance. L'objectif recherché en liant ces deux plans de vente et de production est d'équilibrer la demande et la capacité de production. Pour atteindre cet objectif, il existe deux types de décisions de planification. La première tente de modifier le plan de vente pour répondre aux contraintes de production (appelée aussi approche « agressive »). La seconde, quant à elle, adapte la production pour satisfaire la demande en

fonction du plan de vente (appelée aussi approche « réactive ») [Krajewski et Ritzman, 1996]. Dans [Olhager et al., 2001], les auteurs discutent l'approche réactive du S&OP selon laquelle les capacités de production sont modifiées pour correspondre à la demande. À cette fin, ils ont considéré le S&OP comme une stratégie de planification à long terme de la production en relation avec les ventes, les stocks et/ou les retards de production, la planification de la demande, ainsi que la planification de la capacité des ressources. Ils ont également établi les liens et les interactions du S&OP avec les stratégies de gestion de la capacité à long terme. Selon ce postulat, le rôle du S&OP est de maintenir un bon équilibre entre l'offre et la demande et de fournir des signaux d'alerte précoces lorsqu'ils deviennent déséquilibrés [Vollmann et al., 2005].

Une variété de définitions place le S&OP à différents niveaux dans la hiérarchie de la planification. Certains auteurs l'associent au niveau de planification hiérarchique le plus élevé des systèmes de planification et de contrôle de production. Selon [Olhager et al., 2001], [Olhager et Rudberg, 2002] et [Olhager et Selldin, 2007], le S&OP est visualisé comme un outil de planification à long terme, non seulement pour la production mais aussi pour les ventes, la prévision de la demande et la planification de la capacité des ressources.

Le S&OP anticipe l'évolution des ventes des familles de produits afin d'adapter les opérations et le système de la chaîne d'approvisionnement à son marché. A ce niveau, les capacités budgétaires vont être prises en compte. Le S&OP contrôle la trésorerie, les stocks, la main-d'œuvre, et la disponibilité des capacités afin de transformer les ventes et les objectifs stratégiques (parts de marché ...) en activités réalisables. Il met en pratique les objectifs stratégiques établis par la direction lors du traitement du plan stratégique. Comme le système d'exploitation n'est pas suffisamment flexible pour suivre les changements de ventes journalières, des ajustements sont nécessaires à ce niveau de planification. Les ventes sont des données incertaines, subissant des variations rapides et imprévisibles. Si la demande pouvait être exactement prévue, la charge de travail sur les ressources devrait réagir de la même manière, mais le nombre de machines est fixe, la formation du nouveau personnel prend du temps et les négociations avec les fournisseurs ont un impact sur les délais et les quantités produites. L'entreprise doit savoir comment ces capacités de production peuvent suivre les fluctuations des volumes de ventes.

Ce processus S&OP a pour but d'équilibrer les besoins et les ressources de façon à assurer le service-client au niveau requis. Également nommé équilibrage, ce processus exploite une

agrégation des informations et fournit des résultats qui permettent aux entreprises de prendre leurs décisions sur un horizon déterminé, généralement d'un an à cinq ans, en fonction de la gestion de la demande et des technologies de production. Ce procédé agit aussi bien sur les ressources que sur la demande (arbitrages de ventes, actions commerciales) et sur les règles de pilotage (normes, taux de service…). Il suit les étapes du schéma de la Figure 2.2

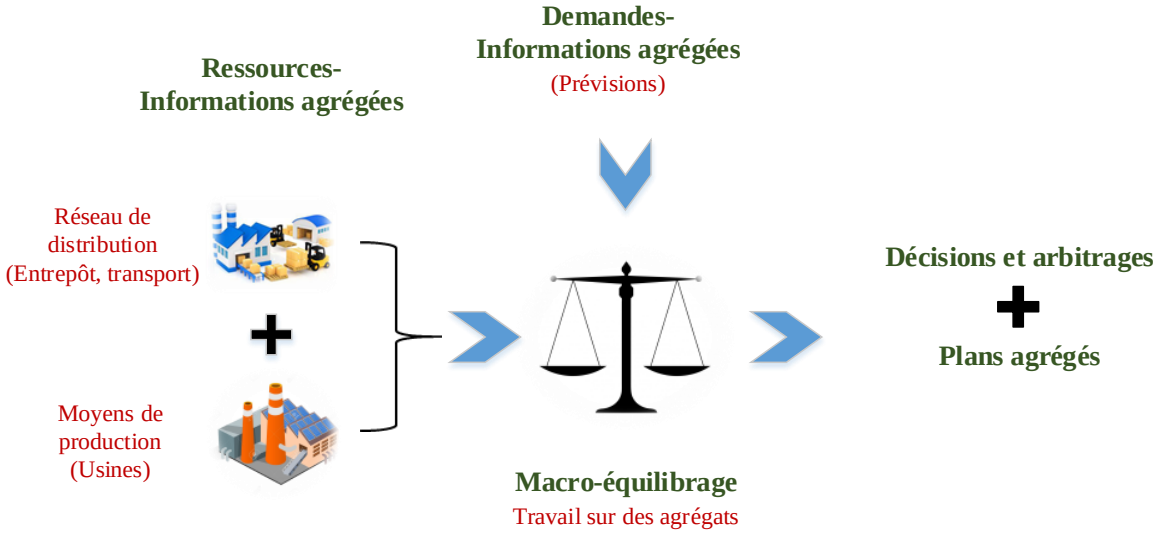


Figure 2. 2- Schématisation du processus de planification stratégique

[Thomé et al., 2012] proposent une revue systématique de la littérature existante qui repose sur un cadre de synthèse de recherche regroupant les descripteurs S&OP dans les grands domaines de l'information contextuelle, des intrants, de la structure et des processus, des objectifs et des résultats (présentés dans la Figure 2.3). Ainsi ils étudient l'impact du S&OP spécifiquement sur plusieurs dimensions de la performance de la fabrication (qualité, livraison et flexibilité), plutôt que sur la performance de l'entreprise en général. Additionnellement [Grimson and Pyke, 2007] présentent aussi une revue de la littérature sur le processus S&OP et jugent que ce processus est facile à comprendre mais qu'il peut être très difficile à mettre en œuvre. [Thomé et al., 2012] et [Grimson and Pyke, 2007] décrivent la structure et les processus du S&OP à travers quatre dimensions de base. Premièrement, la réunion et la collaboration qui regroupent les participants et favorisent la confiance, l'engagement et la régularité. Deuxièmement, les aspects organisationnels qui comprennent l'autonomisation et le degré de formalisation dans le processus S&OP (équipes, nombre d'étapes et l'ordre du jour). Troisièmement, la technologie de l'information qui se subdivise en systèmes, logiciels, modèles et simulations. Et enfin, les mesures qui s'appliquent à la fois aux performances de l'entreprise et à l'efficacité du processus S&OP. Du point de vue de l'alignement vertical, les structures et les processus sont situés au-dessous des plans d'activités et de la planification stratégique de

l'entreprise, mais au-dessus des opérations. Les résultats regroupent la cinquième dimension du cadre de [Grimson and Pyke, 2007] et consistent en l'intégration des plans des opérations, du marketing, des ventes et des finances. L'objectif du système est l'optimisation du profit. Les intrants du processus S&OP sont les plans provenant de différents domaines fonctionnels et des contraintes liées principalement au financement (budgets) et aux opérations (capacité de production). Il existe également une grande variété de moteurs ou d'objectifs S&OP, tels que la réduction des stocks, l'amélioration des prévisions, l'équilibre entre l'offre et la demande, l'intégration des plans intra et inter-entreprises et l'amélioration des résultats via l'optimisation des revenus et des profits.

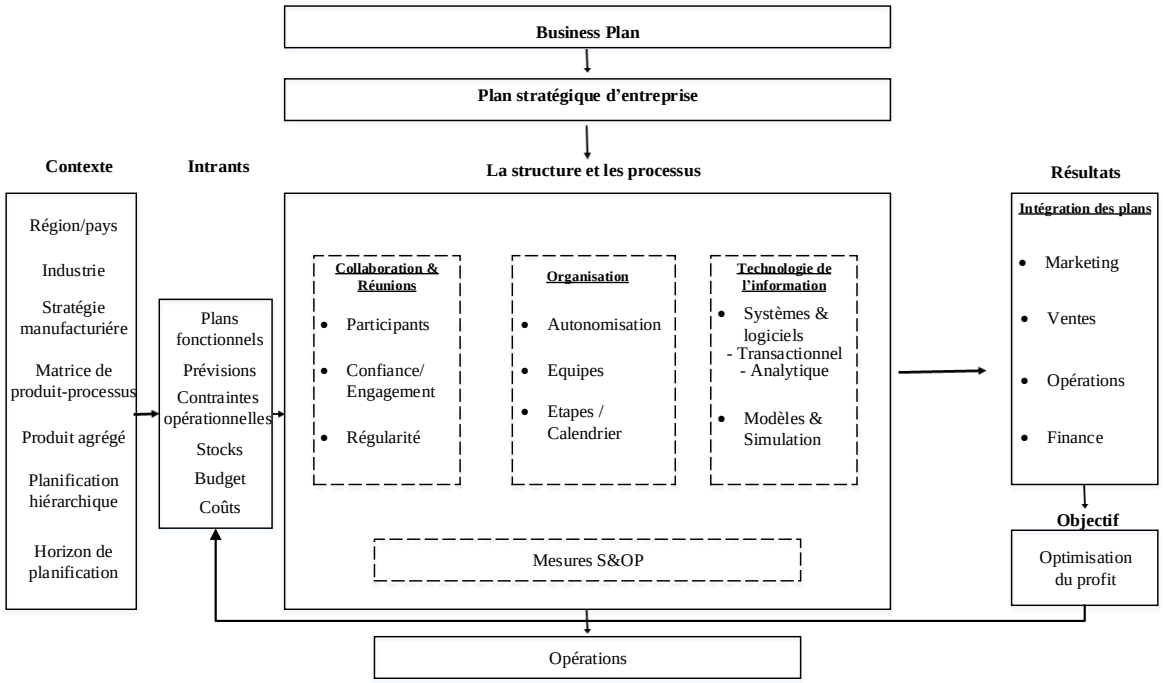


Figure 2. 3- Les descripteurs S&OP (à partir de [Thomé et al., 2012])

[Tuomikangas et Kaipia, 2014] définissent le S&OP comme un outil important favorisant la coordination entre les fonctions et les organisations, ainsi qu'entre la planification stratégique et opérationnelle. Un cadre de coordination S&OP a été, à ce sujet, proposé. Ce cadre est composé de six mécanismes de coordination : le processus S&OP, l'organisation S&OP, les outils et données S&OP, la gestion des performances, l'alignement stratégique et la culture et le leadership S&OP. Pour les entreprises, le S&OP semble posséder deux facettes : une première, constituée de procédures formelles, les plannings, les données et la performance, et une deuxième, constituée d'une culture commune, l'engagement, la confiance et la collaboration. [Kathuria et al., 2007] donnent leur point de vue à propos des deux perspectives de l'alignement vertical et horizontal. L'alignement vertical fait référence à la configuration des

stratégies, des objectifs, des plans d'action et des décisions à tous les niveaux de l'organisation. L'alignement horizontal, lui, peut être défini en termes d'intégration inter-fonctionnelle et intra-fonctionnelle. L'intégration interfonctionnelle implique la cohérence des décisions entre les fonctions, de sorte que les activités et les décisions relatives au marketing, aux opérations, aux ressources humaines et à aux autres fonctions se complètent et se renforcent mutuellement. La coordination intra-fonctionnelle est réalisée grâce à la cohérence entre les domaines de décision afin de créer une synergie au sein de chaque fonction. Pour une mise en œuvre réussie, les décisions relatives à une fonction doivent être alignées verticalement avec les objectifs stratégiques de cette fonction, ainsi que, latéralement, dans les domaines de décision d'une fonction. Le processus d'alignement horizontal nécessite des échanges et une coopération entre diverses activités fonctionnelles. [Rexhausen et al., 2012] soulignent que les conflits d'intérêts sont fréquents lors du processus du S&OP en raison de son caractère transversal, et la résolution de ces conflits est un challenge pour les participants impliqués qui se situent généralement au même niveau dans la hiérarchie de l'entreprise.

La planification des ventes et des opérations (S&OP) permet aux gestionnaires de diriger stratégiquement leur entreprise, en intégrant le marketing pour les produits nouveaux et existants avec les opérations internes (ventes, recherche et développement, fabrication, approvisionnement et finances) et avec la gestion de la chaîne logistique (Management of Supply Chain : SC). Plusieurs auteurs étendent le concept de S&OP au SC, y compris l'intégration avec les fournisseurs (integration with suppliers : IS) et l'intégration avec les clients (integration with customers : IC). [Thomé et al., 2014] examinent l'impact des pratiques de S&OP sur la performance opérationnelle de la fabrication. Une large conceptualisation de S&OP est étudiée, comprenant trois séries de pratiques : S&OP interne, l'intégration avec les fournisseurs (IS) et l'intégration avec les clients (IC). Le S&OP interne comprend quatre pratiques S&OP internes basées sur les quatre dimensions de [Grimson and Pyke, 2007] présentées auparavant. L'intégration de la chaîne logistique (Supply chain integration : SCI) avec les fournisseurs et les clients est une dimension clé du S&OP [Thomé et al., 2012b]. Ces deux types d'intégration sont traités séparément pour permettre l'examen de leurs impacts individuels sur la performance [Boon-itt et Wong, 2011]. L'alignement interne et externe au sein du SC est considéré comme une condition nécessaire au succès de S&OP [Lapide, 2005] [Olhager et Selldin, 2007]. Plus récemment [Noroozi et Wikner, 2017] ont présenté une revue systématique de la littérature sur le S&OP dans les industries de process. Leur travail combine le processus générique de S&OP examiné par [Thomé et al., 2012] avec le concept d'intégration

revu par [Tuomikangas et Kaipia, 2014] dans un cadre S&OP intégratif, et il l'utilise pour étudier le S&OP dans les industries de process en fonction des caractéristiques spécifiques des objets continus. Leur objectif est d'une part d'examiner l'état actuel du S&OP dans les industries de process par rapport aux autres industries, et d'autre part déterminer les éléments de la chaîne logistique couverts par ce processus du point de vue de l'intégration. Le S&OP comprend une série de 5 étapes, décrites par [Wallace et Stahl, 2006]: *(i)* les ventes élaborent les prévisions; *(ii)* les opérations examinent l'information sur la capacité de production et des stocks; *(iii)* les prévisions et les plans de vente et d'exploitation sont réconciliés; *(iv)* les plans sont distribués et mis en œuvre; et *(v)* la réunion exécutive des S&OP mesure les résultats et l'efficacité, réoriente le processus et finit par prendre des décisions dépassant les limites fonctionnelles. Les réunions sont convoquées au moins une fois par mois et peuvent impliquer des participants de plusieurs départements au sein de l'entreprise, ainsi que des clients et des fournisseurs [Thomé et al., 2012].

[Genin et al., 2005] présentent dans leurs travaux les limites des modèles S&OP utilisant la programmation linéaire, ces modèles donnent la stratégie "optimale" mais ne résistent pas aux changements fréquents de paramètres. Ils proposent d'autres outils mathématiques ainsi que des méthodes Taguchi qui sont intéressantes dans la réalisation d'un compromis simple mais robuste. La dispersion de l'optimum mathématique donnée par le modèle de programmation linéaire est causée par la variabilité des paramètres dans le temps alors qu'ils sont considérés comme statiques dans le modèle. Dans ce cadre de travaux, un mode de recherche sur la robustesse du S&OP est initié grâce à des simulations réalisées en tenant compte de deux types de variables décrites dans [Thomas et Lamouri, 2000]: des variables contrôlables (des paramètres qui permettent de contrôler le système: coûts des heures supplémentaires, sous-traitance, inventaire maximum...) et non-contrôlables pour le système industriel et le manager (des paramètres de perturbation qui interviennent sur le système indépendamment de la volonté du planificateur, c'est le cas par exemple pour l'inventaire initial, la capacité de la ligne ...). [Feng et al., 2010] ont présenté trois modèles de simulation d'horizon glissant pour évaluer les performances du S&OP partiellement et totalement intégrées par rapport à la planification traditionnelle découplée dans une chaîne logistique de production multi-sites, basée sur la production sur commandes. Les performances de ces modèles sont évaluées par rapport à celles des modèles déterministes à horizon fixe.

3.2. Le processus de planification tactique

Les plans tactiques fournissent une liste d'ordres planifiés, c'est-à-dire un ensemble d'informations prévisionnelles par produit fini répondant à la demande prévisionnelle (quantité globale, dates de début et de fin de production). Ces ordres vont devoir ensuite être convertis en ordres de fabrication réels, identifiés à des commandes internes ou externes fermes. Leur gestion « sur le terrain » consiste désormais à fabriquer sous contrainte de ressources. Ce processus de la planification tactique est schématisé dans la Figure 2.4 ci-dessous.

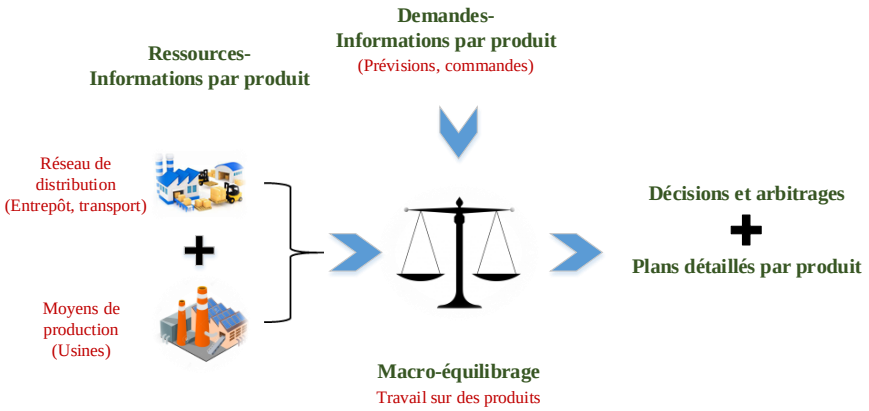


Figure 2. 4- Schématisation du processus de planification tactique

Les techniques de planification tactique se groupent en fonction de leur fonctionnalité principale et des différences observées dans les approches de modélisation. Nous distinguons d'abord les approches par optimisation qui englobent la programmation linéaire, les heuristiques, les métaheuristiques, la programmation stochastique et les méthodes de décomposition, et l'approche par simulation qui décrit la dynamique du système et analyse ses différents scénarios, sa sensibilité, et la probabilité des risques. Une revue de la littérature sur les modèles d'optimisation pour la planification de la production tactique est proposé par [Mula et al., 2014] .

La programmation linéaire est largement appliquée à des problèmes d'aide à la décision pour la planification des capacités [Hood et al., 2003], elle est fréquemment utilisée pour résoudre les problèmes de planification à capacité finie à moyen terme. Le problème est abordé de la même manière pour la majorité des modèles de programmation linéaire. L'horizon de planification est subdivisé en plusieurs périodes de temps discrètes et identiques. La capacité, elle, est considérée comme une borne supérieure fixe, représentant la quantité de produit consommée par une ressource pendant une période de temps, et l'objectif ici est généralement de minimiser les coûts totaux.

[Haq et Kanda, 1991] tout comme [Barbarasoglu et Özgür, 1999] traitent le problème multi-périodique en intégrant le stockage. Le programme linéaire mixte en nombres entiers formulé par [Haq et Kanda, 1991] modélise le processus industriel de production d'engrais, et vise à minimiser des différents coûts, en considérant les délais d'exécution, le temps de lancement de la production, ainsi que le recyclage des déchets. Ce modèle fournit sur un horizon de six mois les décisions à propos des quantités optimales à produire et à distribuer, ainsi que des niveaux de stocks aux différents étages de production et aux dépôts. Les mêmes décisions ont été prises par [Barbarasoglu et Özgür, 1999] en tenant compte d'une production multi-produits. Le problème formulé a été résolu par une approche basée sur la relaxation lagrangienne. [Luis et al., 2016] ont proposé aussi un modèle mathématique basé sur la programmation linéaire mixte en nombres entiers multi-périodes pour la planification de production à moyen terme. L'approche proposée intègre les décisions de production, de traitement, de distribution et de stockage selon deux objectifs contradictoires. D'abord, le manque à gagner puis le manque de produits. Le modèle mathématique est résolu en utilisant l'approche lexicographique pour traiter l'optimisation multi-objective. Dans cette approche, le décideur établit un classement d'importance des fonctions objectives d'après leurs préférences. Une suite de problèmes d'optimisation à un seul objectif peut donc être résolue; chacun possédant la solution du problème précédent comme contrainte supplémentaire.

[Liu et Tu, 2008] modélisent, sur la base d'un programme linéaire, le problème de planification de la production sous contraintes de capacité et de stockage. Les décisions considérées prennent en compte différents éléments : la rupture de stock, la variabilité de la fonction des coûts de production et la perte de vente, ainsi que le caractère constant de la capacité de stockage. Ils développent ensuite un algorithme de programmation dynamique récursif avec une complexité temporelle polynomiale qui utilise l'approche par flux de réseau. Dans ce sens, [Pastor et al., 2009] ont modélisé et ainsi résolu le problème de la planification de la production dans une entreprise de transformation du bois, par la programmation linéaire mixte en nombres entiers dont le dessein est de satisfaire la demande à un coût global minimisé, qui comprend le coût des heures supplémentaires et le coût de la sous-traitance.

[Mocquillon et al., 2011] ont développé une heuristique originale à deux phases, basée sur l'hybridation entre un algorithme glouton et l'algorithme de Goldberg et Tarjan [Goldberg and Tarjan, 1989] pour répondre au problème de flot à coût minimum. Ils ont validé cette approche en prouvant l'équivalence entre leur modèle mathématique linéaire et le problème de flot à coût minimum. L'usine de production considérée est liée à des filiales qui sont elles-

mêmes liées à des clients finaux. L'objectif est de répondre aux demandes des filiales en conservant leurs stocks dans une fenêtre définie par leur stock de sécurité et leurs niveaux de stock maximaux. Dans [Tian et al., 2010] les auteurs proposent une approche basée sur un algorithme itératif pour résoudre conjointement les problèmes tactiques de placement des stocks de sécurité et de planification de la production. Ces problèmes ont été résolus, traditionnellement, de manière isolée, même si les deux problèmes opèrent dans le même espace décisionnel et que les résultats de l'un servent naturellement d'entrées à l'autre.

Dans la littérature, certains travaux définissent la planification de la production globale (APP) au niveau tactique. Ces travaux considèrent le processus APP comme le meilleur moyen pour répondre à la demande prévue dans un avenir intermédiaire, souvent entre 3 et 18 mois à l'avance, en ajustant différentes variables. Parmi celles-ci, on peut considérer : les taux de production des heures régulières et supplémentaires, le niveau des stocks, les niveaux de main-d'œuvre, les taux de sous-traitance et de commandes en retard, ainsi que d'autres variables contrôlables [Mortezaei et al., 2013]. Pour résoudre le problème d'APP au niveau tactique, [Chaturvedi et Bandyopadhyay, 2015] étudient la planification de la production globale pour une chaîne logistique énergétique. Ils proposent des méthodologies graphiques et algébriques qui déterminent la gamme de production à différents niveaux et calculent la production à chaque niveau avec la moindre variation des niveaux de production de différentes périodes. Le but étant de satisfaire les demandes à chaque période et de maintenir les limites des stocks. Mathématiquement, il est montré que la représentation graphique du problème APP étudié est équivalente au problème du plus court chemin euclidien en géométrie algorithmique. Une procédure algébrique basée sur l'analyse des goulots d'étranglement de la production est appliquée pour résoudre le problème. La représentation graphique proposée fournit une compréhension physique significative du problème de planification de la production globale en identifiant différents types de goulots d'étranglement de la production. D'autre part [Bushuev, 2014] présente une nouvelle approche de solution du problème APP. De nombreux chercheurs indiquent que la fonction de coût de l'APP est convexe et fragmentaire. Ainsi, l'approche d'optimisation convexe peut être appliquée au problème d'APP. Résoudre ce problème à l'aide de l'optimisation convexe représente une approche intéressante. En effet, elle permet d'améliorer la solution par rapport aux méthodes classiques et peut s'appliquer à un plus grand nombre de fonctions. Les résultats suggèrent que l'optimisation convexe peut être une approche efficace pour résoudre certains types de modèles de planification. Dans [Baykasoglu, 2001] le problème APP est formulé comme un modèle de programmation d'objectifs préventif. Le modèle proposé est une extension du modèle de [Masud et Hwang. 1980]. Dans le modèle

actuel, l'objectif principal est de proposer un nouveau mécanisme de solution destiné à répondre aux problèmes de planification d'APP à objectifs multiples de manière plus efficace et optimale. À cette fin, l'algorithme de recherche taboue à objectifs multiples est considéré comme un mécanisme de solution adapté à celle de la formulation actuelle de l'APP. Au cours de cette étude, un programme informatique appelé MOAPPS 1.0 a également été développé pour résoudre des problèmes d'APP à objectifs multiples. Dans [Mortezaei et al., 2013] les auteurs proposent un modèle linéaire pour le problème de planification de la production globale, ils tentent de minimiser les coûts totaux et d'optimiser simultanément le service-client. Il est démontré qu'il existe un compromis entre ces objectifs. Ensuite, l'approche de solution en deux phases, qui prend en compte les deux objectifs, est utilisée comme objectif alternatif. En résolvant le modèle, il a été constaté que minimiser un objectif entraînait une perte pour l'autre objectif. La méthode en deux phases, en revanche, entraîne une perte minimale.

A partir de ces différentes études, on constate que les limitations de la programmation linéaire résident, dans un premier temps, dans la nécessité d'une puissance de calcul considérable pour satisfaire le nombre important des contraintes dans la planification des capacités. Elle réside aussi dans la nécessité des données fiables pour une formulation détaillée du problème. Le temps nécessaire pour générer les données d'entrée, ainsi que la présence d'une mémoire suffisante pour stocker ces données, oblige la programmation linéaire à être combinée avec les méthodes de décomposition ou avec la relaxation lagrangienne pour réduire le temps de calcul. Les méthodes de décomposition ont pour objet de décomposer un grand problème complexe en plusieurs sous-problèmes, chacun de ces sous-problèmes étant résolu individuellement, puis rassemblé avec les autres solutions pour définir la solution globale [Ovacik et Uzsoy, 2012]. Plus récemment, [Wenchao et al., 2017] ont étudié le problème de la planification intégrée de la production et de la distribution avec des problèmes de dépendance vis-à-vis du processus de production. La solution est un plan tactique des activités de production et de distribution sur un horizon de planification de 12 mois. Ils ont présenté deux formulations qui diffèrent par le choix de modélisation de la première étape. La première formulation est orientée séquence et basée sur un ensemble de séquences prédéfinies de campagnes de ressources ; la seconde est une formulation orientée-produit, qui modélise chaque changement de ressource avec une variable périodique. Au vu du caractère NP-difficile des problèmes de la planification intégrée de production et de distribution et des problèmes liés au grand ensemble de données abordé dans leur cas d'étude, ils ont développé deux approches basées sur la décomposition : les heuristiques relax-and-fix et fix-and-optimise.

Les méthodes approximatives ont été largement utilisées lors de la planification à capacité infinie ou finie, en raison des limites de résolution des méthodes exactes. Les méthodes de planification à capacité infinie sont développées pour estimer les charges des ressources afin d'identifier les goulets d'étranglement et d'équilibrer ces charges sur l'horizon de planification [Chen et al., 2010]. En raison de l'importance des contraintes de capacité, plusieurs travaux ont été développés pour résoudre les problèmes de planification à capacité finie.[Florian et Klein, 1971] ont utilisé un algorithme de programmation dynamique dans lequel les capacités sont les mêmes à chaque période. Le problème de planification de la production étudié porte sur un seul produit sur plusieurs périodes et dans lequel les exigences connues doivent être satisfaites. Le modèle diffère des précédentes études bien connues, impliquant des fonctions de coûts concaves dans l'introduction de contraintes de capacité de production. [Garavelli et al., 1996] traitent le cas de production et de livraison mono-produit, ils représentent un modèle de planification développé, dont l'objectif est de minimiser les coûts de production et de distribution. Un algorithme génétique est proposé pour la recherche de solutions.

L'approche par simulation a été, de la même façon, largement traitée dans la littérature. Elle permet d'évaluer les performances du système de production. Il s'agit de retenir la meilleure solution testée lors de l'expérimentation d'une ou plusieurs solutions envisagées sur un modèle du système réel. Cette approche diffère de l'approche analytique ; elle ne permet pas de construire une solution, mais de traduire l'effet d'une solution déjà conçue par le décideur sur la suite des états du système et sur les valeurs des critères retenus sur l'horizon de la planification. Dans ce sens, elle permet au décideur de faire des choix possibles en fonction de ce qui répond le mieux au problème posé. Les modèles de simulation sont plus adaptés aux systèmes complexes que les modèles analytiques car ils prennent en compte l'aspect stochastique et les contraintes dynamiques. [Kim et Kim., 2001] ont proposé quant à eux une approche hybride. Ils appliquent un modèle de simulation comme support de la programmation linéaire pour réussir à trouver le plan de production réalisable, à chaque exécution de la simulation, ainsi que la charge de travail réelle des tâches et l'utilisation des ressources sont identifiées. Les informations sont ensuite transmises au modèle de programmation linéaire pour calculer le plan de production optimal possédant des coûts totaux minimaux.

La mise en œuvre des deux problèmes de planification, à long et à moyen terme, est basée sur la même architecture de modèle. Un problème de planification peut suivre la formulation suivante :

- **Objectif du modèle :** L'objectif de la planification est de définir les quantités de produits ou de familles de produits qui permettent d'optimiser une fonction objectif, sur un horizon de la planification défini. Cette fonction objective, selon le cas étudié, exprime un compromis entre les différents coûts liés au système de production. En cas des retards-clients non acceptables, la planification consiste dans un premier temps à trouver une solution répondant à cette exigence, dans le cas contraire, un coût de retard est ajouté à la détermination du compromis. Dans le cas de la planification stratégique, la fonction objectif prend également compte de coûts liés à l'embauche, à la sous-traitance, ou aux licenciements.

- **Données du modèle :** Les données d'entrée du modèle sont la durée et la période de l'horizon de planification, et la demande client à la maille famille de produit ou à la maille produit ;

- **Paramètres du modèle :** Les paramètres les plus souvent utilisés sont : le coût de production, le coût de stockage, le coût de lancement d'une campagne de production, la capacité de production du système, la capacité de production nécessaire pour la fabrication d'un produit, la capacité nécessaire pour effectuer un lancement de production. Pour le PIC, les coûts d'embauche, de licenciement et de sous-traitance peuvent être ajoutés ;

- **Variables de décisions :** Elles représentent : les quantités produites, la demande satisfaite, les quantités de demandes satisfaites, les quantités en stock, les débuts de campagne (afin d'imputer les coûts de lancement de campagne), le recours à la sous-traitance…etc ;

Suite à cette description, il s'est avéré que les problèmes de planification mettent en jeu des problèmes de modélisation du système physique de production et de gestion de la demande. En effet, vu la complexité des systèmes de production, il est impossible sur un horizon moyen terme de modéliser très finement le système de production en considérant l'ensemble des produits. Ainsi pour élaborer une planification tactique, il est nécessaire d'élaborer des modèles par rapport à une granularité choisie de modélisation du système physique (ressources globales ou critiques) mais aussi par rapport à une finesse choisie de la gestion de la demande.

4. La planification dans un environnement incertain

Les modèles déterministes abordés dans la section précédente fournissent une base solide pour la planification de la production. Néanmoins, tout plan obtenu sur la base de ces modèles ne possède aucune garantie de performance pour tout avenir plausible. Ces modèles ne gèrent pas les incertitudes et les imperfections de l'information sur les environnements futurs plausibles attendus. Ainsi, la modélisation de l'incertitude devient un défi important pour une planification plus réaliste. L'incertitude comporte des sens différents et des implications dans un certain nombre de domaines.

4.1. Incertitude : Définition et classification

En pratique, l'incertitude est un facteur inhérent à la gestion de production et peut affecter de nombreux paramètres comme la demande, les délais d'approvisionnement, les temps de fabrication, la qualité des produits, les prix, etc. La prise en compte de l'incertitude a fait l'objet d'un grand nombre de recherches ayant abouti à plusieurs grandes approches de modélisation.

Plusieurs recherches ont été menées pour définir et caractériser l'incertitude, initialement la distinction entre incertitude, risque et certitude a représenté une vieille question d'importance cruciale. [Rosenhead et al., 1972] ont proposé de faire la distinction entre la prise de décision avec certitude, avec risque et avec incertitude. Cette caractérisation a ensuite été adoptée par plusieurs auteurs [Kouvelis and Yu, 1997] [Snyder, 2006]. Selon ces auteurs, la certitude correspond au cas où aucun élément de hasard n'intervient entre les décisions et les résultats. Les situations à risque sont celles où le lien entre les décisions et les résultats est régi par des distributions de probabilité. L'incertitude décrit les situations dans lesquelles il est impossible d'attribuer des probabilités aux résultats possibles d'une décision. Cette distinction entre risque et incertitude n'est cependant pas universellement acceptée. Ainsi, de nos jours, les chercheurs distinguent généralement les problèmes certains et ceux qui sont incertains. Ces derniers caractérisent les situations dans lesquelles un doute existe sur la valeur réelle d'un ou plusieurs paramètres. [Galbraith, 1973] définit l'incertitude comme étant la différence entre la quantité d'informations requise pour effectuer une tâche et la quantité d'informations en possession. Dans le monde réel, de nombreuses formes d'incertitude affectent les processus de production.

L'incertitude concerne potentiellement des paramètres de natures diverses tels que la demande, le temps de transport, ou encore la qualité des produits. Ainsi, elle peut être issue d'un nombre important de différentes causes. La classification de ces sources d'incertitude a fait

l'objet d'une étude approfondie. Initialement, [Ho, 1989] a classé ces sources d'incertitude en deux catégories : les incertitudes liées à l'environnement, et celles liées au système. L'incertitude environnementale inclut les incertitudes qui dépassent le processus de production, telles que l'incertitude de la demande et l'incertitude de l'approvisionnement. L'incertitude du système est liée aux incertitudes inhérentes au processus de production, telles que l'incertitude du rendement des opérations, l'incertitude du délai de production, l'incertitude de la qualité, la défaillance du système de production et les modifications de la structure du produit. D'autres chercheurs tels que [Mason-Jones et Towill, 1998] [Childerhouse et Towill, 2002] [Ho et al., 2005] [Wang et Shu, 2005] ont classé ces sources d'incertitude en trois groupes : demande, processus, fabrication et approvisionnement. L'incertitude de l'approvisionnement est dûe à la variabilité résultant du mode de fonctionnement du fournisseur en raison de défauts ou de retards dans les livraisons-fournisseur. L'incertitude dans le processus est le résultat d'un processus de production peu fiable qui peut être dû, par exemple, aux arrêts de la machine. Enfin, l'incertitude de la demande, telle que définie par [Davis, 1993], est la plus importante des trois. Elle est présentée comme la volatilité de la demande ou comme une prévision de demande inexacte. Dans ce contexte, il est important de souligner l'apport des travaux de [Disney et al., 2004] et [Gaalman et Disney, 2006], sur les capacités à mesurer et à éviter l'effet de fouet dans les chaînes logistiques.

La représentation de telles sources d'incertitude et la prise en compte de leurs impacts dans le cadre de la planification de la production, nécessite la présentation des différentes approches proposées et de leurs mises en œuvre au sein de la littérature. Ceci fera l'objet de la partie suivante.

4.2. Modèles de planification sous incertitude

La planification de la production s'inscrit dans un contexte aléatoire et instable (modifications des prévisions, pannes majeures, etc.). La prise en compte de l'incertain ou des incertitudes est regroupée sous différents termes. Plusieurs critères permettent de qualifier le comportement d'un système face à des aléas incertains : la fiabilité, la flexibilité, l'agilité, la résilience, la robustesse, la stabilité / la nervosité, et la sensibilité [Durieux et al., 2008]. La robustesse et la stabilité sont les critères les plus souvent étudiés.

Un état de l'art relativement complet sur la planification de la production dans un environnement incertain est d'ailleurs présenté dans [Mula et al., 2006]. L'auteur identifie ainsi

quatre grandes approches de modélisation destinées à faire face aux différentes formes d'incertitude à savoir ; les modèles conceptuels, les modèles analytiques, les modèles d'intelligence artificielle et les modèles de simulation.

4.2.1. Modèles conceptuels

Les modèles conceptuels consistent en des outils descriptifs, qui décrivent les principaux aspects et les variables pertinentes impliquées dans un problème spécifique de la planification, et / ou dans des cadres normatifs. Ils proposent des lignes directrices, généralement basées sur des données empiriques, pour traiter des problèmes spécifiques de planification dans le cadre de la gestion de la chaîne logistique. L'approche MRP / MRPII [Orlicky, 1975] [Vollmann et al., 1988] est l'une des méthodes de planification et de contrôle de la production les plus utilisées par les entreprises. En outre, un grand intérêt a été détecté par la communauté de la recherche afin de paramétrer cette méthode dans un environnement incertain. Par exemple [Koh et al., 2002], [Mula et al., 2006], [Dolgui et Prodhon, 2007] démontrent qu'il existe différentes techniques (délais de sécurité, stocks de sécurité et techniques de lotissement, etc.) qui peuvent être utilisées pour faire face à ces incertitudes. [Murthy et Ma, 1991] examinent davantage de travaux de recherche sur les modèles MRP dont la qualité est incertaine. L'approche dénommée « excès de planification » est employée pour tenir compte des incertitudes liées à la quantité et à la qualité du produit. Dans cette approche, davantage de produits que ceux spécifiés dans les commandes du (PDP) sont exécutés, de sorte à ce que le processus puisse satisfaire les éventuels excès de demande. Un excès de planification peut faire face aux variations possibles de la demande, mais il entraîne une augmentation des coûts des stocks, tandis qu'une planification excessive insuffisante réduit les coûts des stocks, mais peut entraîner des pénalités de retard de livraison. [Caridi et Cigolini, 2000] proposent une nouvelle méthodologie pour dimensionner un tampon global contre l'incertitude de la demande dans les environnements MRP. A cette fin, un ensemble de directives recommandées est rapporté pour dimensionner et positionner le stock de sécurité et / ou le stock stratégique dans la nomenclature des produits et des pipelines de fabrication.

4.2.2. Modèles analytiques

Les modèles analytiques des problèmes de planification reposent sur différentes techniques de recherche opérationnelle, principalement la programmation linéaire, la programmation dynamique, la programmation mixte en nombres entiers, la programmation

multi-objectifs, le processus de décision basé dur les chaines de Markov, et enfin les processus de hiérarchie analytique qui sont basés sur le chaînage de modèles analytiques dédiés aux différents niveaux de planification. Ils abordent les problèmes de configuration ainsi que ceux de coordination. Les problèmes de la planification de la production représentent l'une des applications les plus intéressantes pour les outils d'optimisation qui utilisent la programmation mathématique. L'idée d'incorporer l'incertitude dans les modèles mathématiques apparaît initialement avec [Dantzig, 1955].

[McDonald et Karimi, 1997] ont conçu un modèle de programmation linéaire mixte en nombres entiers, multi-sites, multi-produits, et multi-périodes, pour une planification de la production de la chaîne logistique à moyen-terme. Le modèle développé est de nature déterministe qui adopte des stocks de sécurité pour faire face aux incertitudes de la demande. [Ryu et al., 2004] ont présenté une approche de programmation mathématique à deux niveaux. Le niveau supérieur correspond à un problème de planification d'un réseau de distribution, tandis que le niveau inférieur correspond à un problème de planification de la production. Ce modèle a examiné trois sources d'incertitude : la demande, les capacités de production et le stockage. [Spitter et al., 2005] ont abordé le problème de la planification de la production dans une structure arbitraire de la chaîne logistique sous l'incertitude de la demande. Les auteurs ont utilisé un modèle de programmation linéaire avec un horizon de planification glissant, conçu pour forcer la production à débuter le plus tôt possible ou le plus tard possible. [Koutsoukis et al., 2000] ont développé un système d'aide à la décision concernant la planification de la chaîne logistique. Le système dispose d'un moteur de décision intégré qui utilise un programme stochastique en deux étapes comme paradigme d'optimisation dans un contexte incertain. [Lario et al., 2001] décrivent la modélisation via des scénarios comme outil de planification de la chaîne logistique, possédant une incertitude environnementale dans une chaîne logistique de l'industrie automobile. De plus, [Gupta et Maranas, 2003] abordent le problème de la planification tactique des chaînes logistiques dans des conditions d'incertitude de la demande, en utilisant une approche basée sur la programmation stochastique. Dans [Aghezzaf et al., 2010] les auteurs examinent le problème de conception des plans de production tactiques robustes, dans un système de production multi-étages, avec des demandes incertaines de produits finis. Ils présentent ensuite trois modèles pour générer ces plans tactiques robustes lorsque les demandes du produit fini sont stochastiques avec des distributions connues. Ils discutent en particulier des plans produits respectivement par un modèle de planification stochastique en deux étapes. La première consistant en un modèle de planification d'optimisation stochastique

robuste et la seconde en un modèle de planification déterministe équivalent qui intègre la variabilité des demandes de produits finis. Le troisième modèle utilise les demandes moyennes des produits finis comme exigences minimales à satisfaire. Ensuite une étude expérimentale est menée pour comparer les performances des plans produits par les trois modèles. Le principal résultat est que le modèle déterministe robuste proposé produit des plans qui permettent de mieux équilibrer le coût moyen minimum et la variabilité minimale des coûts. De plus, le temps et l'espace de calcul requis sont nettement moins importants dans le modèle déterministe robuste proposé que dans les deux autres. Plus récemment, dans [Cansheng et al., 2011] les auteurs ont considéré un problème de planification de la production et des stocks avec une demande et des retours de produits incertains, dans lequel le processus de retour des produits est intégré dans le processus de fabrication sur un horizon de planification limité. Ils exposent d'abord un modèle de contrôle des stocks pour les processus de retour et de re-fabrication en tenant compte de l'incertitude de la demande et des retours. Par la suite, une approche d'optimisation robuste est appliquée pour traiter l'incertitude du problème par la formulation d'un modèle de programmation linéaire robuste. Un modèle équivalent d'optimisation robuste, basé sur la théorie de la dualité, est ainsi obtenu, ce qui permet de déduire plus efficacement les solutions. Dans le même sens, [Stephen et al., 2004] proposent un modèle d'optimisation robuste pour résoudre le problème de planification de la production globale dans un environnement incertain dans lequel les coûts de production, de main-d'œuvre, d'inventaire, ainsi que les coûts d'embauche et de mise à pied sont minimisés. Les décideurs peuvent déterminer une stratégie de production optimale à moyen-terme, tout comme un plan de charge de production et un niveau optimum des effectifs, tout en tenant compte de différents scénarios de croissance économique. Le modèle proposé apparaît donc comme réaliste pour faire face à des conditions économiques incertaines.

4.2.3. Modèles d'intelligence artificielle

Plusieurs techniques d'intelligence artificielle ont été appliquées pour résoudre les divers problèmes de planification de la chaîne logistique. En général, ces techniques sont plus souvent utilisées pour la coordination que pour les problèmes de configuration. Nous pouvons par exemple citer la théorie des ensembles flous, la logique floue, les réseaux de neurones, les algorithmes génétiques, l'apprentissage par renforcement et les systèmes multi-agents. [Wang et Fang, 2001] examinent, quant à eux, les limites de l'application des techniques classiques de programmation mathématique pour résoudre le problème de la planification de la production à moyen-terme. Ils proposent un model basé sur la programmation linéaire floue pour résoudre

un problème de planification globale avec objectifs multiples où le prix du produit, le coût de la sous-traitance, le niveau de la main d'œuvre, la capacité de la production et la demande du marché sont considérés comme flous. Les paramètres flous sont représentés par des nombres flous trapézoïdaux. [Du et Wolfe, 2000] proposent un système MRP actif en temps-réel. Ce système MRP actif utilise une architecture hybride comprenant une base de données orientée objet, des contrôleurs de logique floue et des réseaux de neurones artificiels. Les contrôleurs de logique floue sont combinés avec une base de données orientée objet. Les réseaux de neurones artificiels sont utilisés pour apprendre les règles floues « si-alors » et pour simuler des fonctions d'appartenance floue. Ils sont combinés aux contrôleurs à logique floue pour la classification du stock. Le système MRP actif analyse les délais de sécurité, les stocks de sécurité et les plans de manière dynamique et il spécifie les dates de sortie et de fin pour chaque besoin, la réception programmée et l'ordre planifié. [Mula, 2004] propose un nouveau modèle de programmation linéaire pour la planification de la production à moyen-terme dans un MRP à capacité limitée pour un environnement de fabrication multi-produits, multi-niveaux et multi-périodes. Ce modèle est ensuite transformé en 15 modèles flous basés sur différentes approches de programmation mathématique floue. Au sein de ces approches, les coefficients de coût dans la fonction objectif, la demande du marché, la capacité requise et la capacité disponible peuvent être considérés (selon chaque modèle) vagues et / ou ambigus. Enfin, les modèles sont testés à l'aide des données réelles provenant d'un fabricant de sièges automobiles.

4.2.4. Modèles de simulation

La simulation présente l'avantage de permettre le traitement des problèmes de la planification dans le cadre de la gestion de la chaîne logistique de manière plus détaillée, puis ensuite pleinement réaliste. Dans ce sens, les modèles de simulation pour la planification sont employés pour tester des solutions destinées à des problèmes spécifiques. Alternativement, des directives générales peuvent être dérivées en simulant le comportement d'un système général et assez simplifié. [Thompson et al., 1993] ont présenté une approche intégrée pour modéliser les incertitudes présentes dans la planification de la production globale. Ils formulent un modèle de programmation linéaire dans lequel l'incertitude des coûts, des capacités, des délais et de la demande est modélisée à l'aide des techniques de simulation de Monte Carlo. [Hung et Chang, 1999] ont présenté une méthode qui détermine les niveaux des stocks de sécurité via un modèle de simulation Monte Carlo incluant les incertitudes liées au temps de cycle de fabrication et au taux de production des machines. L'objectif est de calculer les plans de production au sein d'une chaîne logistique de fabrication de semi-conducteurs. [Kadipasaoglu et Sridharan, 1997]

développent des modèles de simulation pour étudier l'instabilité du système MRP. L'objectif de ces expériences est d'analyser l'impact des paramètres du processus (taille du lot, planification glissante, etc.) sur l'exécution du MRP dans un environnement incertain. Une des approches proposées pour résoudre ce problème est de geler certaines périodes du PDP. En outre, [Xie et al., 2003] étudient la performance des paramètres de congélation du PDP dans les systèmes à plusieurs entités, et à un seul niveau avec une seule contrainte de ressources sous incertitude de la demande. Plus récemment, [Bruno et al., 2015] ont proposé deux systèmes basés sur l'optimisation (simulation-optimisation et optimisation bi-objectif) pour prendre en compte la variabilité de la production au stade du processus S&OP d'une entreprise. La variabilité de la production est mesurée en tant qu'écart entre les taux de production historiques prévus (cibles) et réels (atteints). Une technique statistique, à savoir la régression quantile, est déployée pour modéliser la distribution des valeurs d'écart en fonction des cadences de production prévues. Les scénarios sont construits en échantillonnant à partir de la distribution des valeurs d'écart et ils sont utilisés comme entrées vers les cadres basés sur l'optimisation proposés. Les avantages et inconvénients des deux cadres proposés sont à ce propos discutés. L'applicabilité de la méthodologie proposée est illustrée par un problème réel d'une entreprise de produits chimiques.

4.2.5. La planification de la production agrégée sous incertitude

Un système de planification commence par une prévision de la demande future sur un horizon de prévision de longueur *H* périodes. La partie long-terme de cette prévision représente un intrant dans un module de planification globale (ou agrégée) qui détermine si la capacité est suffisante pour satisfaire la prévision de la demande. Lorsque l'une des méthodes déterministes classiques destinées à modéliser les problèmes de la planification de la production globale (APP) est utilisée, les objectifs et les intrants du modèle sont généralement supposés précis, et seuls les problèmes de l'APP mono-objectif qui minimisent les coûts peuvent être résolus. Dans les systèmes de production, les coefficients et les paramètres (tels que la demande du marché, les ressources et capacités disponibles et les coûts d'exploitation correspondants), sont souvent imprécis car les informations sont incomplètes ou impossibles à obtenir à moyen-terme. En outre, les nombreux domaines fonctionnels d'une organisation qui contribuent au plan global ont généralement des objectifs contradictoires en ce qui concerne l'utilisation des ressources de l'organisation. Ces objectifs contradictoires doivent être résolus simultanément par le décideur dans le cadre des niveaux d'aspiration imprécis [Masud et Hwang. 1980] [Shi et Haase, 1996], [Tang et al., 2000] [Wang et Fang, 2001] [Fung et al., 2003]. Par conséquent, les méthodes APP

déterministes classiques ne peuvent clairement pas résoudre des problèmes d'optimisation imprécis d'APP dans des environnements incertains.

Pour faire face à l'imprécision, un nombre important d'études a été consacré à l'APP sous l'incertitude en considérant différentes formes d'incertitude, notamment la forme stochastique, le flou et l'aléatoire. Plus récemment, un état de l'art a été présenté par [Mula et al., 2006], les auteurs classifient les méthodes qui ont été adoptées dans la littérature pour étudier APP sous incertitude selon quatre catégories principales : la programmation mathématique floue, la programmation mathématique stochastique, la simulation et les métas heuristiques.

L'incertitude observée dans les modèles de programmation mathématique au sein d'un environnement flou, couvre un large éventail de modèles, telles que la programmation linéaire floue, la programmation non linéaire floue, l'optimisation multi-objectifs floue, etc. Dans cet ensemble de modèles, l'incertitude est présente sous la forme de flou, qui implique la demande du marché, les valeurs d'objectif, les constantes, les coefficients et les contraintes des modèles. [Zimmermann, 1976] a introduit la théorie des ensembles flous dans un problème de programmation linéaire ordinaire détenant des objectifs et des contraintes flous. Par la suite, la méthode de programmation linéaire floue (FLP) s'est transformée en plusieurs méthodes d'optimisation permettant de résoudre les problèmes d'APP dans des environnements eux-aussi flous [Tang et al., 2000] [Wang et Fang, 2001] [Fung et al., 2003]. Plus récemment, [Gholamian et al., 2015][Gholamian et al., 2016] ont développé un modèle APP non linéaire mixte en nombres entiers, multi-objectifs, multi-sites, dans une chaîne logistique incertaine avec une demande floue, des paramètres de coût flous, etc. [Mezghani et al., 2012] ont développé à ce sujet une formulation du problème APP par la programmation par objectif floue. Ceci correspond à une formulation de l'APP dans un environnement imprécis dans lequel le concept de la fonction de satisfaction est utilisé pour incorporer explicitement les préférences du décideur dans le modèle APP. Dans leur modèle, la demande prévue, les niveaux de capacité et les niveaux d'aspiration sont supposés être des valeurs floues. [Omar et al., 2012] ont étudié les avantages de l'application d'une programmation mathématique floue dans un contexte APP en développant un modèle de programmation linéaire à nombres entiers flou, avec une demande et des paramètres de coût flous, dans une usine de fabrication de résine, qui prend en compte les incertitudes floues uniquement possibilistes. [Wang et Zheng, 2013] ont proposé une méthode de programmation linéaire floue pour l'APP dans une industrie de raffinerie. Celle-ci vise à maximiser le profit total de sorte que la demande du marché et les éléments de coût soient caractérisés comme des chiffres flous.

L'approche stochastique est aussi fréquemment utilisée afin de résoudre des problèmes APP dans un contexte incertain. Sa mise en œuvre est réalisée sous différentes formes donnant naissance à tout autant de méthodes spécifiques. [Demirel et al., 2018] ont appliqué la programmation linéaire mixte en nombres entiers pour créer un modèle décisionnel qui viserait à répondre au problème APP à horizon glissant, avec un profil d'exigences de flexibilité dans lequel la demande est considérée comme une variable incertaine. Dans le même sens, une programmation linéaire stochastique destinée à traiter le problème d'APP avec une demande et des paramètres de coût stochastique a été présentée par [Leung et al., 2006]. D'autre part, [Jamalnia et al., 2017] ont bâti un modèle d'optimisation décisionnel stochastique non linéaire et multi-objectif pour résoudre le problème d'APP basé sur une stratégie mixte : planification synchrone et planification sous incertitude. Il s'agit de rappeler ici que la demande du marché constitue la principale source d'incertitude. En construisant des modèles d'optimisation stochastiques, non linéaire et multi-objectifs pour cinq stratégies APP différentes, [Jamalnia, 2017] a évalué la performance de ces stratégies APP sous incertitude de la demande en fonction de huit critères différents. Ces critères sont les suivants : les revenus attendus, les coûts de production prévus, les coûts de productivité du travail prévus, les coûts totaux prévus des variations de la main d'œuvre, le degré de satisfaction attendu de la clientèle, les coûts de possession des stocks, de commande différée et de publicité prévus, les ressources et capacités de production non utilisées et enfin, le profit total attendu.

Plusieurs techniques de simulation ont été employées pour modéliser l'incertitude dans les problèmes APP. [Gansterer, 2015] a étudié l'impact d'un APP avec une demande incertaine dans un environnement de production sur commande en utilisant la simulation à évènements discrets (DES) dans un cadre de planification de production hiérarchique. [Altendorfer et al., 2016] ont évalué l'effet de l'erreur de prévision à long-terme sur le facteur optimal d'utilisation prévu pour un système de production répondant à une demande client stochastique. La simulation est utilisée pour déterminer les coûts globaux tels que les coûts de la capacité, les stocks en attente et les coûts de stockage. [Cebral-Fernández et al., 2017] a utilisé la DES pour modéliser des processus complexes de construction navale. Leur modèle de simulation tente de minimiser les effets des incertitudes présentes dans les processus de construction de navires. [Khouja, 1998] a développé un cadre APP pour évaluer la flexibilité volume en utilisant la simulation Monte Carlo avec une demande normalement distribuée. En raison de la non-linéarité, de la nature combinatoire et de la grande taille des problèmes d'APP, les métaheuristiques se sont révélées être des techniques efficaces pour résoudre les problèmes

d'APP dont les caractéristiques sont incertaines. Dans ce type de modèles pour l'APP, l'incertitude est présente dans les variables de décision, la demande des clients, la fonction-objectif, les contraintes, les constantes et les coefficients des modèles. [[Fichera et al., 1999] ont suggéré une programmation linéaire possibiliste et un algorithme génétique en tant que système d'aide à la décision pour l'APP afin d'aider les décideurs à prendre leurs décisions dans un environnement flou. Un environnement dans lequel les contraintes relatives à l'équation d'équilibre de la production, des stocks, de la demande et de la capacité de production totale sont de forme possibiliste. Le vecteur du chromosome dans leur algorithme génétique est constitué de variables pour la quantité de production, le niveau de stock et le niveau d'effectif. [Baykasoglu et Gocken, 2010] ont proposé un APP multi-objectif avec des paramètres flous et ont résolu le modèle en utilisant des méthodes de classement par nombres flous et de recherche tabou. Le mécanisme de recherche fondamental qu'ils utilisent est l'algorithme de la recherche tabou de [Baykasoglu et al., 1999]. Cet algorithme comporte plusieurs étapes qui partent de la recherche de la solution initiale jusqu'à la résiliation, en passant par la génération de solutions de voisinage, la sélection du meilleur vecteur de solution actuel, la mise à jour du vecteur de solution le plus connu, et enfin, par la mise en place des solutions acceptées sur la liste tabou.

5. La planification intégrée

L'objectif principal de l'intégration de la planification et de l'ordonnancement est de garantir la faisabilité des plans de production décidés au niveau tactique. Le traitement des deux niveaux de planification d'une manière séparée ne permet pas de prendre en compte les contraintes de succession qui possèdent différents impacts. En effet, ils influent sur la capacité exacte du système, et sur la capacité à garantir la détermination d'un plan de production réalisable au niveau opérationnel. Par conséquent, il est fondamental d'essayer de prendre les deux types de décision en même temps.

Dans l'approche de planification MRP, le plan de production est construit sans tenir compte de la capacité de production du système, ce plan doit être respecté dans la phase d'ordonnancement des activités. Le problème à ce niveau consiste dans l'impossibilité de réaliser un ordonnancement qui respecte les délais de production, causé par une capacité insuffisante du système de production. Dans ce cas, toutes les stratégies envisageables pour respecter le plan de production entraîneront *de facto* une augmentation du coût global.

Dans l'approche MRP-II, les informations au sujet de la capacité sont récoltées à différents niveaux de détails et de manière hiérarchisée, ce qui permet de construire plusieurs plans de production pour parvenir à un plan détaillé. Cette manière d'estimer la capacité offre une information limitée sur les ressources mobilisées au niveau tactique, et conduit vers la détermination d'un plan qui n'utilise pas la capacité de manière efficace, ce qui peut être problématique au niveau opérationnel, d'où l'importance d'adopter une démarche qui intègre le mieux possible les contraintes du niveau opérationnel. Pour plus de détails sur l'importance d'intégrer les décisions d'ordonnancement dans la planification de la production au niveau tactique, le lecteur peut consulter le travail de [Dauzère et al., 2002], qui met en évidence les limites des approches hiérarchiques.

Les stratégies de résolution des problèmes d'intégration de la planification et de l'ordonnancement, ont été classées par [Maravelias et Sung, 2009] en trois catégories illustrées dans la Figure 2.5. Le premier type d'approche concerne les approches hiérarchiques, au sein desquelles les deux problèmes de planification et d'ordonnancement sont résolus séparément. Le problème de planification est résolu sans la prise en compte des contraintes d'ordonnancement, ce qui ne rend pas le plan de production forcément réalisable à court-terme. Dans la phase suivante, le problème d'ordonnancement est résolu en fixant les variables de décisions définies au niveau tactique. Le problème réside dans l'impossibilité de trouver un ordonnancement réalisable pour suivre le plan de production. [Yan et al., 2003] ont examiné une approche hiérarchique qui consiste à résoudre dans un premier lieu le problème de planification de la production en présence de contraintes de capacité globales pour obtenir des quantités de production, puis à se référer à la recherche taboue pour garantir la faisabilité au niveau inférieur. La décomposition hiérarchique peut également être employée dans un cadre à horizon glissant, dans lequel des modèles d'ordonnancement détaillés sont mobilisés pour les quelques premières périodes et pour les modèles globaux (ou agrégés) pour des périodes ultérieures. Les objectifs de production fixés pour les premières périodes sont exacts, et donc directement mis en œuvre, tandis que les objectifs pour les périodes ultérieures sont actualisés au fur et à mesure que l'horizon glisse [Wu et Ierapetritou, 2007]. Les méthodes de résolution d'horizon glissant sont regroupées ici sous forme hiérarchisée car il n'y a pas d'information renvoyant au problème principal au cours du processus de résolution. [Lin et al., 2002] ont présenté un modèle intégré au sujet de la planification de la production à moyen-terme. L'approche générale consiste à décomposer le problème vaste et complexe de toute la période de planification en sous-problèmes de planification à court-terme, sur des horizons temporels

successifs. Les auteurs développent une formulation mathématique à deux niveaux qui aborde efficacement l'approche à horizon glissant en tenant compte du compromis entre la satisfaction de la demande, l'utilisation des unités et la complexité du modèle. Dans le premier niveau, l'horizon temporel est déterminé et les principaux produits qui doivent être pris en compte pour toutes les étapes de traitement sont identifiés, tandis que dans le deuxième niveau, des produits additionnels sont identifiés pour passer par la première étape si nécessaire.

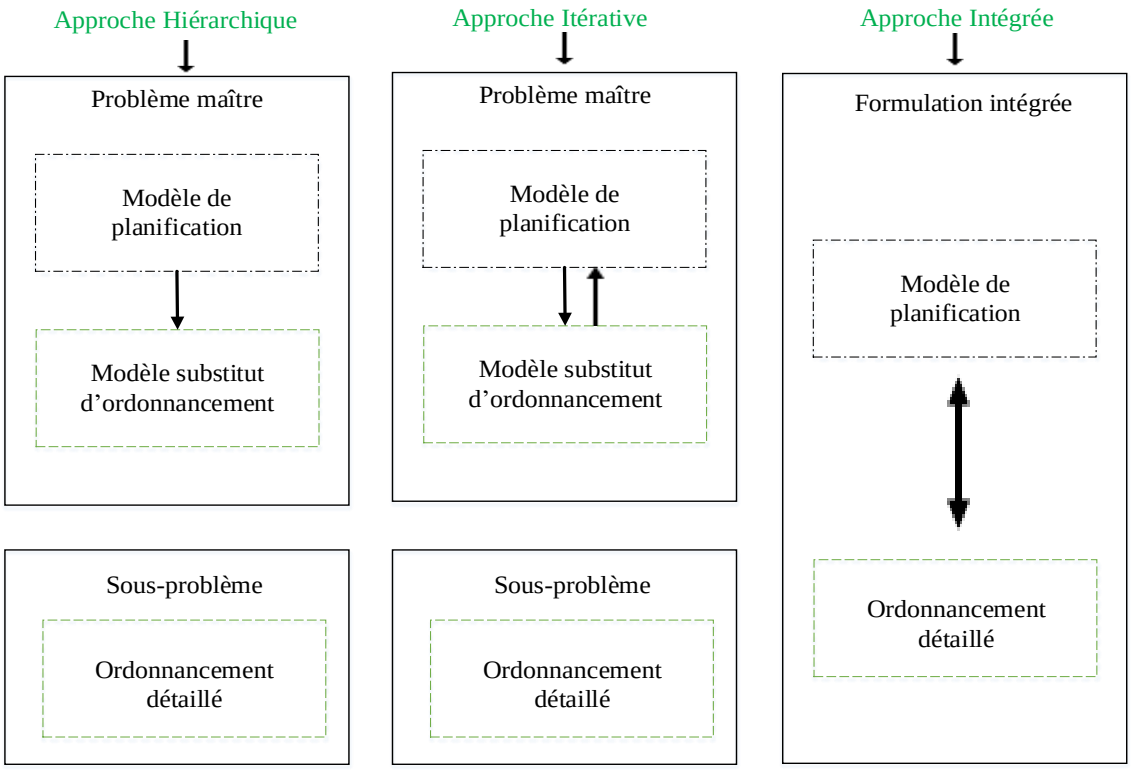


Figure 2. 5- Stratégies de résolution du problème intégré de planification et d'ordonnancement

Dans le deuxième type d'approche, on retrouve les approches itératives, qui garantissent la faisabilité des plans de production au niveau opérationnel, cette approche itérative assure un échange continu d'informations entre le niveau de résolution du problème de planification tactique (qui peut intégrer ou non les contraintes détaillées d'ordonnancement) et le niveau dédié au problème opérationnel. Cette procédure itérative converge vers un optimum local qui permet d'obtenir une solution réalisable, mais pour autant, l'optimum global n'est pas garanti. Ces méthodes itératives tentent de fermer la boucle d'informations du sous-problème de planification au problème principal. Le but de ces commentaires est de trouver les véritables décisions optimales de haut niveau. Cela peut être atteint en ajoutant des coupes entières excluant les solutions trouvées précédemment. Par conséquent, différentes solutions peuvent être révélées par le problème principal et évaluées par le sous-problème de niveau inférieur.

[Erdirik-Dogan et Grossmann, 2006] ont proposé un modèle intégré de planification et d'ordonnancement pour l'ordonnancement des tâches continues sur une seule machine. Le niveau supérieur est résolu pour fixer un ensemble de variables binaires, c'est-à-dire affecter des tâches à des périodes. A la fin de chaque itération, plusieurs types de coupes entières sont ajoutés de sorte à éviter que des ensembles identiques ou similaires de variables binaires ne soient retrouvés. [Stefansson et al., 2006] ont présenté un modèle intégré à trois niveaux et une approche de décomposition itérative pour l'ordonnancement des commandes en plusieurs étapes dans l'industrie pharmaceutique. Les trois niveaux comprennent la planification de la campagne et l'ordonnancement des commandes, ainsi que l'ordonnancement avec les temps de configuration. [Wu et Ierapetritou, 2007] ont examiné une combinaison de schémas de décomposition hiérarchique et itérative pour un problème sous incertitude, avec une décomposition hiérarchique externe et une décomposition itérative interne.

La troisième approche est l'approche intégrée. Elle a pour vocation d'englober les deux problèmes de planification et d'ordonnancement en un seul et même problème avec une formulation intégrée. Celle-ci permet d'obtenir une solution optimale du problème global. Etant donnée la complexité du problème, obtenir cette solution dans des temps de calcul acceptables demeure souvent impossible. Il en est de même pour trouver une solution réalisable du problème, sauf pour les problèmes de petite taille. Le recours, dans ce cas, à des méthodes de relaxation ou de décomposition s'avère nécessaire pour diminuer la complexité du problème dans ce type d'approche. L'obtention d'une solution optimale n'est pas garantie, mais le rapport entre le temps de calcul et l'optimalité devient acceptable. Cette approche a été initiée par [Dauzère-Pérès et Lasserre, 1994] et consiste à intégrer des contraintes opérationnelles au modèle de planification en s'appuyant sur un couplage de deux blocs. L'un détermine un plan de production $X(y)$ pour un ordonnancement y fixé, l'autre, quant à lui, détermine un ordonnancement $Y(x)$ pour un plan de production x fixé. Le principe de ce fonctionnement est le suivant : pour un ordonnancement fixé, le module de planification construit un plan de production optimal respectant ce séquencement. Le plan déterminé est envoyé dans le module d'ordonnancement dans le but d'obtenir le meilleur ordonnancement possible. Il doit permettre de le réaliser : le temps ainsi libéré permettra de planifier la production d'autres articles au niveau du module de planification. Cette procédure s'arrêtera soit après un certain nombre d'itérations, soit lorsque l'ordonnancement obtenu dans le module d'ordonnancement n'évoluera plus (on ne pourra plus gagner de temps). [Joly et al., 2002] ont proposé un modèle intégré pour une raffinerie. Le problème de planification a permis de définir la topologie de la

raffinerie et les points de fonctionnement, tandis que le problème d'ordonnancement a monitoré le déchargement du pétrole brut des pipelines, le transfert dans des réservoirs de stockage et le chargement dans des unités. [Neiro et Pinto, 2005] ont examiné une formulation sur plusieurs périodes pour la planification de la production des raffineries. La Figure 2.6 illustre cette approche.

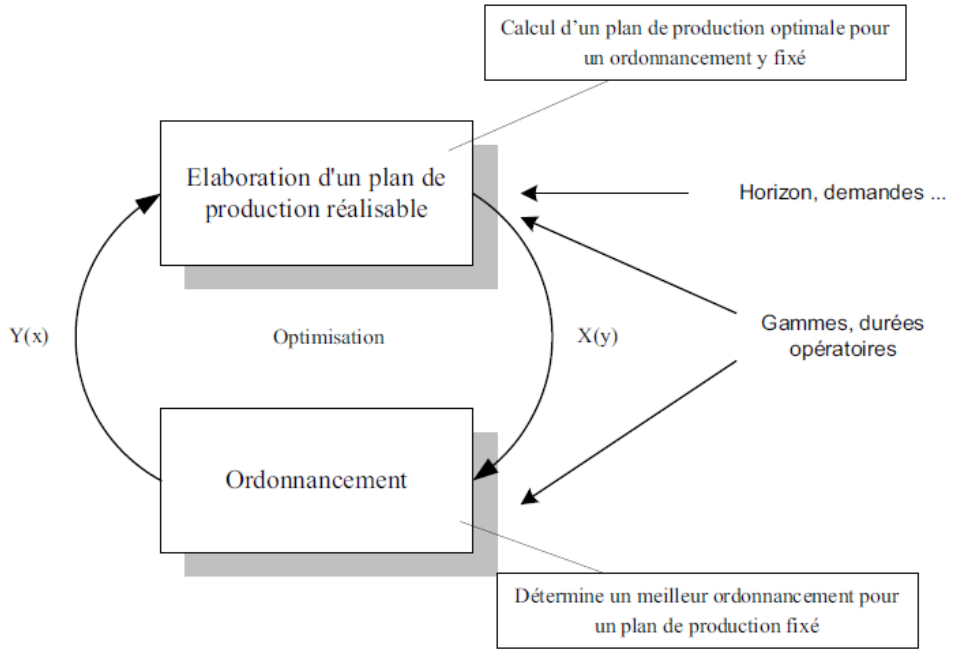


Figure 2. 6- Approche par intégration de contraintes opérationnelles [Dauzère Pérès et Lasserre 1994]

[Gupta et Maranas, 2003] présentent un modèle général et robuste face aux aléas de la demande dans la planification de la production en utilisant la programmation stochastique. Ils utilisent une approche à double-niveau avec des décisions de conception logistique prises avant connaissance de toute information sur la demande, ainsi que des décisions de contrôle opérationnelles réalisées au cours du temps en fonction des aléas. L'intérêt de leur modèle est illustré par un cas industriel. Une autre approche d'intégration des deux niveaux de décision s'appuie sur le couplage entre un modèle mathématique de planification et un modèle de simulation. Elle est illustrée par [Byrne et Bakir, 1999] et [Byrne et al., 2005]. Le modèle de planification élabore un plan optimal (en termes de coût) et prend comme paramètres d'entrée la demande et la capacité du système. Ensuite, ce plan passe en paramètre au modèle de simulation. Celui-ci vérifie si le planning proposé est réalisable. Dans le cas contraire, les capacités sont réévaluées en fonction des résultats obtenus par le modèle de simulation. Cette approche a été adoptée par [Kim et Kim., 2001] qui proposent un modèle de planification à plusieurs ressources, ainsi que des statistiques obtenues grâce au modèle de simulation, dans le

but de réajuster indépendamment la capacité de chaque ressource. [Gnoni et al., 2003] utilisent le même concept en l'élargissant à la planification d'une Supply Chain. De plus, les auteurs mettent en exergue le fait de pouvoir intégrer des événements aléatoires grâce à l'utilisation de la simulation.

[Gourgand et al., 2007] proposent une approche voisine de celle de [Byrne et Bakir, 1999] qui suggèrent le couplage de trois modèles mathématiques. Le premier modèle mathématique génère un plan de production. Celui-ci est chaîné à un second modèle d'ordonnancement qui permet de trouver une solution d'ordonnancement réalisable en considérant le plan de production précédemment généré. Si ce dernier trouve une solution réalisable, alors la procédure de chaînage s'arrête et elle conclut qu'il existe au moins une solution qui permet de mettre en œuvre le plan de production généré. Si aucune solution réalisable n'est trouvée, alors un troisième modèle d'ordonnancement est lancé de manière à ordonnancer le plan de production au-delà de l'horizon considéré, afin d'estimer une nouvelle capacité de production pour le modèle de planification. Ce processus est alors lancé de façon itérative jusqu'à obtenir un ordonnancement réalisable du plan de production généré. Les travaux de [Lemoine et al., 2007] sont très intéressants mais contrairement à l'approche de [Byrne et Bakir, 1999] qui simulent plusieurs fois le plan de production sous différents contextes (pannes, etc.), [Lemoine et al., 2007] en trouvant une seule solution, n'assurent que la faisabilité de l'ordonnancement. La perspective de ces travaux consiste donc non plus à trouver une solution réalisable mais à estimer la probabilité de faisabilité de l'ordonnancement, afin de rendre robuste la solution générée.

6. Positionnement de nos travaux et conclusions

Dans cet état de l'art, le problème de la planification de la production est considéré dans ses trois niveaux, ainsi que dans le cadre déterministe et incertain. Ce travail de recherche bibliographique a pour objectif d'offrir un aperçu le plus réel possible des thématiques de recherches choisies et des orientations scientifiques empruntées ces dernières années. Dans l'Annexe 1, une synthèse des études est réalisée à partir de l'analyse de la littérature relative au problème de la planification. Plus précisément, compte-tenu des différents paramètres mis en évidence au sein de cet état de l'art et des caractéristiques de nos travaux de recherche, nous avons comparé différents articles selon différents critères qui sont :

- Le type de décisions prises (stratégique, tactique, opérationnelle);

- Le type de l'article : La plupart des articles sont axés sur la résolution du problème (Resolution-oriented problem) plutôt que sur sa modélisation (Modeling-oriented problem) ;
- Le type de problème relatif aux problèmes de planification ;
- Le nombre de produits traités (problème multi-produits ou non) ;
- Le nombre de périodes (problème multi-périodes ou non) ;
- La prise en compte des contraintes de production (la capacité de production, le dimensionnement de la capacité, l'affectation des productions aux ressources de production, et la capabilité technique qui correspond au fait que certains moyens de production sont dédiés à la production d'un ensemble restreint de produits) ;
- La prise en compte des contraintes de stockage (la capacité globale, l'affectation des emplacements de stockage, dimensionnement des espaces de stockage) ;
- La prise en compte des contraintes liées aux stocks (la durée minimale de stockage) ;
- La nature du contexte (déterministe v.s. incertain) ;
- Le type de problème (problème multi-objectifs ou mono-objectif) ;
- L'approche de modélisation ;
- La procédure de solution ;

D'après l'analyse de la synthèse de la littérature portant sur les problèmes de la planification, et au regard des différents critères de comparaison définis, nous sommes venus à l'élaboration de différents constats. D'abord, nous avons constaté que la majorité des contraintes et paramètres considérés dans le cadre de nos travaux de recherche ont été auparavant abordés dans la littérature, mais d'une manière disparate, c'est-à-dire qu'aucun article ne les adresse simultanément. Par exemple, aucune étude ne prend en considération dans le même temps les deux contraintes de capabilité technique et de prise en compte de la durée minimale de stockage, avec les autres contraintes et paramètres. Il apparaît alors que nous sommes en capacité d'apporter un certain nombre d'éléments supplémentaires par rapport à ce

qui a été effectué précédemment. De plus, à notre connaissance, aucune référence ne considère la contrainte de la durée minimale de stockage d'une manière similaire à la nôtre. En effet, dans notre cas, au niveau tactique et opérationnel, les produits fabriqués sont affectés par la suite à des emplacements précis dans des zones de stockage. Au vu du caractère hétérogène de ces produits (caractéristiques chimiques), un seul type de produit à la fois (une quantité donnée qui correspond à un flot) est stocké dans une zone dédiée pour éviter la contamination de ces produits dans les stocks, Ainsi, la durée minimale de stockage correspond à un temps fixe qui s'ajoute au temps de fin de stockage pour chaque produit. A notre connaissance, la seule référence adressant cette contrainte dans un contexte tactique, est [Luis et al., 2016], sauf que cette durée est limitée à un nombre restreint de produits.

Un autre aspect important de cet état de l'art correspond à l'absence de prise en compte de la notion de capabilité technique des ressources de production, qui limite les ressources de production -dans notre cas les lignes de production- à concevoir tous les produits. En effet, à notre connaissance, seulement un article relatif à la planification des ventes et des opérations (S&OP), dans un contexte déterministe, aborde cette notion [D'Amours et al., 2008]. Or, ce dernier prend en considération cette contrainte dans un environnement de planification découplé, où la planification des ventes est effectuée d'une manière centralisée, tandis que la planification de la production et de la distribution est effectuée séparément et localement.

A travers ces différentes remarques, nous pouvons constater que la majorité des contraintes du problème de la planification de la production, du stockage et de la distribution dans les différents niveaux de décision, ainsi que dans les deux contextes déterministe et incertain, adressés dans le cadre de ces travaux de recherche, ont fait l'objet de recherches. De plus, aucune étude n'adresse l'affectation double des ressources de production. En effet, les produits peuvent être affectés dans un premier lieu à l'ensemble des sites de production, puis ensuite aux différentes lignes de production qui constituent ces sites de production. Puis, par la suite, ils sont affectés à des emplacements de stockage. Partant de ces différents éléments, la problématique considérée peut être définie comme un problème de planification de la production, de stockage et de distribution des produits en vrac.

7. Conclusion

L'état de l'art réalisé a permis de mettre en évidence et d'analyser l'ensemble des axes d'étude de ces travaux de thèse. Cette dernière a répondu à la volonté de recenser les différentes

références relatives aux problèmes de la planification au sein d'une chaîne logistique. En effet, il s'agissait d'identifier les principales thématiques de recherche liées à la planification ayant fait objet de travaux de recherches et de définir le plus scrupuleusement possible les différents paramètres et les contraintes associés. L'objectif de cet état de l'art est, en plus de faire une critique de la littérature existante, de montrer l'impossibilité d'utiliser les modèles et les méthodes de résolution existantes afin de répondre à la problématique adressée dans le cadre de ces travaux de recherche, et ainsi de mettre en véracité l'apport de nos travaux.

La richesse de la littérature concernant la planification dans un contexte déterministe a permis de montrer l'intérêt porté pour ces domaines d'étude et à mettre en évidence le nombre important des références réalisées. Néanmoins, que ce soit pour des problèmes de planification à long, moyen ou court-terme, l'état de l'art démontre qu'il est actuellement très laborieux de dresser un bilan concernant les performances des méthodes utilisées pour la résolution de ces problèmes. En effet, d'après le tableau de synthèse de l'état de l'art réalisé, nous constatons que très peu d'auteurs étudient le même modèle avec les mêmes critères, et sur les mêmes instances. Concernant les recherches réalisées sur les problèmes de planification dans un contexte déterministe, l'état de l'art proposé a mis en évidence le nombre important des références proposant des modèles pour la planification multi-produits et multi-périodes notamment vis-à-vis de la réalisation des plans de production en tenant compte des contraintes de capacité des ressources de production et de stockage. A contrario, très peu d'articles traitent la notion de capabilité technique des ressources de production, dans un cadre tactique. Le seul qui l'a pris en considération dans un cadre général est [D'Amours et al., 2008]. Or, les auteurs déterminent cette capabilité sur la base des volumes produits par chaque usine alors que dans nos travaux de recherche, la capabilité est détaillée au niveau des lignes de production et pour chaque produit fabriqué par les usines de production.

Néanmoins, des conclusions intéressantes peuvent être déduites de cet état de l'art. Peu d'auteurs traitent séparément les problèmes d'affectation des ressources de production et les emplacements de stockage, et à notre connaissance aucune référence ne les traite simultanément. En effet, [Leung et al., 2006] traitent le problème d'affectation des listes de produits avec les quantités à produire par les usines de production, et ceci à chaque période de l'horizon de planification. D'autre part, [Luis et al., 2016] traitent le problème d'affectation des emplacements de stockage, limitée par la contrainte minimale de stockage dans un contexte de planification tactique.

Cette analyse de l'état de l'art conclut sur la pertinence de problématiques citées dans le chapitre 1. Les problématiques étudiées peuvent être énoncées de la manière suivante :

- Modélisation et optimisation de la planification stratégique à la maille famille de produits d'une chaîne logistique, caractérisée par des processus continus de fabrication des produits en vrac ;
- Modélisation et optimisation de la planification tactique et opérationnelle à la maille produit d'une chaîne logistique, caractérisée par des processus continus de fabrication des produits en vrac ;
- Evaluation des performances par la simulation ;

Comme mentionné précédemment, ces problématiques sont basées sur l'étude et l'analyse d'un système continu composé de plusieurs ressources, dont l'objectif est la production ou la transformation, le stockage et la distribution des produits en vrac dans l'industrie chimique. Ces problématiques présentent une double complexité : *(i)* une complexité algorithmique qui se caractérise par la complexité des problèmes d'optimisation combinatoire et qui se traduit par la difficulté de la recherche d'une solution qui optimise un ou plusieurs critères de performance. Et *(ii)* une complexité structurelle et fonctionnelle, qui se traduit par la difficulté d'évaluer simplement les critères de performance.

Chapitre III : Modélisation pour la planification des systèmes logistiques industriels

Suite à la présentation du problème et de l'état de l'art réalisés respectivement dans le premier et le second chapitre, ce troisième chapitre a pour objectif de présenter la méthodologie de modélisation adoptée pour la planification des systèmes logistiques industriels. Après avoir rapidement présenté la méthodologie de modélisation utilisée, nous décriverons ensuite le modèle de connaissance en détaillant les différents sous-systèmes (physique, logique et décisionnel) et les différents liens existants entre eux. Nous élaborerons par la suite un réseau d'écoulement de flux pour le système étudié.

Sommaire

Chapitre III : Modélisation pour la planification des systèmes logistiques industriels..... 121
1. Introduction 125
2. Méthodologie de modélisation 128
2.1. Analyse du système 130
2.2. Décomposition systémique..... 131
2.2.1. Le sous-système physique..... 131
2.2.2. Le sous-système logique 131
2.2.3. Le sous-système décisionnel 132
2.3. Modèle de connaissance 133
2.4. Modèle d'action..... 134
2.5. Modèle de résultats..... 137
2.6. Analyse des résultats et prise de décisions 138
2.7. Synthèse de la méthodologie 138
3. Modélisation des systèmes logistiques industriels 139
3.1. Introduction 139
3.2. Modèle de connaissance : application au MAROC-Phosphore..... 140
3.2.1. Objectifs de la modélisation..... 140
3.2.2. Objet de la modélisation..... 141
3.2.3. Le sous-système physique (SSP)..... 142
3.2.3.1. Les usines..... 145
3.2.3.2. Les hangars de stockage..... 146
3.2.3.3. Les convoyeurs 147
3.2.3.4. Les entités de distribution 148
3.2.3.5. Les associations entre les composants du sous-système physique 148
3.2.4. Le sous-système logique (SSL)..... 151
3.2.5. Le sous-système décisionnel (SSD) 153
3.2.5.1. Les centres de décision 155
3.2.5.2. Les contraintes du système logistique industriel 156

3.2.5.3. Les règles de pilotage et de gestion 159
3.2.5.4. Les caractéristiques générales du système logistique industriel 160
3.2.6. Les liens entre les trois sous-systèmes 160
3.2.6.1. Les liens entre le sous-système physique et le sous-système logique 160
3.2.6.2. Les liens entre le sous-système physique et le sous-système décisionnel 164
3.2.6.3. Modèle UML global des liens entre les trois sous-systèmes 164
3.2.6.4. Réseau d'écoulement de flux 165
3.2.7. Modèle de graphe Multi-Flot de production et de distribution des produits en vrac 166
4. Conclusion 168

Liste des figures

Figure 3. 1- Processus de modélisation 129
Figure 3. 2- Comprendre le système et les industriels 130
Figure 3. 3- Interactions entre les sous-systèmes 131
Figure 3. 4- Elaborer le modèle de connaissance 134
Figure 3. 5- Elaborer le modèle d'action 135
Figure 3. 6- Processus de modélisation adapté aux problèmes d'optimisation 136
Figure 3. 7- Elaborer le modèle des résultats 137
Figure 3. 8- Analyser des résultats et prendre des décisions 138
Figure 3. 9- Décomposition par unité de Maroc Phosphore 142
Figure 3. 10- Décomposition par entité de l'unité de production d'engrais 143
Figure 3. 11- La chaîne logistique interne 144
Figure 3. 12- Modélisation UML du sous-système physique : diagramme de classes 145
Figure 3. 13- Modélisation UML des usines et des lignes de production associées 146
Figure 3. 14- Modélisation UML des hangars de stockage et leurs composants 147
Figure 3. 15- Modélisation UML des convoyeurs 147
Figure 3. 16- Modélisation UML des entités de distribution 148
Figure 3. 17- Schématisation et modélisation UML de l'association Usine-Hangar 149
Figure 3. 18- Modélisation UML de l'association Hangar-Convoyeur 149
Figure 3. 19- Modélisation UML de l'association Hangar-Entité de distribution 150
Figure 3. 20- Modélisation UML de l'association Ligne de production-Convoyeur 150
Figure 3. 21- Modélisation UML de l'association Portique de chargement-Convoyeur 150
Figure 3. 22- Modélisation UML du sous-système logique 151
Figure 3. 23- Relation entre l'élément de flux de matière et les commandes 152
Figure 3. 24- Modélisation UML du sous-système décisionnel 154
Figure 3. 25- Modélisation UML des interactions du sous-système décisionnel 155
Figure 3. 26- Les centres de décision 156
Figure 3. 27- Les contraintes du système logistique industriel 157
Figure 3. 28- Les contraintes de capacité 158
Figure 3. 29- Les contraintes de stockage 158
Figure 3. 30- Les contraintes d'utilisation des ressources 158
Figure 3. 31- La règle de conservation des stocks 160
Figure 3. 32- Les caractéristiques du système logistique industriel 160
Figure 3. 33- Modélisation UML de l'association Usine-Produit 161
Figure 3. 34- Modélisation UML de l'association Hangar-Produit 162
Figure 3. 35- Modélisation UML de l'association Entité de distribution-Produit 162
Figure 3. 36- Modélisation UML de l'association Arche-Produit 163
Figure 3. 37- Modélisation UML de l'association Ligne de production-Produit 163
Figure 3. 38- Modélisation UML du lien des sous-systèmes physique et décisionnel 164
Figure 3. 39- Modélisation UML gloabale des trois sous-systèmes 165
Figure 3. 40- Réseau d'écoulement de flux 167
Figure 3. 41- Modèle de graphe multi-flots 168

1. Introduction

L'étude du domaine industriel effectuée dans le premier chapitre et l'état de l'art présenté dans le deuxième nous ont permis de dégager les points importants concernant les problèmes de planification des systèmes logistiques industriels. Nous avons également démontré que la compétitivité d'une entreprise ne peut être assurée ou améliorée que par un processus stratégique de planification à long, moyen et court termes, dont le but est de mettre au point une démarche qui assure le succès de l'entreprise, et par la même occasion, sa pérennité. Ainsi pour renforcer cette compétitivité, de nombreuses entreprises se sont basées sur la mise en place et l'utilisation des méthodes et des outils d'aide à la décision.

Dans ce sens, les différentes techniques de modélisation et d'évaluation des performances représentent des outils et méthodes nécessaires aux industriels. En effet, avant de se lancer dans une étape de prise de décision, il est possible de tester et d'évaluer les différentes stratégies candidates de gestion de la capacité, de choisir la « meilleure », puis de planifier correctement le système logistique qui l'implantera. Après le choix de la stratégie, une étape d'amélioration du fonctionnement du système s'avère nécessaire, et cela au moyen de méthodes et d'outils permettant une analyse qualitative, quantitative et rationnelle. Pour y parvenir, il est indispensable de créer et de mettre à la disposition des industriels les différentes méthodes d'analyse et de spécification d'un système logistique industriel (ILS). Il est aussi nécessaire de proposer les différents outils et méthodes d'aide à la décision qui seraient exploitables par les experts spécialistes de l'industrie.

Les systèmes complexes à partage de ressources et les problèmes auxquels nous nous intéressons présentent une double complexité :

(i) une complexité structurelle et fonctionnelle. Elle se traduit par la difficulté de définir un critère de performance pertinent pour représenter l'objectif global d'un problème industriel, par la difficulté d'évaluer le ou les critères de performance pour apporter une aide à la décision, et enfin par la difficulté d'assurer un couplage de ces critères de performance avec des méthodes d'optimisation.

(ii) une complexité de résolution (ou algorithmique) qui se caractérise souvent par la nécessité de mettre en œuvre des méthodes complexes et parfaitement adaptées au

problème de sorte à pouvoir fournir une solution acceptable qui puisse optimiser le ou les critères de performance.

La complexité des systèmes logistiques industriels oblige les concepteurs à utiliser des approches de modélisation afin de concevoir leur système et de définir des stratégies de fonctionnement et/ou d'amélioration. Cependant, les modèles requis sont généralement volumineux et complexes, car ils implémentent une description globale d'un système logistique industriel. Ils doivent donc prendre en compte plusieurs types de flux interagissant dans des échelles de temps assez différentes. Afin d'augmenter le taux de réussite des études de modélisation des ILS, nous proposons d'utiliser une méthodologie de modélisation.

L'objectif de ce chapitre est de présenter de façon générale la méthodologie de modélisation que nous proposons d'utiliser. Selon [Arthur et al., 1986], une méthodologie :

- structure et ordonnance les tâches à réaliser afin d'atteindre les objectifs globaux ;
- possède des outils et des techniques pour la réalisation des tâches ;
- préconise un ordre pour la prise de certaines décisions ainsi que la manière de les prendre pour atteindre les objectifs fixés ;

Cette méthodologie a pour objectif de guider les experts industriels, ainsi que les experts en modélisation. Guider les premiers parce qu'ils ne sont pas familiers avec les outils et techniques de modélisation utilisés, et les deuxièmes parce qu'ils ne connaissent pas en détail le fonctionnement et la complexité du système étudié. Tout ceci a pour but d'éviter le cas de développement des bonnes solutions pour résoudre des faux problèmes.

Le processus de modélisation d'un ILS a comme objectif de fournir des réponses acceptables et concevables aux questions de type "What if ?" posées par les managers de ces systèmes, afin de les aider à trouver la ou les solutions satisfaisantes. Pour ce faire, ce processus nécessite un volume très important d'informations et des techniques éprouvées pour l'évaluation des critères de performance, dont le but est d'apporter une aide à la décision dans l'ensemble des chaînes logistiques axées sur la problématique de la planification.

Nous cherchons à mettre en place une méthodologie de modélisation des ILS avec des processus de fabrication continus. Cette méthodologie de modélisation, basée sur une approche systémique et intégrant des outils d'analyse fonctionnelle et structurelle, de spécification des

entités et de leurs comportements, de modélisation et d'évaluation des performances, permet l'élaboration d'un modèle de connaissance du système étudié, et sa traduction en un ou plusieurs modèles d'action (modèles informatiques) afin d'apporter une aide à la prise de décision lors de la planification des chaînes logistiques industrielles.

En particulier, modéliser l'ensemble des règles de gestion d'un ILS est une question délicate, car il n'existe pas nécessairement de structure claire pour cet ensemble. De plus, face à des objectifs prédéterminés, le modèle de cet ensemble de règles doit généralement être modifié afin que les règles adéquates et alternatives puissent être spécifiées et structurées hiérarchiquement. Dans ce contexte, les coûts d'une étude de modélisation destinée à utiliser des méthodes d'aide à la décision telles que la simulation et l'optimisation peuvent clairement devenir prohibitifs, voire inacceptables. Ils le deviennent en particulier si l'on considère que les résultats obtenus à partir d'une telle étude peuvent être décevants en l'absence de vérification et de validation appropriées de ces modèles [Landry et al., 1983] [Sargent, 1991] [Balci, 1994] [Kleijnen 1995]. Enfin, il convient de souligner que la tâche la plus difficile ne consiste pas à construire un modèle de simulation ou d'optimisation, mais à le rendre aussi réutilisable que possible pour d'autres études afin de justifier l'investissement initial dans l'étude.

Au vu de ces faits, et fortement influencés par les arguments de [Nance, 1981] [Gourgand, 1984] [Gourgand et Kellert, 1992] [Kellert et al., 1997], nous préconisons le développement d'un modèle conceptuel global d'un ILS avant la création d'un modèle d'optimisation et de simulation. Ce modèle conceptuel permet d'une part la communication avec les experts industriels et d'autre part, la modélisation du système. Ce modèle conceptuel comprend un modèle structurel, construit à partir d'une décomposition hiérarchique pensée selon une définition descendante du modèle. Plus précisément, la méthodologie de modélisation du ILS proposée dans ce chapitre devrait permettre d'atteindre les objectifs suivants :

- construire un modèle conceptuel global d'un ILS ;
- rendre le modèle conceptuel aussi durable que possible : ce modèle continue à vivre et peut évoluer avec le système, et ce même si les membres du personnel de modélisation qui l'ont construit ne sont plus dans l'entreprise ;
- garantir la réutilisabilité et l'adaptabilité d'un modèle conceptuel : de nombreuses entreprises (manufacturières, par exemple) présentent des systèmes construits sur le même modèle. Il est donc raisonnable de penser qu'une fois le modèle conceptuel d'un

ILS construit, ce modèle pourra être efficacement réutilisé (en termes d'efforts et de coûts) pour d'autres ILS quasi similaires ;

- décrire systématiquement des modèles d'optimisation et de simulation de ce modèle formel ;

Pour y parvenir, et en nous inspirant de l'expérience et des travaux en modélisation des systèmes de production acquis par l'équipe « Outils Décisionnels pour la Production et la Logistique » du laboratoire LIMOS UMR 6158, il est possible de s'appuyer sur une démarche d'analyse et sur un processus de modélisation tel que par exemple **ASCI** (**A**nalyse, **S**pécification, **C**onception, **I**mplémentation) [Gourgand et Kellert, 1992]. Cette démarche a été utilisée et adaptée dans différents domaines. Elle fournit les concepts de base destinés à la conception d'une méthodologie de modélisation pour une classe de systèmes. Elle propose ainsi des méthodes et outils qui facilitent la mise en œuvre du processus de modélisation, d'optimisation et d'évaluation des performances pour une classe de systèmes. Cette démarche a été choisie par [Kellert et al., 1997] pour proposer une méthodologie orientée objets pour la modélisation des systèmes flexibles de production, et par [Tchernev, 1997] [Gourgand et Tchernev, 1998] pour la modélisation des systèmes logistiques industriels. Elle a été enrichie par la suite lors des travaux de [Féniès, 2006] [Comelli et al., 2005] [Chabrol et al., 2006] pour la modélisation des chaînes logistiques industrielles et par [Rodier, 2010] pour la modélisation des systèmes hospitaliers.

Cette démarche suit un processus de modélisation basé sur la construction consécutive d'un modèle de connaissance (modèle de description du fonctionnement du système) et d'un ou plusieurs modèles d'action (modèles exploitables sur ordinateur). Ce processus sépare donc explicitement le recueil et la formalisation de la connaissance d'un système de l'exploitation de cette connaissance.

2. Méthodologie de modélisation

Dans cette partie, nous présentons succinctement le processus de modélisation basé sur les concepts proposés par [Gourgand, 1984] et sur lequel nous nous sommes appuyés pour élaborer la modélisation d'un système industriel. Ce processus guide l'expert dans cette phase de modélisation, il sépare explicitement le recueil et la formalisation de la connaissance afin de construire des modèles de connaissance et d'exploiter cette dernière pour élaborer des modèles

d'action. Ce processus (Figure 3.1) met en jeu quatre étapes principales : la première consiste à construire le modèle de connaissance en exploitant une décomposition systémique en trois sous-systèmes définis par la suite dans le paragraphe (§2.2) ; la deuxième permet de développer un modèle d'action ; la troisième porte sur la mise en œuvre et sur l'explotation du modèle d'action réalisé. Et la dernière étape, quant à elle, consiste à prendre des décisions et à réaliser des actions sur le système.

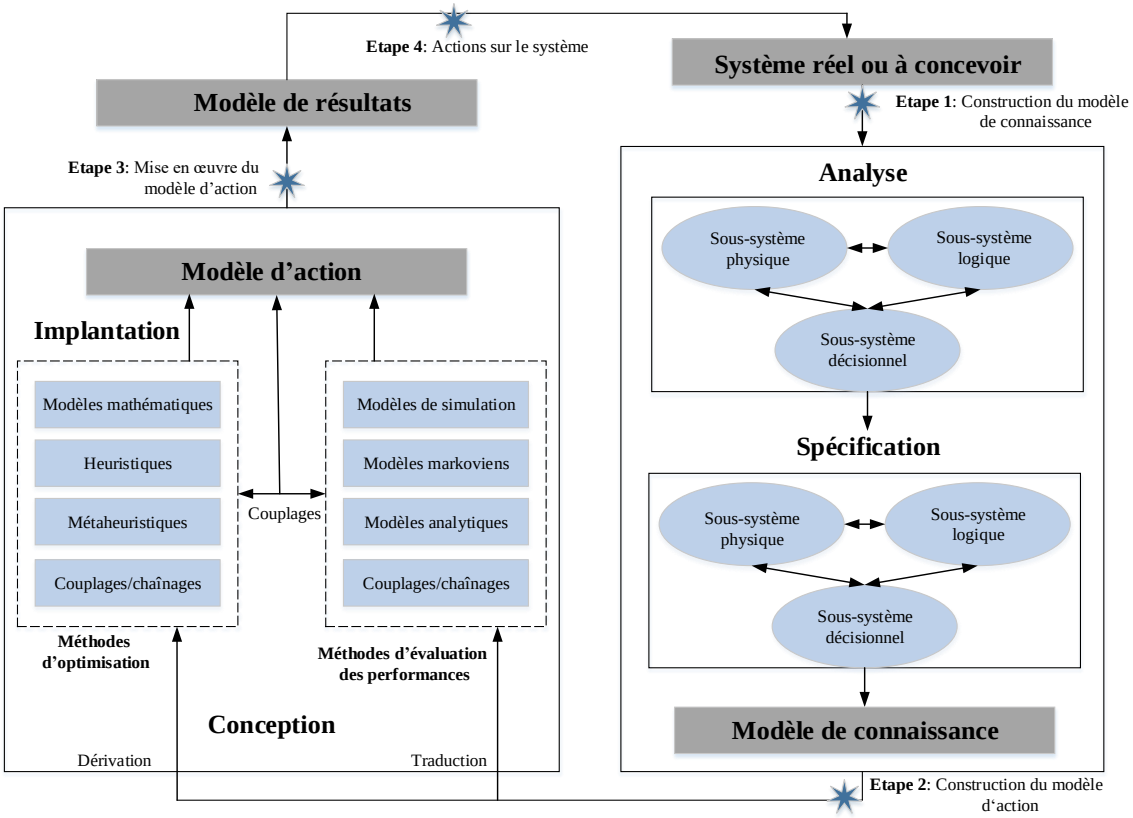


Figure 3. 1- Processus de modélisation

Dans la première étape, caractérisée par l'analyse et la spécification du système, l'objectif principal est de construire le modèle de connaissance. Ce modèle permet de décrire les entités et les interactions entre elles, et également de présenter les règles de fonctionnement pour apporter une aide à la mise en œuvre du processus de modélisation. L'obtention de ce modèle marque la fin de l'étape de spécification.

La deuxième étape porte sur l'exploitation du modèle de connaissance. A ce stade, un modèle d'action est d'ores et déjà élaboré. Il représente la traduction du modèle de connaissance dans un formalisme mathématique, dans un langage de programmation, ou dans un langage de

simulation, etc. Il décrit donc, selon le formalisme choisi, la partie modélisée ainsi que le choix de méthode de résolution.

Dans la troisième étape, l'exploitation du modèle d'action se caractérise par les éventuels réglages des méthodes proposées, ainsi que par la création d'un modèle de résultats, et enfin par l'interprétation et la synthétisation de ces résultats.

La dernière étape comporte la prise de décision et la déduction des actions à effectuer sur le système. Dans la suite nous détaillerons les différentes étapes du processus de modélisation.

2.1. Analyse du système

L'entrée principale pour débuter le processus de modélisation est l'activité « Comprendre le système et les acteurs » illustrée dans la Figure 3.2.

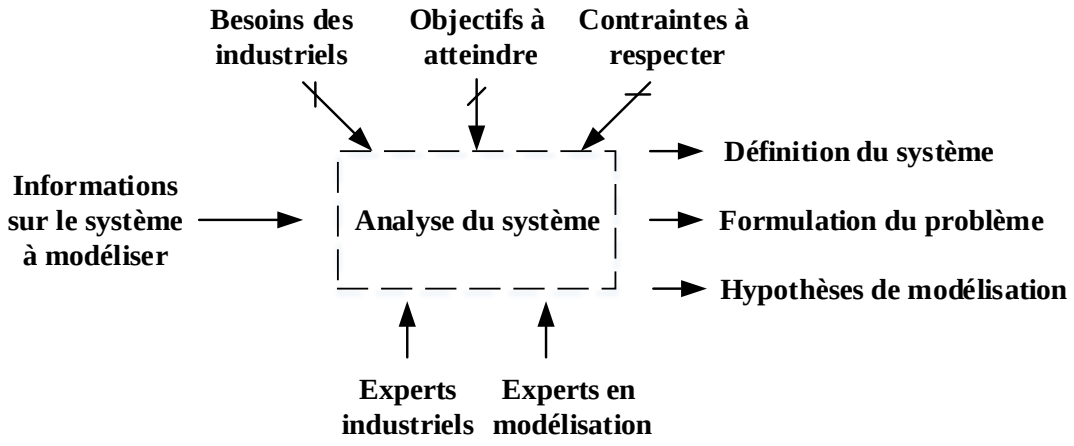


Figure 3. 2- Comprendre le système et les industriels

Cette étape incite les acteurs du système et les experts en modélisation à concentrer leurs efforts sur la collecte, l'étude et la compréhension des informations sur le système à modéliser. Cette étude pose une multitude de problèmes sous-jacents comme la définition des besoins des acteurs et des décideurs, la définition des objectifs que le système doit atteindre, ainsi que les différentes contraintes à respecter. Ces problèmes sont énoncés une première fois à ce niveau de processus. Les sorties de cette étape du processus de modélisation représentent la définition du système, la formulation du problème et les hypothèses de modélisation. Une vérification de la formulation du problème peut être menée à l'aide de questionnaires destinés à déterminer sa cohérence avec le problème étudié. La définition du système est une entrée de l'activité « Elaborer le modèle de connaissance », tandis que la formulation du problème et les hypothèses de modélisation représentent une contrainte de contrôle à satisfaire.

2.2. Décomposition systémique

Pour appréhender un système complexe, la méthodologie de modélisation que nous proposons d'utiliser préconise une décomposition du système en trois sous-systèmes complémentaires et communicants (Figure 3.3).

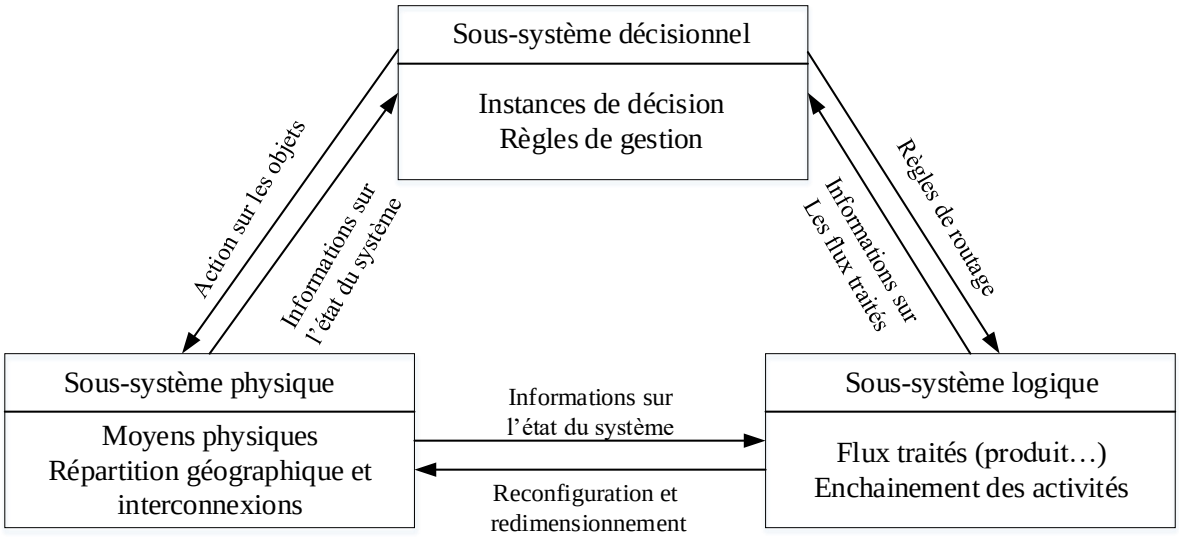


Figure 3. 3- Interactions entre les sous-systèmes

2.2.1. Le sous-système physique

Il est décomposé de façon hiérarchique en unités constituées d'entités physiques nécessaires à la réalisation de l'ensemble des opérations. Il définit l'ensemble des moyens de production, de manutention, de transport et de stockage, tous nécessaires à la réalisation du processus logistique pour la transformation des flux physiques à partir de l'acquisition du brut (matières premières), jusqu'à la livraison du produit fini au client. Sa topologie définit la répartition géographique des moyens physiques (ressources actives et passives) et leurs interconnexions.

2.2.2. Le sous-système logique

Le sous-système logique décrit les entités traversant le système. Pour un système industriel, le sous-système logique se compose de l'ensemble des matières premières, des produits semi-finis et des composants, de l'ensemble des nomenclatures et de l'ensemble des gammes associées, ainsi que des flux financiers qui viennent en contrepartie de chaque élément du flux physique. La nomenclature d'un produit représente l'ensemble des matières premières,

des composants élémentaires et des produits semi-ouvrés, ainsi que leur quantité, qui sont nécessaires pour la production d'un article. La gamme de fabrication décrit en détail les opérations à effectuer sur les différents composants de la nomenclature afin d'obtenir le produit fini. En effet, chaque type de produit peut être représenté sous la forme d'une gamme. Nous distinguons deux types de gammes : les gammes « logiques » et les gammes « opératoires ».

Une gamme logique d'un produit décrit le séquencement des opérations élémentaires de transformation fonctionnelle, ainsi que les types de ressources utilisées par ces opérations. Elle décrit le processus de transformation permettant d'obtenir le produit fini à partir de son état brut. Chaque opération élémentaire de transformation fonctionnelle apporte de la valeur ajoutée.

Une gamme opératoire permet de décrire le séquencement de l'ensemble des opérations de transformation fonctionnelle et de transfert, représentant ainsi la succession des entités physiques du système industriel. Dans ce type de gamme, la circulation des flux permet d'intégrer d'une part l'aspect fonctionnel (moyens de transformation), et d'autre part l'aspect de transfert (moyens de transport et de stockage). La structure de cette gamme opératoire est adaptée à l'ordonnancement des opérations et au calcul des charges relatives à chaque moyen physique du système.

L'utilisation de ces deux types de gammes permet de fournir de manière cohérente (par rapport au modèle de connaissance) les différentes données nécessaires à l'utilisation des modèles mathématiques (optimisation de la circulation des flux au moyen de la programmation linéaire par exemple)

Le sous-système logique nous invite à définir la matrice de charge du système imposée par les commandes des clients. Cette matrice conduit à définir les objectifs de transformation des flux physiques et satisfait les éléments du flux financiers.

2.2.3. Le sous-système décisionnel

Le sous-système décisionnel est composé de l'ensemble des règles de gestion, de pilotage et de contrôle, nécessaires à un fonctionnement harmonieux du système industriel. Chaque règle comporte un ensemble de prémisses et de conséquents. Toutes les règles dont les prémisses concernent plusieurs entités des sous-systèmes logique et physique appartiennent au sous-

système décisionnel. De même, toutes les règles dont les actions portent sur plusieurs entités des sous-systèmes logique et/ou physique, appartiennent au sous-système décisionnel.

Les actions à réaliser, déduites par le sous-système décisionnel à partir de ces informations, sont implantées dans les sous-systèmes logique et physique en modifiant les valeurs des attributs et/ou le comportement des entités visées. Il agit sur les deux sous-systèmes auparavant définis pour assurer une maîtrise du processus logistique étudié, afin de satisfaire les contraintes et les objectifs imposés par l'environnement. En d'autres termes, il permet de spécifier l'ensemble des règles de gestion, de fonctionnement, et de pilotage des moyens physiques, dont les actions affectent les différentes entités des trois sous-systèmes.

2.3. Modèle de connaissance

Dans cette étape (Figure 3.4), le recueil et la structuration des différentes entités composant le système, ainsi que leurs interrelations s'avèrent nécessaires. Les données et les règles de fonctionnement y sont également présentées. L'objectif de cette étape est de construire un modèle de connaissance qui est une formalisation dans un langage naturel ou graphique de la structure et du fonctionnement du système. Ce modèle est construit et mis à jour pour faciliter la mise en œuvre du processus de modélisation, et pour assurer une compréhension précise du système par les experts de modélisation en fonction des objectifs à atteindre. Dans cette étape, le niveau de détail et le type d'abstraction doivent être fixés, tout comme les entités et les types d'interactions jugées pertinentes. En raison de la complexité d'obtention du modèle de connaissance d'un système complexe, cette étape nécessite une démarche structurée qui maîtrise cette complexité en vue de vérifier et de valider le modèle de connaissance.

Ce modèle doit contenir, entre autres, les informations pertinentes pour résoudre les problèmes posés. Il faut, d'une part, conduire une analyse structurelle et fonctionnelle du système afin de recueillir et formaliser efficacement et de manière fiable la connaissance du système. Il faut, d'autre part, spécifier les activités et donc les flux qui traversent ce système, et les règles de fonctionnement qui gèrent ces flux.

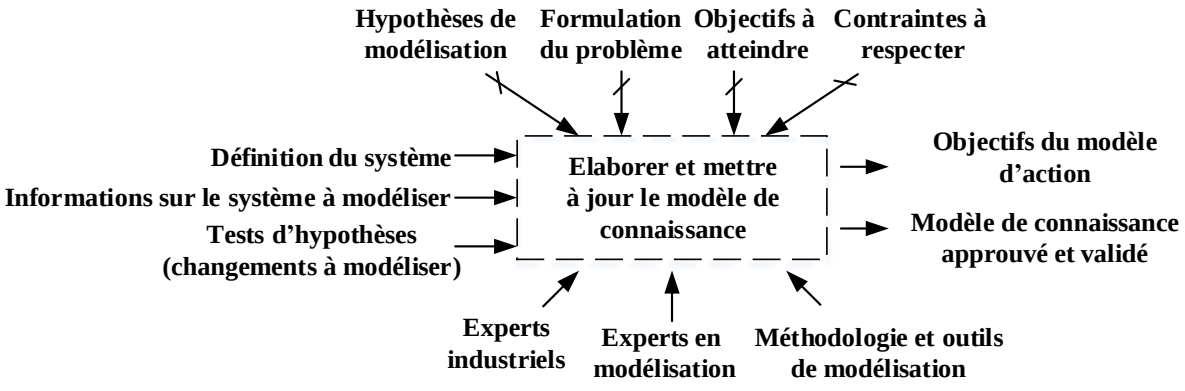


Figure 3. 4- Elaborer le modèle de connaissance

Toutes les hypothèses faites en amont, en phase de l'élaboration du modèle de connaissance, doivent être appropriées, afin que ce modèle soit une représentation conforme à la réalité, en tenant compte des objectifs qu'il doit permettre d'atteindre. Lorsqu'il s'agit de modéliser des changements (de type de machines, de type de moyens de transport, de taille des lots transportés, ou bien la modification des règles de gestion/pilotage du système…), il faut vérifier leur cohérence avec le mode de fonctionnement du système. Ces altérations doivent respecter les postulats du système, afin de ne pas élaborer un modèle de connaissance d'un système qu'on ne pourrait pas construire ou faire évoluer.

2.4. Modèle d'action

La validation du modèle de connaissance représente une entrée principale de l'étape « Elaborer et mettre à jour le modèle d'action » illustrée sur la Figure 3.5. Dans cette étape, un ou plusieurs modèles d'action sont déduits du modèle de connaissance. Le choix du formalisme et de la classe du modèle d'action dépend des objectifs fixés par les managers du système. En réalité, ces modèles d'action résultent de la traduction du même modèle de connaissance selon le formalisme choisi et selon le degré de finesse souhaité. Le(s) modèle(s) d'action se base (ent) sur un ensemble d'outils d'aide à la décision généralement complémentaires : les outils de la recherche opérationnelle, analytiques, les outils de simulation, les outils statistiques…etc. De ce fait, ces modèles d'actions dépendent de l'outil que l'on veut exploiter, des hypothèses simplificatrices concernant la structure et/ou le fonctionnement du système, et de la matrice de charge à laquelle le système est soumis. Ces modèles d'actions sont exploitables sur calculateur et fournissent des critères de performance qui permettent d'agir sur le système. Plusieurs modèles d'actions peuvent être déduits à cette étape. Parmi les modèles les plus courants on

peut trouver : les modèles de simulation, les modèles mathématiques, les modèles markoviens, etc.

Ces différents exemples de modèles d'actions sont souvent incompatibles entre eux. En effet, leur intégration dans une approche globale de modélisation nécessite un certain ajustement des modèles et un couplage qui prend en considération les différents problèmes de modélisation et les contraintes des différents modèles. Ceci souligne l'intérêt du filtrage et de la dérivation du modèle de connaissance afin de construire le modèle d'action, correspondant au formalisme et à la classe de modèles choisie.

En parallèle de cette étape d'élaboration du modèle d'action, une vérification de ce modèle s'avère nécessaire, elle consiste à se garantir que le modèle d'action traduit bien les choix et les hypothèses exprimés par les différents acteurs. Le résultat final de cette étape est l'obtention du modèle d'action vérifié et le choix des méthodes de la résolution.

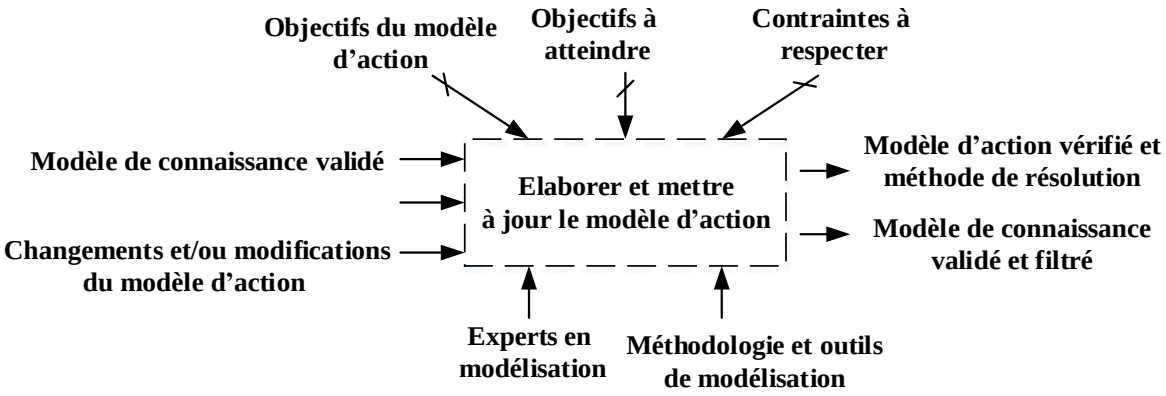


Figure 3. 5- Elaborer le modèle d'action

Les étapes présentées précédemment sur la construction du modèle de connaissance et l'élaboration du modèle d'action du processus de modélisation sont générales. Nous présentons ci-après (Figure 3.6) leur adaptation aux problèmes d'optimisation. En effet, et en fonction des hypothèses simplificatrices posées, deux types de modèles d'action peuvent être déduits : les modèles d'optimisation et les modèles d'évaluation des performances.

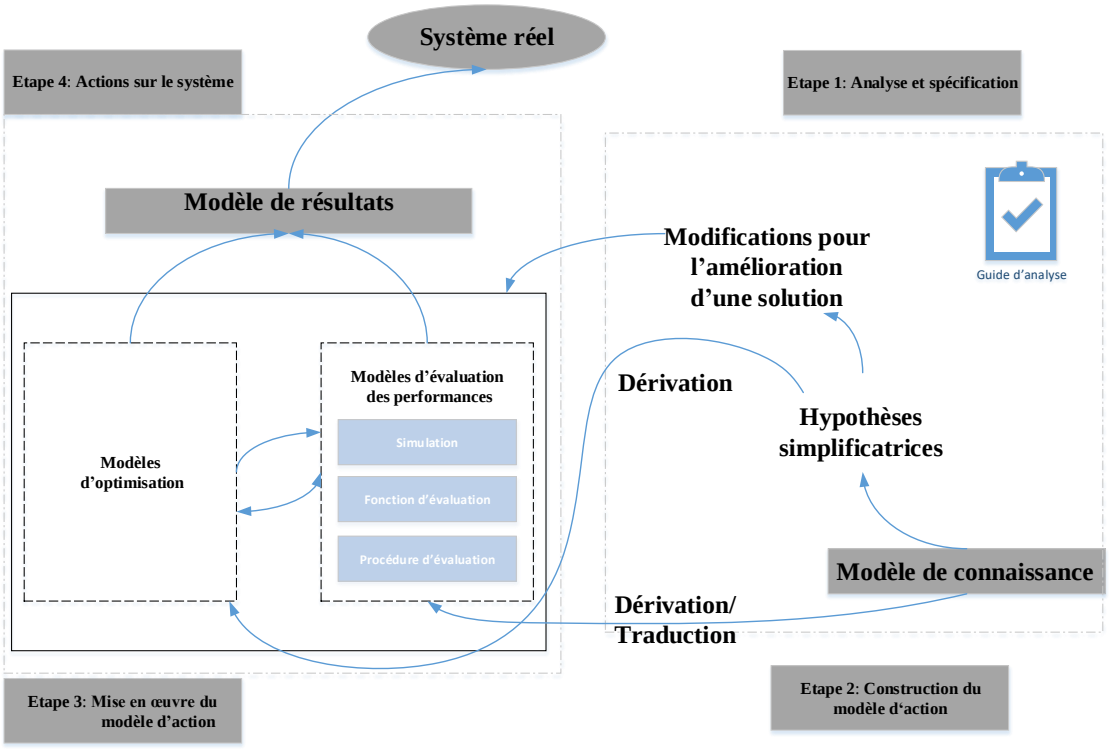


Figure 3. 6- Processus de modélisation adapté aux problèmes d'optimisation

Les modèles d'évaluation des performances ont pour objectif d'évaluer et d'améliorer la qualité d'une solution proposée par un algorithme d'optimisation. En fonction de la complexité du problème étudié, ces modèles d'évaluation des performances peuvent prendre la forme d'un modèle de simulation, d'une fonction d'évaluation ou d'une procédure d'évaluation. Suite à une démarche itérative avec le modèle d'optimisation de la performance, ce dernier utilise l'évaluation pour proposer par la suite de nouvelles solutions.

L'élaboration du modèle d'action nécessite soit la traduction directe du modèle de connaissance en un modèle de simulation, soit sa dérivation en un modèle d'évaluation des performances. Il est donc nécessaire de construire un modèle de connaissance le plus fin et complet possible, relativement aux objectifs de l'étude. La traduction consiste à choisir un langage adéquat pour réécrire le modèle de connaissance en un modèle de simulation. La dérivation consiste à ajouter des hypothèses simplificatrices lors de la traduction du modèle de connaissance. Ces hypothèses simplificatrices relatives au modèle de connaissance définissent les fonctionnalités du système étudié qui seront prises en compte, ainsi que le degré de finesse du modèle d'évaluation des performances ou du modèle d'optimisation.

Pour les modèles d'optimisation, il est aussi indispensable d'énoncer les hypothèses simplificatrices associées à la méthode d'optimisation choisie et les modifications à apporter pour l'amélioration de la solution. En effet, certaines approches d'optimisation demandent des hypothèses spécifiques. Par exemple la programmation linéaire ne prend pas en compte les évènements aléatoires tels que les pannes, par exemple.

2.5. Modèle de résultats

La vérification et la validation du modèle d'action permettent l'élaboration d'un modèle de résultats qui exploite le modèle d'action dans le but de fournir des résultats à partir desquels on construit le modèle de résultats (quantitatifs et qualitatifs). Dans cette étape, et à partir du même modèle d'action, on choisit les types de résultats qu'on veut obtenir ainsi que la manière de les présenter. Par exemple, l'exploitation d'un modèle de simulation qui traduit le fonctionnement réel du système permet de générer plusieurs critères de performances des différentes entités qui composent le système. Elle permet également de les analyser statistiquement afin de structurer, par exemple, un tableau de bord prospectif.

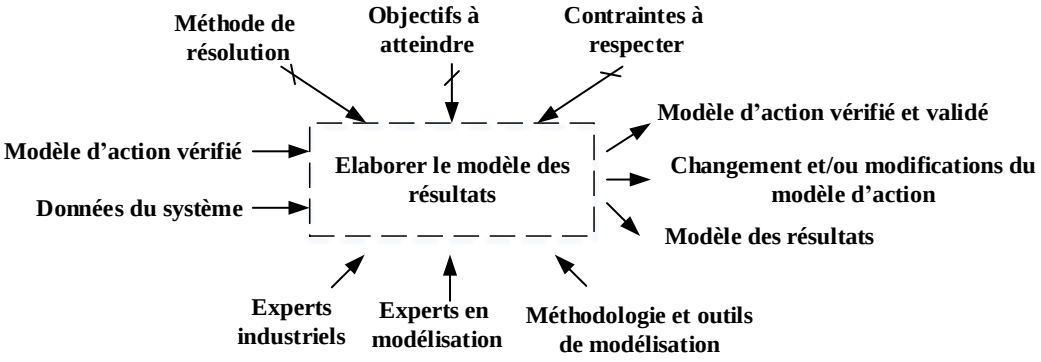


Figure 3. 7- Elaborer le modèle des résultats

Cette phase (Figure 3.7) comprend quatre étapes. La première étape consiste à élaborer des plans d'expérience qui fournissent la planification de la validation et la planification des expériences. La planification de la validation consiste à choisir les outils et méthodes en rapport avec le formalisme choisi et la méthode de résolution du modèle d'action, et à définir les paramètres cibles à comparer, l'analyse de données nécessaires pour la validation…etc. Tandis que la planification des expériences permet de déterminer les paramètres pertinents à évaluer, le nombre d'exécutions, la corrélation entre les différents paramètres…etc. La deuxième étape a pour objectif de valider le modèle d'action, en effectuant des tests et des évaluations pour confirmer la représentation de la réalité par le modèle d'action. La troisième étape tend quant à

elle à exécuter les différentes expériences. Enfin, la quatrième étape vise à construire le modèle des résultats. Dans cette dernière étape le choix des résultats (quantitatifs et/ou qualitatifs) ainsi que la manière de les présenter sont réalisés, les paramètres et leurs interrelations sont présentés et définis. Le résultat final de cette phase permet d'obtenir un modèle des résultats et de valider le modèle d'action. En somme, elle fournit une base sur laquelle les experts industriels vont pouvoir prendre leurs décisions.

2.6. Analyse des résultats et prise de décisions

En dernière étape du processus de modélisation, et après l'élaboration du modèle des résultats, les experts industriels et les experts en modélisation examinent et analysent les résultats obtenus afin de prendre les décisions et agir sur le système et/ ou tester les hypothèses nécessitant des modifications du modèle de connaissance. Cela a pour but d'améliorer les performances qualitatives ou quantitatives du système. En sortie de cette étape, deux décisions sont prises, la première consiste à intervenir sur le système et à clôturer le processus de modélisation, et la deuxième donne la possibilité de réitérer le processus de modélisation. Les décisions prises par les managers du système se basent sur la construction d'un tableau de bord prospectif, comparable à celui qu'ils utilisent pour piloter leurs activités réelles. Cette étape est illustrée dans la Figure 3.8.

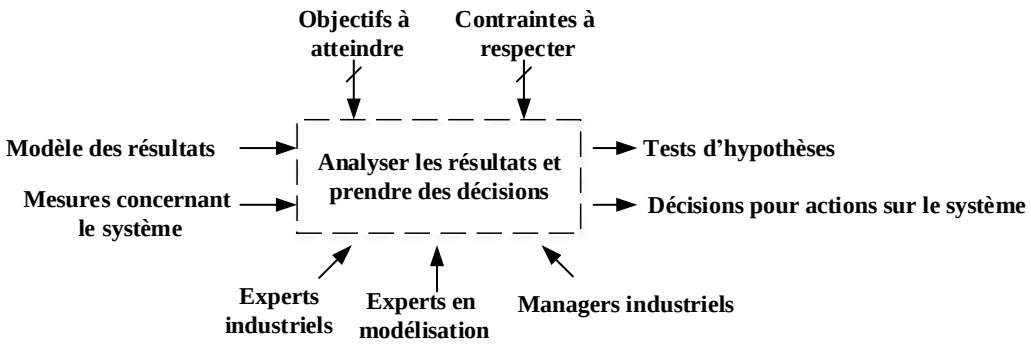


Figure 3. 8- Analyser des résultats et prendre des décisions

2.7. Synthèse de la méthodologie

La méthodologie de modélisation pour l'aide à la décision qui est présentée ici, propose un cadre conceptuel et générique qui permet de modéliser une classe des systèmes en partant de l'analyse de la problématique et de la réalisation d'un modèle de connaissance de cette classe, à la génération d'un modèle d'action et une analyse des résultats pour un système de la classe. Cette démarche exige l'implication à la fois des experts en modélisation et des experts

industriels, et elle ne soustrait aucunement à leur prise de décision. Cette démarche a été construite en se basant sur plusieurs études concernant la modélisation et l'évaluation des systèmes complexes comme les systèmes logistiques industriels, ([Tchernev, 1997] ; [Goujon, 1997] ; [Lacomme, 1998] ; [Boutevin, 2003] ; [Cossard, 2004] [Féniès, 2006]] ; [Rodier, 2010] ; [Essaadi et al., 2018]…). Dans la section suivante la méthodologie sera employée pour les systèmes logistiques industriels. Le choix du formalisme du modèle de connaissance, le choix du modèle d'action, ainsi que les règles de passage seront détaillés.

3. Modélisation des systèmes logistiques industriels

3.1. Introduction

Notre objectif est de concevoir un modèle de connaissance d'un système logistique industriel destiné à mettre en place des outils d'aide à la décision pour les managers industriels. L'étape d'analyse du domaine consiste à déterminer et à définir toutes les entités qui sont communes à un nombre significatif d'applications des systèmes logistiques industriels. L'analyse des objets propres à ces systèmes a pour objectif de définir les différentes classes d'objets, leurs attributs, et leurs interrelations, dans le but de capitaliser et de formaliser les connaissances indispensables à la compréhension du domaine d'étude.

Pour décrire le comportement des éléments constituants le système, nous adoptant une approche systémique des systèmes logistiques industriels. Celle-ci décompose le système étudié en trois sous-systèmes communicants qui permettent de structurer et de hiérarchiser la connaissance nécessaire à la modélisation. Chaque entité est définie sous la forme d'une classe avec des spécifications caractérisées par des attributs. Les entités du sous-système physique (SSP) représentent l'ensemble des moyens de production, de stockage et de transport nécessaires à la réalisation du processus logistique pour la transformation du flux physique depuis l'approvisionnement des matières premières jusqu'à la livraison des produits finis. Les entités du sous-système logique (SSL) permettent de décrire les éléments de flux qui circulent dans le système (matière première, produit semi-fini, composants, produit final …), ainsi que l'ensemble des nomenclatures et gammes associées. Il s'agit de définir la charge du système imposée par les commandes clients. Tandis que les entités du sous-système décisionnel (SSD) définissent et mettent en œuvre les règles de gestion concernant l'activité, les ressources et l'ensemble des flux en prenant en compte les contraintes. C'est à partir de l'analyse des besoins exprimés par les clients que sont déterminés les sous-systèmes logique (SSL) et décisionnel

(SSD) en intégrant l'ensemble des contraintes du système (physiques, temporelles…), ainsi ce sont les deux sous-systèmes physique (SSP) et logique (SSL) qui remontent l'information concernant l'utilisation des ressources, l'activité, et les flux au sous-système décisionnel.

Dans cette partie, nous élaborons un modèle de connaissance du site Maroc Phosphore III-IV qui représente, comme mentionné dans le chapitre I, le périmètre de nos travaux de recherche. En reprenant la décomposition systémique en trois sous-systèmes, nous présentons chaque sous-système en détail, ainsi que les associations entre eux en utilisant le langage de modélisation UML (Unified Modeling Language) [Fowler, 2004]. Compte tenu de l'objectif d'utiliser plusieurs méthodes d'aide à la décision (programmation linéaire et simulation), les différentes contraintes de fonctionnement du système sont également exposées.

Les phases d'Analyse et de Spécification portent sur l'analyse du domaine étudié et les objectifs de la modélisation. Ces deux phases sont formalisées par la construction d'un modèle de connaissance. L'étape de l'analyse consiste à proposer une décomposition hiérarchique du système étudié et d'identifier les entités et les objets qui les constituent, ainsi que le flux de matière associé, et ceci, à chaque niveau de décomposition. L'étape de spécification, quant à elle, a pour objectif de fournir des méthodes de spécification des flux et du sous-système décisionnel.

Nous donnons la décomposition du domaine des systèmes logistiques industriels en trois sous-systèmes communicants sous la forme d'un diagramme de classes UML (Figure 3.39), et nous détaillons dans la suite la lecture de ce diagramme de classe, en définissant chacune des classes et chacune des relations.

3.2. Modèle de connaissance : application au MAROC-Phosphore

3.2.1. Objectifs de la modélisation

MAROC-Phosphore veut étendre ses activités, augmenter le portefeuille de produits et ainsi offrir un meilleur service-client. Les engrais produits par les lignes de l'atelier dédiées sont ensuite stockés dans des hangars de capacité différente, avant d'être expédiés par bateau (cf. chapitre 1 § 2.4). Ces hangars ne sont pas tous connectés aux convoyeurs qui chargent les bateaux, ce qui implique des manutentions additionnelles. Ils peuvent accueillir plusieurs références d'engrais, avec des contraintes de séparation plus ou moins drastiques. L'allocation dynamique des zones de stockage, en fonction des capacités, des commandes à livrer et des

moyens de manutention mobilisés, induit des contraintes sur la planification de la production des engrais. L'accroissement prévisionnel de l'étendue du portefeuille des qualités d'engrais offerte par l'OCP, combiné d'une part avec une importante saisonnalité de la demande (pouvant militer en faveur d'une combinaison de production à la commande et de production pour stock) et, d'autre part, avec l'existence d'aléas sur les alimentations et les enlèvements, demande une étude du système industriel destinées à apporter une aide à la décision lors de la planification de l'activité industriel. Cette définition d'une allocation dynamique et robuste de l'espace de stockage doit être envisagée dans la perspective plus stratégique de la possibilité d'une introduction partielle et datée de la production à la commande pour réaliser un meilleur ajustement charge-capacité. Elle doit être couplée aux outils d'aide à la décision de la planification et de l'ordonnancement de l'atelier d'engrais.

Dans ce contexte, les responsables de l'entreprise sont obligés de réaliser des améliorations concernant la planification de la production sur le long, moyen et court-terme. Il s'agit d'étudier le système industriel de l'entreprise de MAROC-Phosphore afin d'améliorer la connaissance de la situation existante en matière de maîtrise du processus industriel pour :

- Mieux définir et mieux respecter le contrat liant l'entreprise à ses clients ;
- Améliorer la compétitivité interne en matière de coûts, de délais et de qualité pour mieux répondre à la demande du client grâce à :
  - une flexibilité améliorée ;
  - la détection et la suppression des opérations inutiles et des aléas de production ;
  - l'amélioration de l'aménagement et éventuellement du procédé de fabrication ;
- Relever les indications nécessaires permettant une amélioration de la gestion du processus industriel au sein de l'entreprise ;

3.2.2. Objet de la modélisation

L'activité industrielle a pour objectif de produire des objets physiques (engrais). Le ILS comporte des flux de matières, des unités d'activités physiques, des familles de produits et un processus décisionnel. L'objet de la modélisation porte sur la circulation des flux de matières et des flux d'information à travers l'entreprise. En d'autres termes, il s'agit de modéliser l'écoulement des flux à travers les différentes unités composant l'ILS depuis l'entrée des

matières premières et des composants jusqu'à l'expédition des produits finis.

Les différentes étapes de l'analyse du ILS en vue de sa modélisation comprennent :

- L'identification du processus de production et des flux de matières ;
- L'analyse détaillée des flux de matières ;
- L'identification du processus de programmation ;
- L'analyse détaillée des flux d'informations concernant la gestion des flux de matières ;

3.2.3. Le sous-système physique (SSP)

Au niveau le plus général, un système logistique industriel peut être un site (dans notre cas le site Maroc Phosphore III-IV qui représente le périmètre de notre étude). Pour prendre en compte les différents termes qui qualifient les sous-systèmes hiérarchiques, nous proposons le terme générique « Maillon opérationnel ». Ainsi, pour un niveau hiérarchique quelconque, l'expert industriel pourra définir le terme approprié en vigueur dans son système. Un site industriel est donc vu comme un ensemble hiérarchisé de maillons opérationnels.

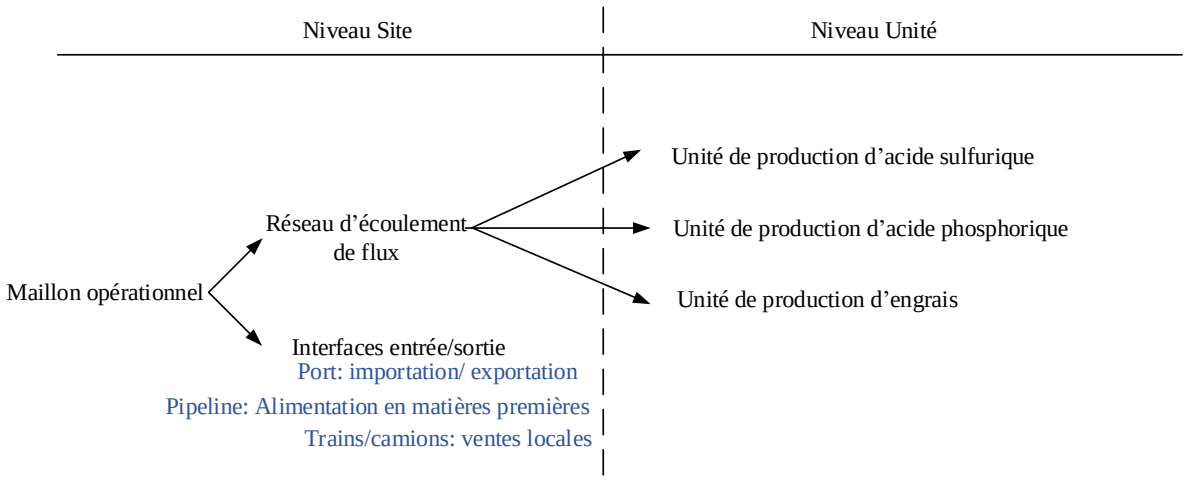


Figure 3. 9- Décomposition par unité de Maroc Phosphore

Le système logistique industriel de Maroc Phosphore III-IV étudié se compose de différents « maillons opérationnels » qui sont : l'unité de production d'acide sulfurique, l'unité de production de l'acide phosphorique et l'unité de production d'engrais. (Figure 3.9).

Ainsi le sous-système physique d'un système logistique industriel est considéré comme étant un maillon opérationnel composé (Figure 3.10) d'un réseau d'écoulement des flux de matières et d'une ou plusieurs interfaces d'entrée/sortie interconnectant le maillon opérationnel

au monde externe. Ainsi l'unité de production d'engrais à laquelle nous nous intéressons est vue comme un maillon opérationnel composé d'un ensemble d'entités de production, de stockage, de transport et de distribution. Cette décomposition permet d'obtenir une vision hiérarchique du système étudié.

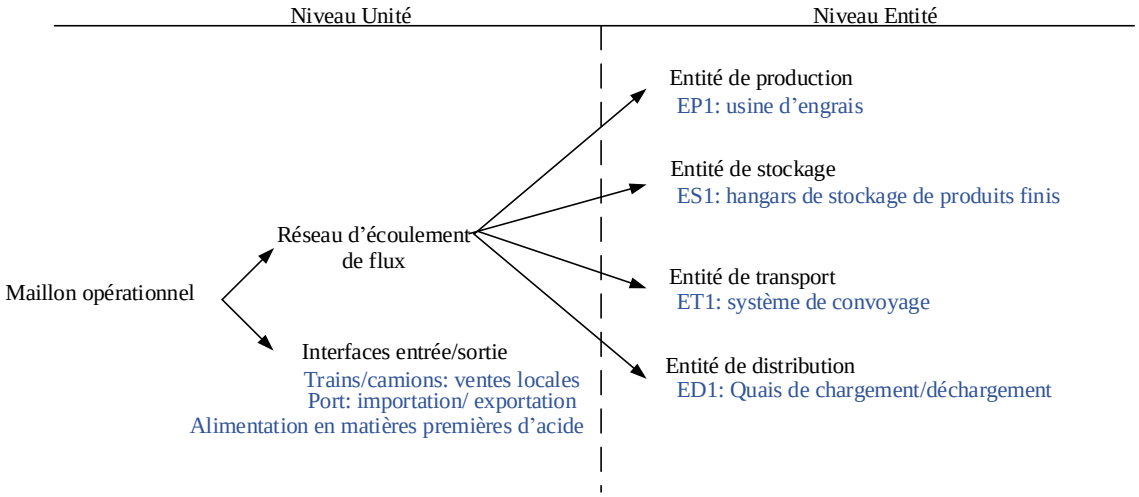


Figure 3. 10- Décomposition par entité de l'unité de production d'engrais

Conformément à cette décomposition, ce maillon opérationnel de l'unité de production d'engrais étudié peut être considéré comme étant une chaîne logistique interne (Figure 3.11). Cette dernière se présente comme un réseau d'entités de transformation et de stockage interconnectées par des voies de transport et de transfert empruntées par des produits. L'on applique cette caractérisation pour distinguer les entités de transformation des flux physiques et d'information, et la connexion entre eux.

Dans cette chaîne logistique interne apparaîssent cinq types d'entités : les fournisseurs, les usines, les hangars de stockage, les entités de distribution et les clients finaux, pouvant être reliés par des moyens de transport. Nous nous intéressons donc à la modélisation en vue d'apporter une aide à la décision de la chaîne logistique interne. Cela signifie que nous ne considérons pas les problèmes de transport et de disponibilité de la matière première entre les fournisseurs et les usines, ainsi que le transport entre les entités de distribution et les clients finaux (la demande est exprimée au niveau de l'entité de distribution). Ces hypothèses de modélisation sont pour autant justifiées, considérant que le taux de satisfaction des besoins de l'unité de production d'engrais par les fournisseurs de matières premières et composants est de cent pour cent. Les entités de distribution (quais de chargement) chargent les moyens de transport qui sont planifiés en fonction des demandes à satisfaire. Il est évidemment possible

de connaître des ruptures d'approvisionnement et de moyens de transports suite à des évènements aléatoires.

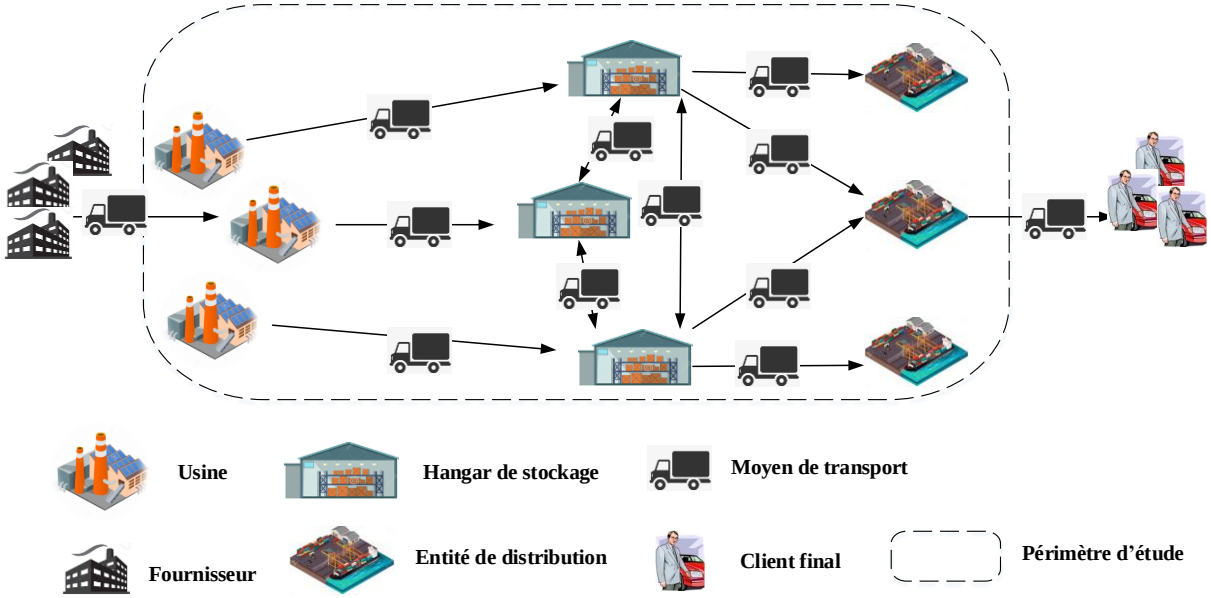


Figure 3. 11- La chaîne logistique interne

Dans le contexte du périmètre d'étude de notre système, nous retrouvons dans le sous-système physique les entités suivantes :

- Usines (entités de production) ;
- Hangars de stockage (entités de stockage) ;
- Convoyeurs (entités de transport) ;
- Quais/portiques de chargement (entités de distribution) ;

Pour la décomposition systémique du système logistique industriel étudié, en sous-système physique, logique et décisionnel, notre choix s'est porté sur une approche orientée objet utilisant le langage UML [Fowler, 2004], qui est une formalisation normalisée et performante, et un support de communication qui facilite la compréhension des représentations abstraites complexes. Pour ce découpage en sous-systèmes, nous avons utilisé les diagrammes de classes.

La Figure 3.12 donne le modèle UML du sous-système physique dans sa globalité.

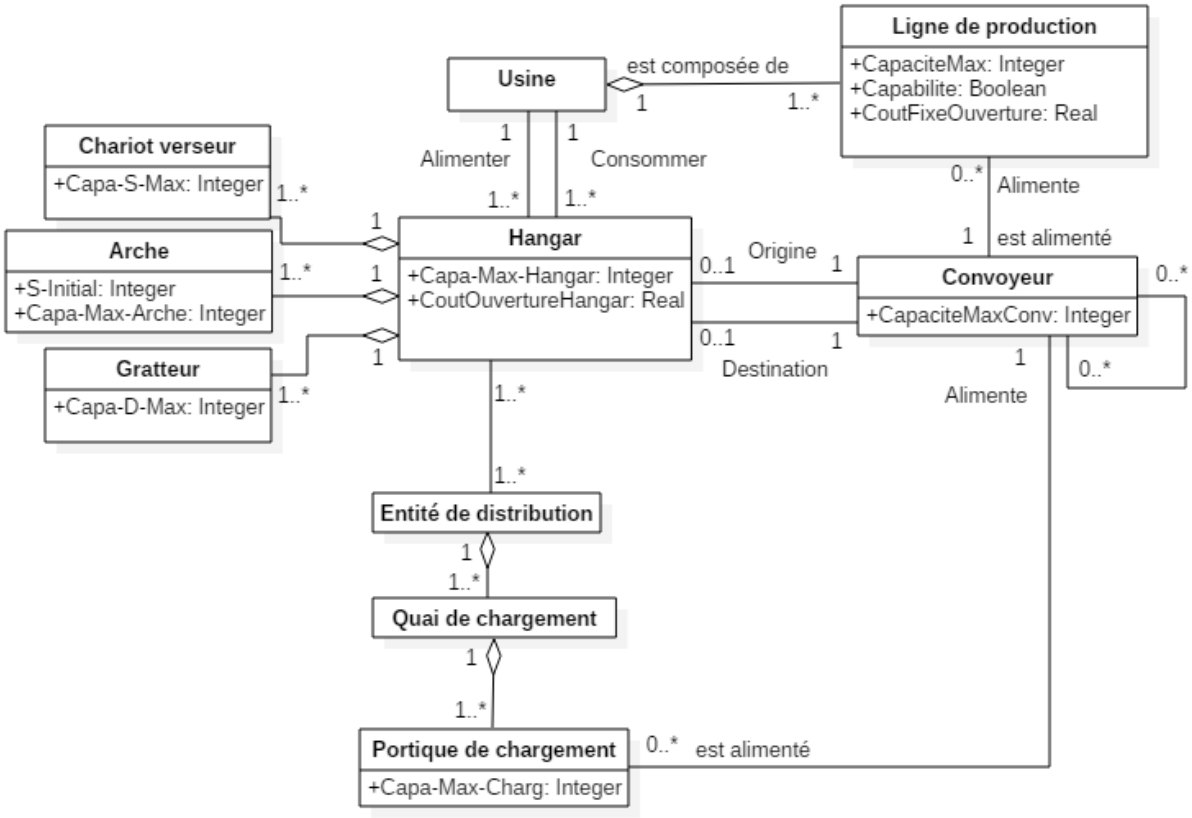


Figure 3. 12- Modélisation UML du sous-système physique : diagramme de classes

Par la suite nous présenterons ces composants du sous-système physique et les associations existantes entre eux à l'aide des diagrammes de classe UML.

3.2.3.1. Les usines

L'entité de production est constituée de plusieurs usines. Chaque usine est composée d'une ou plusieurs ressources de production (que nous appelons également ligne de production) à capacité limitée. Pour chaque ressource de production, nous définissons :

- une capacité de production (pouvant être exprimée par exemple en quantité produite par unité de temps) : CapaciteMax ;
- une capabilité technique à produire ou non un produit (ou famille de produits) donné(e) : Capabilite ;
- un coût fixe d'ouverture d'une ressource ligne de production, engendré par l'utilisation de la ressource indépendamment du produit fabriqué : CoutFixeOuverture ;

La Figure 3.13 donne le diagramme de classes UML correspondant.

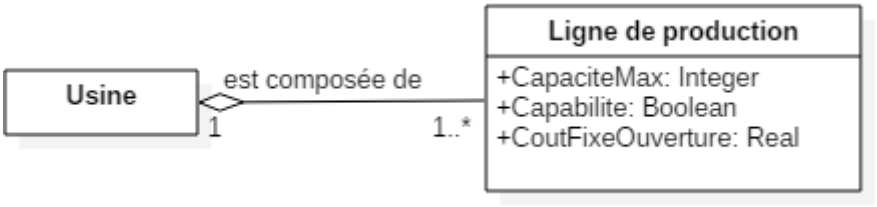


Figure 3. 13- Modélisation UML des usines et des lignes de production associées

3.2.3.2. Les hangars de stockage

Nous appelons hangar de stockage, un stock physique, qui peut contenir plusieurs familles de produits et plusieurs variétés (produits) d'une famille donnée de produits. Pour éviter le risque de contamination des produits, étant donné que les produits n'ont pas la même nature, chaque hangar de stockage s'organise sous forme de séparations physiques banalisées dites « arches de stockage ». Chaque hangar est doté d'une capacité limitée (Capa-Max-Hangar) et est équipé d'un chariot verseur pour la mise en stock et d'un gratteur pour assurer l'extraction et le déstockage.

Pour chaque arche de stockage nous avons :

- un stock initial: S-Initial;
- une capacité maximale de stockage : Capa-Max-Arche ;

Pour chaque chariot verseur de stockage nous avons:

- une capacité maximale de mise en stock (pouvant être exprimée par exemple, en quantité mise en stock ou transportée par unité de temps) : Capa-S-Max ;

Pour chaque gratteur de déstockage nous avons :

- une capacité maximale de déstockage (pouvant être exprimée par exemple, en quantité déstockée par unité de temps) : Capa-D-Max ;

Nous retrouvons aussi les coûts associés à l'utilisation du stock :

- un coût d'ouverture d'un hangar de stockage : CoutOuvertureHangar ;

La Figure 3.14 donne le diagramme de classes de la modélisation UML des ressources de stockage.

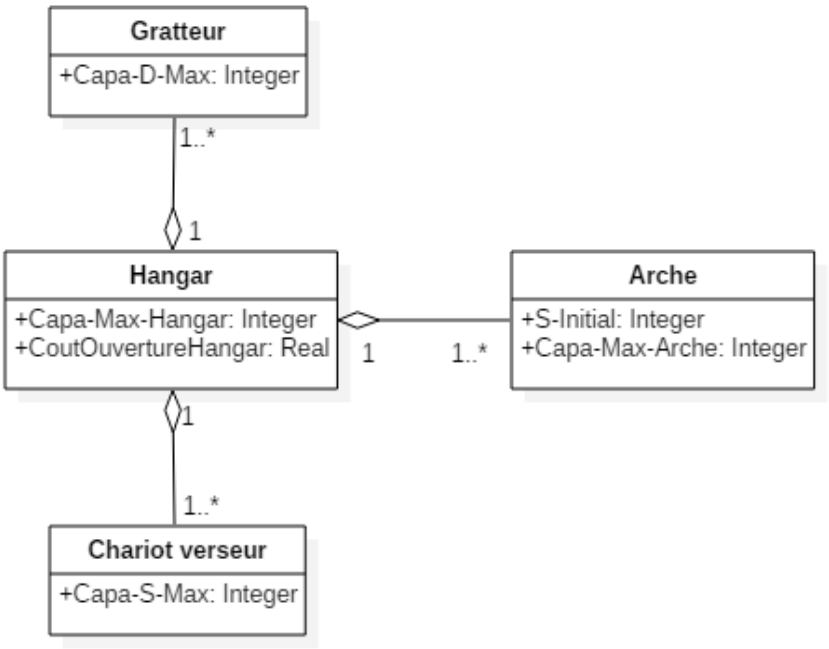


Figure 3. 14- Modélisation UML des hangars de stockage et leurs composants

3.2.3.3. Les convoyeurs

L'entité de transport est constituée d'un ensemble de convoyeurs à bandes qui assurent le transport des quantités de produits entre les entités de production et les entités de stockage. Il est caractérisé, comme pour les ressources précédentes, par :

- une capacité maximale de transport (débit de transport, exprimée en quantité transportée par unité de temps): CapaciteMaxConv ;

L'ensemble des convoyeurs à bandes est utilisé dans quatre types d'activtés : *(i)* les activités de transport, qui assurent le transport entre les différentes entités ; *(ii)* les activités de transfert qui assurent le transport inter-hangars (ces transferts se réalisent à cause d'un manque d'espace de stockage) ; *(iii)* les activités de stockage des produits dans les hangras de stockage et *(iv)* les activités de reprise ou de déstockage des produits.

La Figure 3.15 donne le diagramme de classes de la modélisation UML du convoyeur.

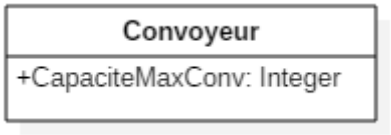


Figure 3. 15- Modélisation UML des convoyeurs

3.2.3.4. Les entités de distribution

Une entité de distribution est représentée dans le sous-système physique par un ensemble de quais de chargement des produits au niveau du port. Une entité de distribution est susceptible de s'approvisionner depuis n'importe quel hangar de stockage et à chaque période, c'est-à-dire suivant le produit demandé par le client final. Chaque entité de distribution est composée d'un ou plusieurs quais de chargement, et chaque quai de chargement est doté d'un ou de plusieurs portiques de chargement.

Pour chaque portique de chargement nous avons :

- une capacité maximale de chargement (pouvant être exprimée, par exemple, en quantité chargée par unité de temps): Capa-Max-Charg ;

La Figure 3.16 donne le diagramme de classes de la modélisation UML des entités de distribution.

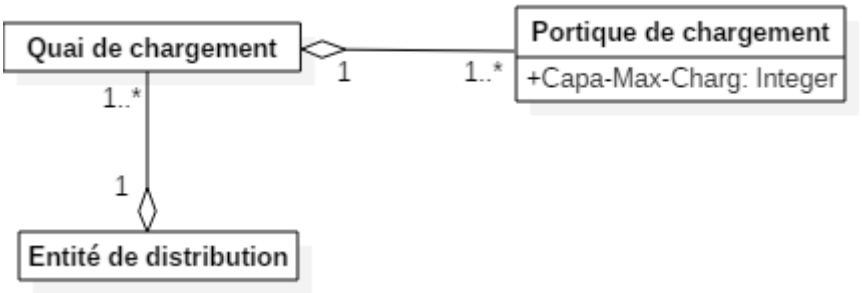


Figure 3. 16- Modélisation UML des entités de distribution

3.2.3.5. Les associations entre les composants du sous-système physique

Dans cette partie, nous présentons les différentes associations qui existent entre les différents composants du sous-système physique décrits précédemment.

- ***Associations Usine-Hangar de stockage***

Chaque usine est associée à un ou plusieurs hangars de stockage dédiés et à un ou plusieurs hangars d'alimentation de matières premières.

- un stock amont « Hangar A » est le stock de matières premières dont l'usine a besoin pour fabriquer un produit donné ;
- un stock aval « Hangar B » est le stock de produits finis fabriqués par l'usine ;

La Figure 3.17 schématise cette association et donne la modélisation UML de l'association usine et hangars de stockage.

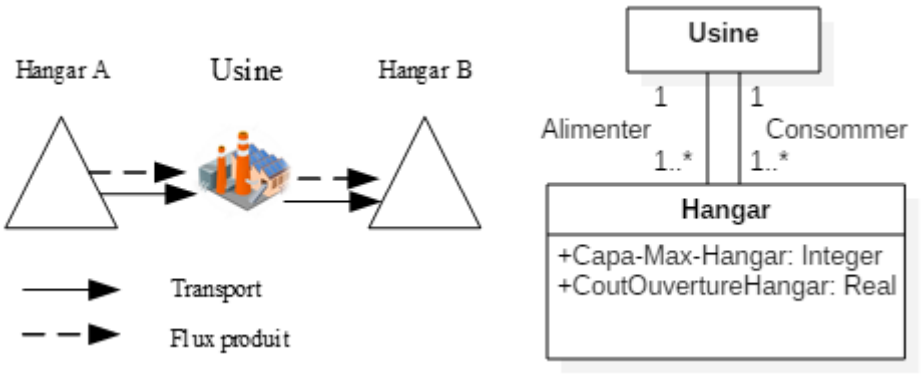


Figure 3. 17- Schématisation et modélisation UML de l'association Usine-Hangar

- ***Associations Hangar de stockage-Convoyeur***

Dans ce type d'association, nous définissons l'association du hangar de stockage et les convoyeurs. Ainsi, chaque hangar de stockage est associé à un seul convoyeur de transport pour le stockage appelé « convoyeur de stockage » (convoyeur en amont de l'hangar de stockage) et à un seul convoyeur de déstockage appelé « convoyeur de reprise » (convoyeur en aval de l'hangar de stockage).

La Figure 3.18 expose la modélisation UML de l'association hangar de stockage et convoyeur.

Figure 3. 18- Modélisation UML de l'association Hangar-Convoyeur

- ***Associations Hangar de stockage-Entité de distribution***

Une entité de distribution est susceptible de s'approvisionner d'un produit depuis tout hangar de stockage, et chaque hangar de stockage peut alimenter toute entité de distribution. La demande de chaque produit est exprimée au niveau de chaque entité de distribution à partir d'une commande client.

La Figure 3.19 donne le modèle UML de l'association unissant le hangar de stockage et l'entité de distribution.

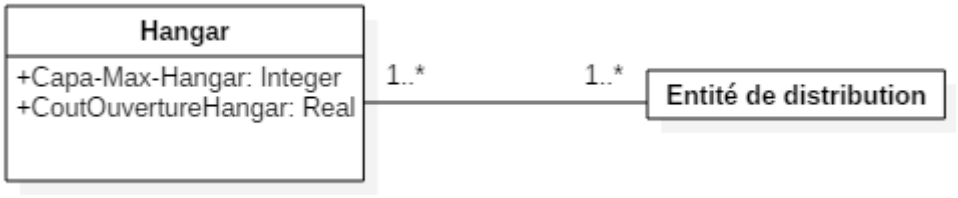


Figure 3. 19- Modélisation UML de l'association Hangar-Entité de distribution

- ***Associations Ligne de production-Convoyeur***

Chaque ligne de production est associée à un seul convoyeur dédié à cette ligne, ainsi chaque convoyeur peut être alimenté par zéro ou plusieurs lignes de production.

La Figure 3.20 donne le modèle UML de l'association unissant la ligne de production et le convoyeur.

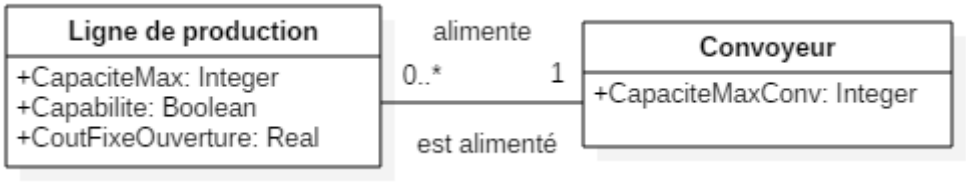


Figure 3. 20- Modélisation UML de l'association Ligne de production-Convoyeur

- ***Associations Convoyeur-Portique de chargement***

Chaque portique de chargement est associé à un seul convoyeur dédié à ce portique, ainsi chaque convoyeur peut alimenter zéro ou plusieurs portiques de chargement.

La Figure 3.21 donne le modèle UML de l'association unissant le portique de chargement et le convoyeur.

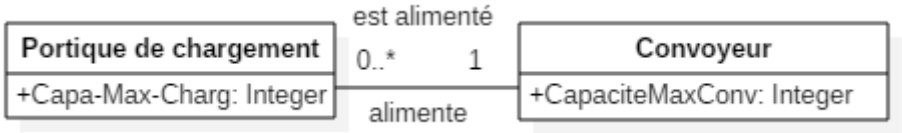


Figure 3. 21- Modélisation UML de l'association Portique de chargement-Convoyeur

3.2.4. Le sous-système logique (SSL)

Le sous-système logique (Figure 3.22) permet de spécifier les éléments de flux physique traversant le système logistique industriel, c'est-à-dire les produits semi-finis, les produits finis et les matières premières. Dans notre cas, nous nous intéressons uniquement au produit fini. Chaque type de produit définit un circuit effectivement parcouru par un flux de matière. Ce circuit peut être déterminé à partir de la gamme logique qui permet de définir les points caractéristiques du circuit parcouru par un flux de matière, à savoir :

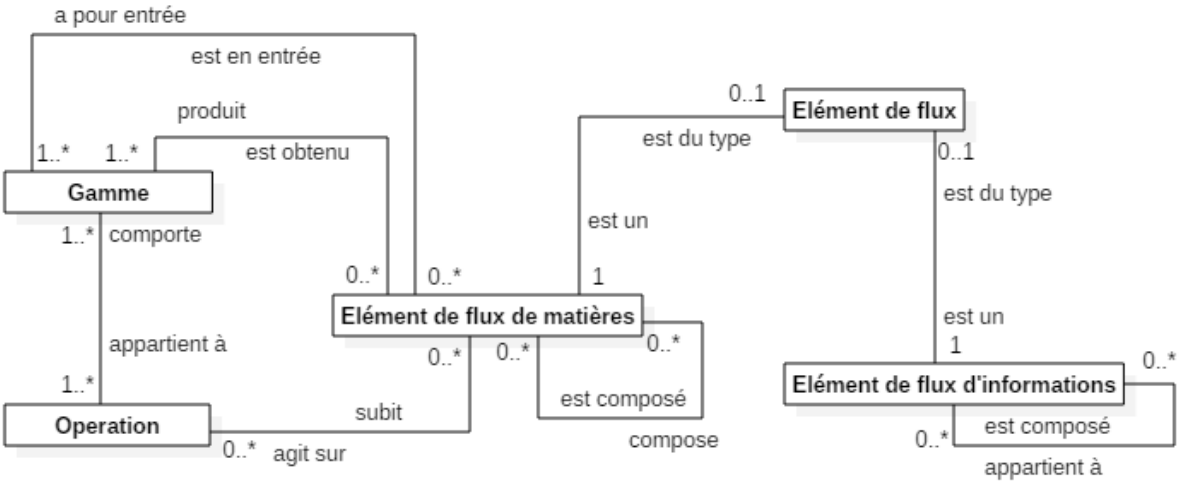


Figure 3. 22- Modélisation UML du sous-système logique

- *Le point de création* du flux de produits, qui représente l'activité de création de chaque type de produit. Cette activité permet d'identifier le produit et de lui associer son étiquette. Dans notre cas, les points de création, ce sont les lignes de production ;

- *Le point de destruction* du flux de produits, qui représente l'activité finale d'un type de produit. Cette activité fait disparaître l'étiquette d'identification du produit. Dans notre cas, ces points sont les entités de distribution ;

- *Le point de régulation*, qui représente un point de prise en compte de la commande client. Ce point du circuit de flux représente l'endroit de réception des ordres qui déclenchent une activité fonctionnelle. Dans notre cas, ces points sont les entités de distribution où la demande de chaque type de produit est exprimée ;

Dans la modélisation proposée, un élément de flux de matière peut être un produit ou une famille de produits composée d'un ou plusieurs produits, chaque produit est caractérisé par :

- un numéro l'identifiant : Num-Produit ;
- la référence du produit : Ref-Produit ;
- gamme logique : Gamme-Produit ;

Ainsi chaque famille de produits est caractérisée par :

- un numéro l'identifiant : Num-Famille ;
- la référence de la famille de produits : Ref-Famille ;
- gamme logique : Gamme ;

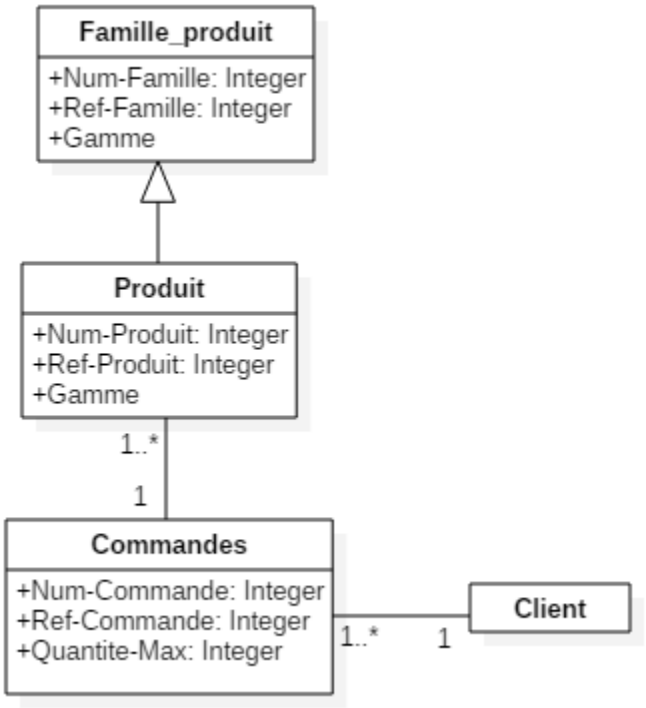


Figure 3. 23- Relation entre l'élément de flux de matière et les commandes

Cet élémént de flux de matière est associé à une ou plusieurs commandes du client final, elle est caractérisée par :

- un numéro l'identifiant : Num-Commande ;
- la référence de la commande (correspond à la référence du produit commandé) : Ref-Commande ;
- la quantité maximale commandée : Quantité-Max ;

Ainsi, la Figure 3.23 donne le modèle UML de la relation entre l'élément de flux de matière et les commandes des clients.

3.2.5. Le sous-système décisionnel (SSD)

Le sous-système décisionnel ou le sous-système de pilotage, concerne la structuration hiérarchique des centres de décision, il contient les règles de gestion et les différentes contraintes du système. Ce sous-système décisionnel agit sur le sous-système logique et sur le sous-système physique. Il permet d'assurer la cohérence globale de la dynamique du système en modifiant l'évolution du sous-système physique, et en déterminant le routage des flux du sous-système logique en fonction de l'état du système et des demandes des clients.

Les règles qui composent le sous-système décisionnel peuvent avoir une structure plus ou moins complexe. Nous avons adopté une démarche de structuration par échelons. Le sous-système décisionnel est structuré hiérarchiquement par échelons. Cette structuration par échelons met en évidence la structure hiérarchique de management d'une entreprise. Ainsi en fonction de la structure hierarchique de chaque maillon opérationnel, le sous-système décisionnel est agencé par strate.

Pour prendre en compte les différents termes qui qualifient les différents échelons, nous proposons le terme générique de "centre de décision". Ainsi, pour un échelon d'un niveau quelconque, l'expert industriel pourra définir le terme approprié en vigueur dans son système. L'organigramme hiérarchique d'un site industriel est donc considéré comme étant un ensemble hiérarchisé d'entités (de production, de stockage, …). Cette structuration hiérarchique permet de fournir une analyse descendante ou ascendante du sous-système décisionnel. Les moyens nécessaires pour le traitement des flux d'informations (ordres et retours de l'information), qui composent le sous-système décisionnel d'un système logistique industriel, peuvent être regroupés en des ensembles d'entités qui réalisent les activités fondamentales nécessaires à la gestion du processus logistique.

Dans ce contexte, le sous-système décisionnel est constitué de centres de décision répartis au sein des différents niveaux hiérarchiques. Le terme générique de "centre de décision" permet à l'expert industriel de se concentrer uniquement sur l'aspect décisionnel de l'unité de gestion et de contrôle, sans s'intéresser à son fonctionnement interne (si c'est un homme qui prend la décision, si elle est prise après une réunion, ou si c'est un ordinateur qui décide). Le sous-système décisionnel se compose de centres de décision, de contraintes et de règles de gestion (Figure 3.24).

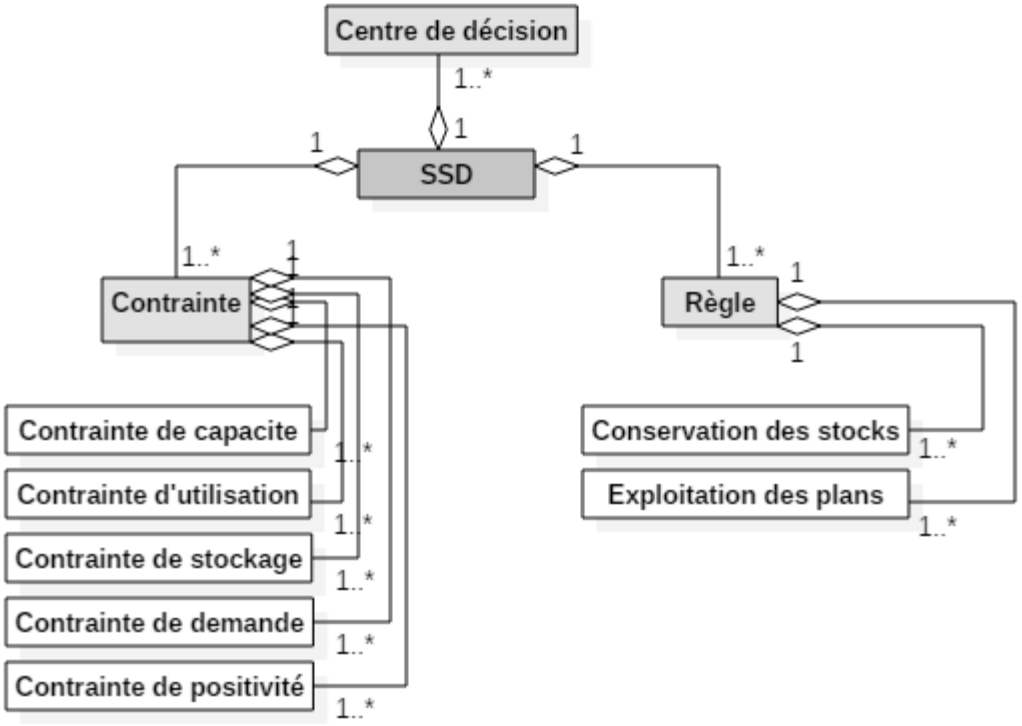


Figure 3. 24- Modélisation UML du sous-système décisionnel

Le diagramme de classe UML de la Figure 3.25 met en évidence les différentes associations à considérer pour construire un modèle de connaissance prenant en compte les interactions existantes entre le sous-système décisionnel et les sous-systèmes logiques et physiques.

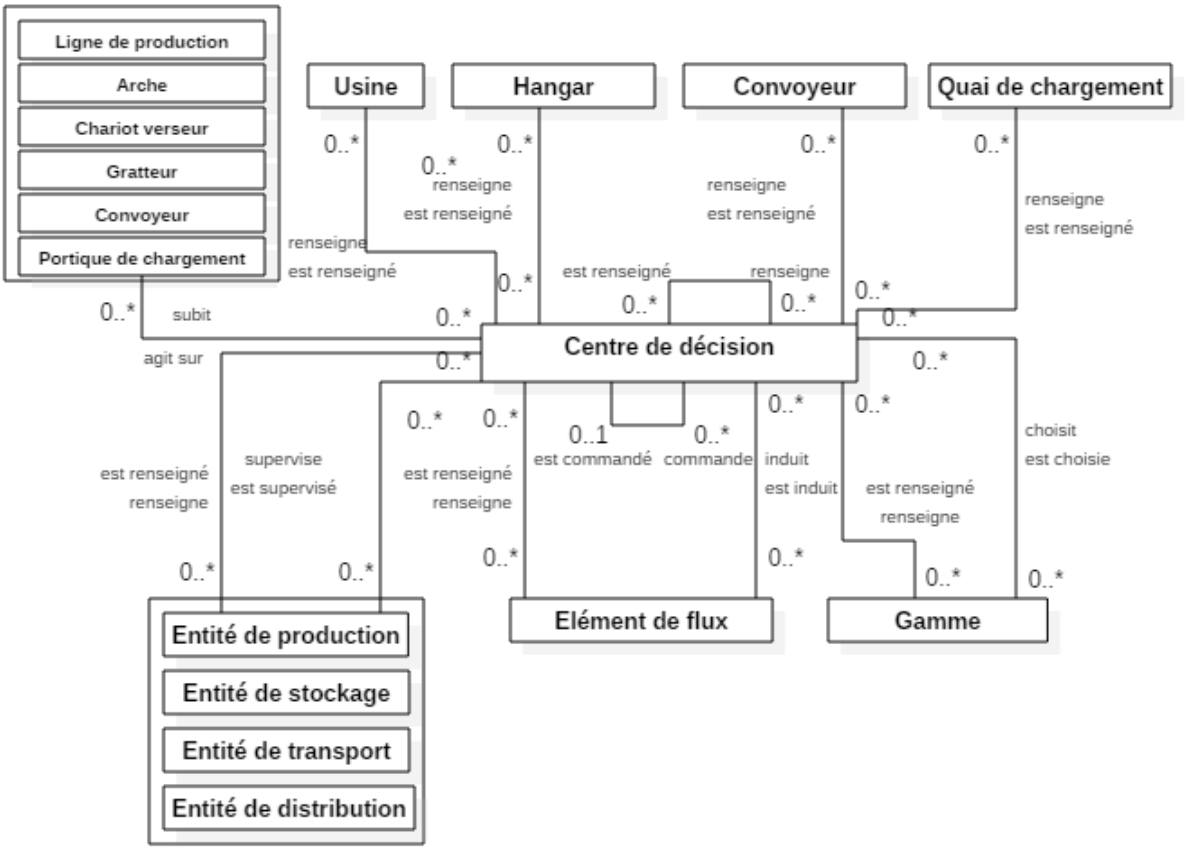


Figure 3. 25- Modélisation UML des interactions du sous-système décisionnel

3.2.5.1. Les centres de décision

Au sommet de la structure hiérarchique du sous-système décisionnel de l'unité de production d'engrais du système logistique industriel, se trouve le centre de décision « CD0 » qui représente la modélisation du processus décisionnel global, qui coordonne les autres centres de décisions et qui résout les conflits entre eux. Ce centre de décision connait l'état du système et prend des décisions stratégiques, ainsi il exerce des arbitrages sans prendre de décisions locales. Il prend les décisions suivantes : le tri des commandes et leur ordre pour satisfaire le client ; le choix du produit à affecter aux usines puis aux lignes de production, puis le choix du hangar de déstockage, et enfin, la définition des règles de priorité dans le même hangar.

Le sous-système décisionnel se constitue en cinq centres de décisions : le CD0, un centre de décision CD1 destiné aux usines de production d'engrais qui décide de l'affectation des produis aux usines puis aux lignes de production, et de l'ordonnancement des commandes sur ces lignes de production ; un centre CD2 pour les hangars de stockage, qui régit l'affectation des lots fabriqués aux hangars et aux arches de stockage constituants le hangar ; un centre CD3

pour les convoyeurs de transport et de transfert, qui a comme mission de choisir le convoyeur de transfert ou de transport pour transporter les lots d'un hangar vers un autre hangar, ou vers les entités de distribution ; et finalement un centre CD4 pour les points de distribution, qui permet d'affecter l'entité de distribution pour livrer les commandes clients.

La Figure 3.26 représente un schéma global de ces centres de décision.

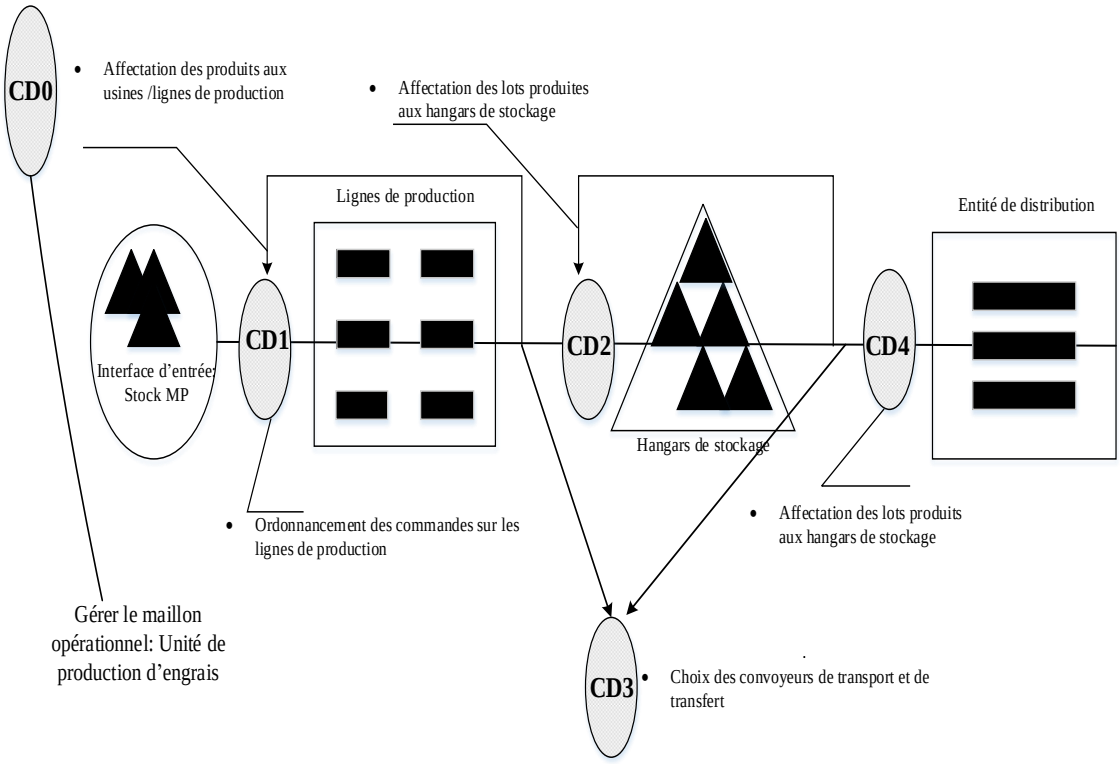


Figure 3. 26- Les centres de décision

3.2.5.2. Les contraintes du système logistique industriel

Les principales contraintes repérées dans le système industriel logistique étudié sont :

- des contraintes de capacité (exemple : le stock est limité à une certaine quantité du produit fini) ;
- des contraintes de stockage (exemple : le stockage des produits finis doit éviter le risque de contamination des produits) ;
- des contraintes d'utilisation (exemple : utilisation des ressources de production) ;
- des contraintes de positivité (exemple : le stock des produits finis doit être positif) ;
- des contraintes de demande ;

La figure 3.27 illustre les contraintes liées à la production, le stockage et la distribution dans leur globalité.

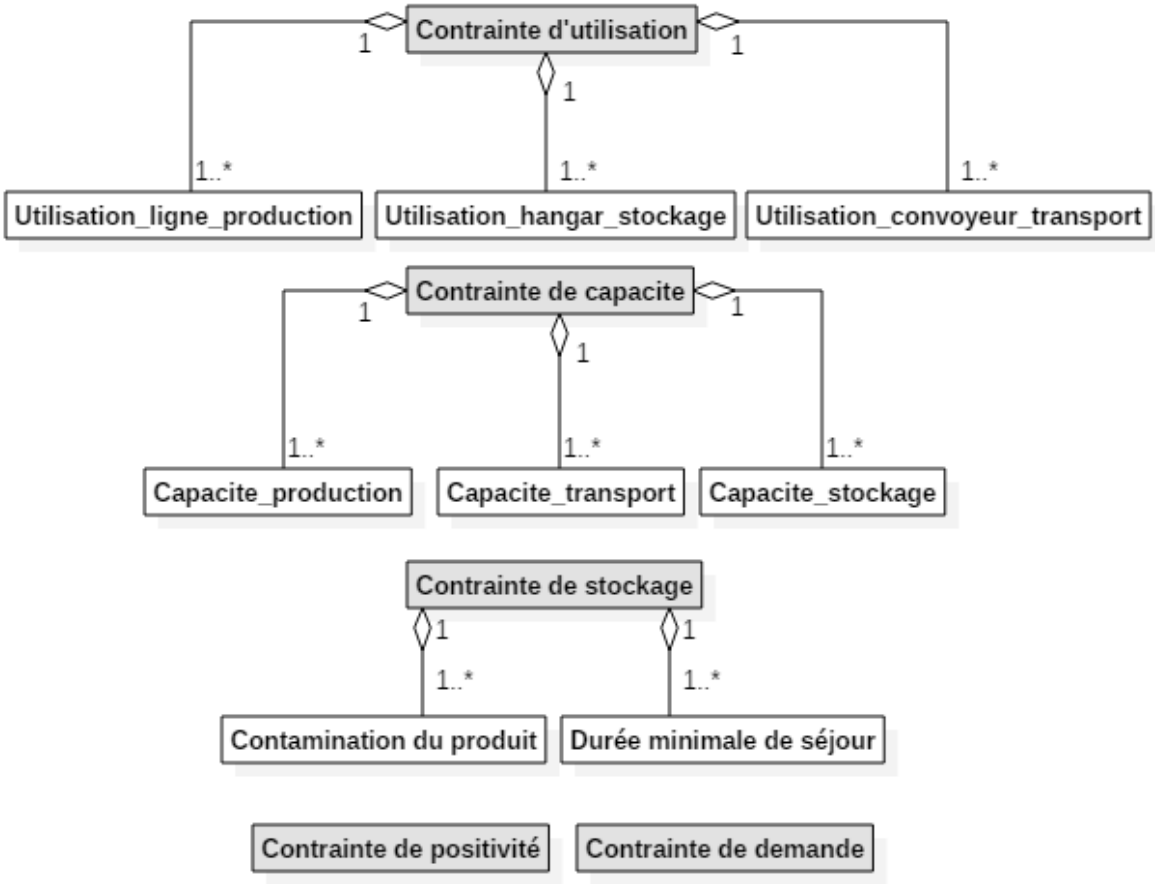


Figure 3. 27- Les contraintes du système logistique industriel

- ***Les contraintes de capacité***

Les contraintes de capacité sont associées à chaque ressource dans le système logistique industriel, ainsi nous retrouvons les contraintes de capacité associées aux ressources de production (à chaque période, la quantité fabriquée par la ressource ne doit pas dépasser sa capacité maximale), de stockage (à chaque période, la quantité stockée ne doit pas dépasser la capacité maximale du stock), et de transport (à chaque période, la quantité transportée ne doit pas dépasser la capacité maximale du convoyeur de transport).

La Figure 3.28 illustre les contraintes de capacité des ressources.

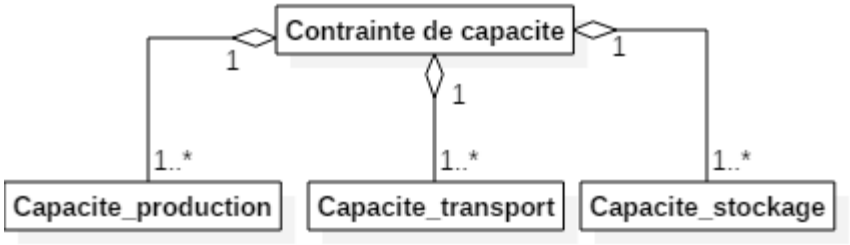


Figure 3. 28- Les contraintes de capacité

- ***Les contraintes de stockage***

Au niveau des hangars de stockage, nous allons retrouver les contraintes liées à la durée minimale de séjour du produit dans le stock (phase de stabilisation du produit), ainsi les contraintes liées à la contamination des produits dans le stock (au regard de la nature physique des produits), deux produits différents ne doivent pas être stockés dans la même arche de stockage.

La Figure 3.29 illustre les contraintes liées au stock du système étudié.

Figure 3. 29- Les contraintes de stockage

- ***Les contraintes d'utilisation***

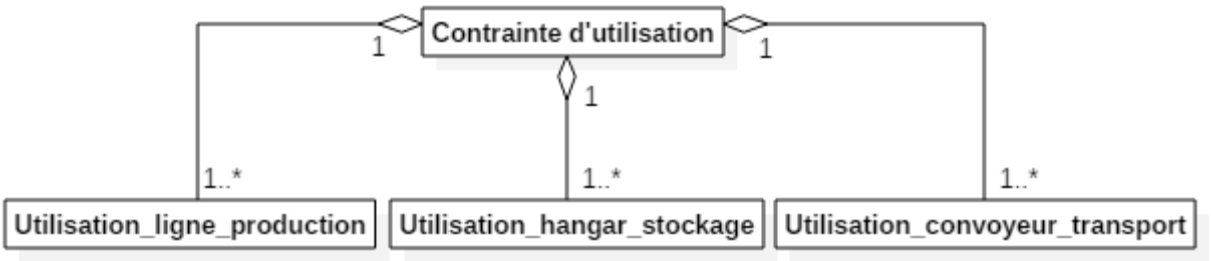


Figure 3. 30- Les contraintes d'utilisation des ressources

Ce type de contraintes permet de savoir si une ressource a été utilisée ou non. Nous trouvons des contraintes d'utilisation des ressources de production (lignes de production), de stockage et de transport. L'expression de ces contraintes se fait par le biais des attributs binaires

qui valent 1 si la ressource est utilisée et valent 0 sinon. La Figure 3.30 illustre les contraintes liées à l'utilisation des ressources du système étudié.

- ***Les contraintes de positivité***

Une contrainte de positivité porte sur le SSP (la quantité produite par les lignes de production et la quantité stockée dans les hangars de stockage doivent être positives), ainsi que sur le SSL (le flux de produit circulant dans le système doit être positif).

- ***Les contraintes de demande***

Les contraintes liées à la demande portent sur les quantités de demande à servir et les quantités perdues pour chacune des entités de distribution. Elles déterminent les niveaux de satisfaction de la demande pour chaque produit, et ce, à chaque entité de distribution. Nous retrouvons alors la quantité de demande servie et perdue pour chaque produit et chaque entité de distribution et à chaque période.

3.2.5.3. Les règles de pilotage et de gestion

L'application des règles de gestion se fait par :

- *Calcul de conservation des stocks*

La règle de conservation de stock permet de définir la quantité présente dans chaque stock pour tout produit fini et à chaque période, et ceci en fonction des quantités produites et mises dans le stock, des quantités prélevées pour la livraison aux clients finaux, ainsi que des demandes à servir pour chaque produit et à chaque période. C'est ce qu'illustre la figure 3.31.

- *Un centre de décision pour générer des plans de production*

Cette règle a pour objectif de générer des plans de production, de stockage et de distribution tout en minimisant ou maximisant une fonction objectif.

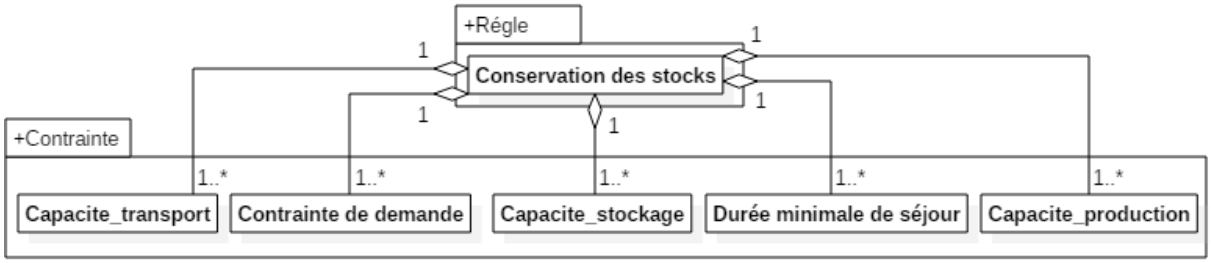


Figure 3. 31- La règle de conservation des stocks

3.2.5.4. Les caractéristiques générales du système logistique industriel

Dans les caractéristiques générales du système logistique industriel, la taille de l'horizon de planification (T) est définie, ainsi que l'activation ou non des différentes contraintes associées au système. Ce qu'illustre la figure 3.32.

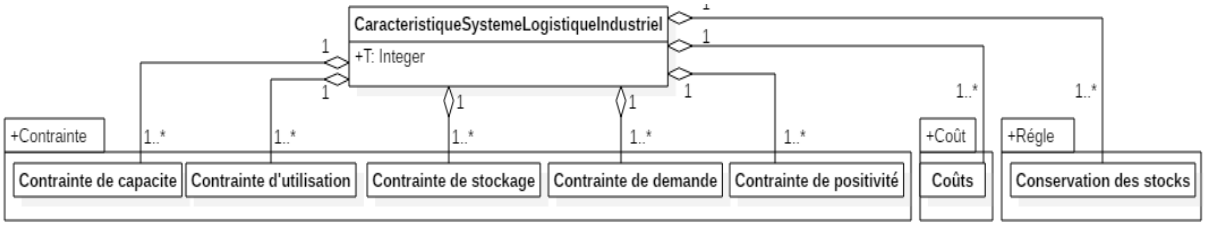


Figure 3. 32- Les caractéristiques du système logistique industriel

3.2.6. Les liens entre les trois sous-systèmes

Dans cette partie, nous allons présenter les différents liens entre les trois sous-systèmes décrits précédemment ; physique, logique et décisionnel, afin de réaliser le modèle systémique représenté dans la Figure 3.39.

3.2.6.1. Les liens entre le sous-système physique et le sous-système logique

Le lien unissant le sous-système physique et le sous-système logique traduit la circulation des flux logistiques de production, de stockage et de transport des produits finis dans les différentes entités.

- ***Association Usine-Produit***

L'objectif d'une planification est de définir les quantités à délivrer des différents produits (ou familles de produits) dans chaque usine de production et à chaque période. Cette

planification peut être obtenue grâce à l'utilisation d'un modèle d'optimisation et/ou d'un modèle de simulation. Dans les deux cas, l'association entre les deux classes Produit et Usine se définit par le coût de production de ce produit dans cette usine. Nous définissons alors une classe association Attribut_Production entre les deux classes Usine et Produit contenant :

- Les coûts de production d'une unité de produit : Cout_production ;

La Figure 3.33 illustre le modèle UML de cette association.

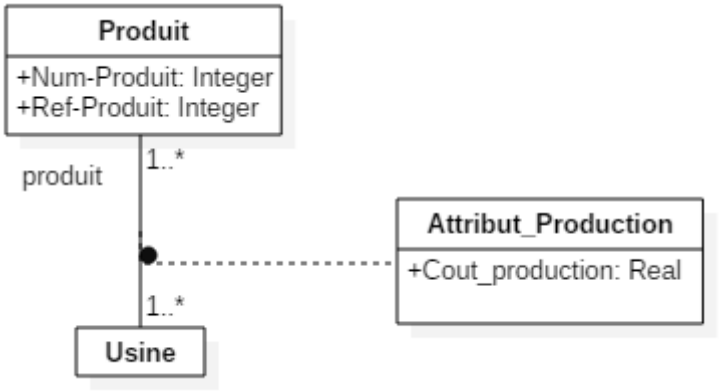


Figure 3. 33- Modélisation UML de l'association Usine-Produit

- ***Association Hangar de stockage-Produit***

Le plan de stockage à déterminer lors de la planification, permet de définir les quantités de produits à stocker dans les hangars de stockage à chaque période. Ainsi, l'association entre les deux classes Hangar et Produit est caractérisé par le coût de stockage des produits dans ces hangars. On indique alors une association (Attribut_Stockage) entre la classe Produit et la classe Hangar (Figure 3.34), on va retrouver dans l'horizon de planification :

- le coût unitaire de stockage pour ce produit : Cout_unitaire_stockage ;
- le coût de changement du hangar de stockage par un produit donné (pour éviter la contamination des produits): Cout_changHangar ;

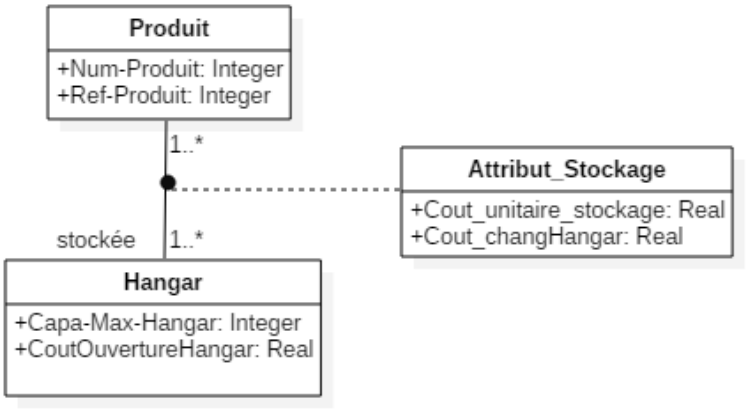


Figure 3. 34- Modélisation UML de l'association Hangar-Produit

- ***Association Entité de distribution-Produit***

A chaque période dans l'horizon de planification, une entité de distribution peut émettre une demande d'un ou plusieurs produits. Il existe donc une association entre ces deux classes. Nous retrouvons la classe Attribut_Demande_Produit, dans laquelle nous définissons à chaque période :

- la demande exprimée par l'entité de distribution : Demande [1..T] ;
- la quantité maximale de la demande perdue pour chaque produit et au niveau de chaque entité de distribution : Demande_Max_Perdue [1..T] ;

La Figure 3.35 donne le modèle UML du lien d'association unissant l'entité de distribution et le Produit.

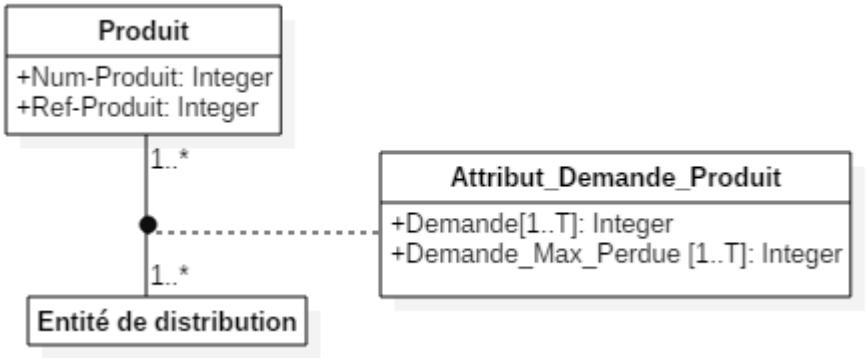


Figure 3. 35- Modélisation UML de l'association Entité de distribution-Produit

- ***Association Arche de stockage-Produit***

Pour éviter le problème de contamination des produits en stock, chaque arche de stockage doit contenir un seul type de produit, en d'autres termes, une arche de stockage est reliée à un produit mais un produit peut être relié à plusieurs arches de stockage. Il existe alors une relation entre la classe Produit et la classe Arche de stockage (Figure 3.36).

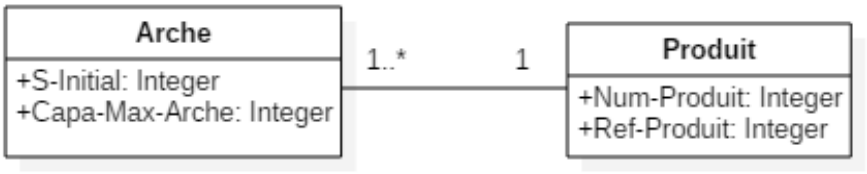


Figure 3. 36- Modélisation UML de l'association Arche-Produit

- ***Association Ligne de production-Produit***

A chaque période, chaque ligne de production peut éventuellement entrer dans la fabrication de zéro à plusieurs produits (selon la capabilité de la ligne de production à produire ou non un produit donné). Ceci traduit l'association des deux classes Ligne de production et Produit qui caractérise la classe association Attribut_Ligne_Produit dans laquelle nous trouvons à chaque période:

- la capacité consommée pour produire le produit sur la ligne de production : Capa_Consommée_Production [1..T] ;
- le coût engendré par le changement de la ligne de production en produisant le même produit : Cout_changLigne ;

La Figure 3.37 donne le modèle UML de l'association unissant Ligne de production et Produit.

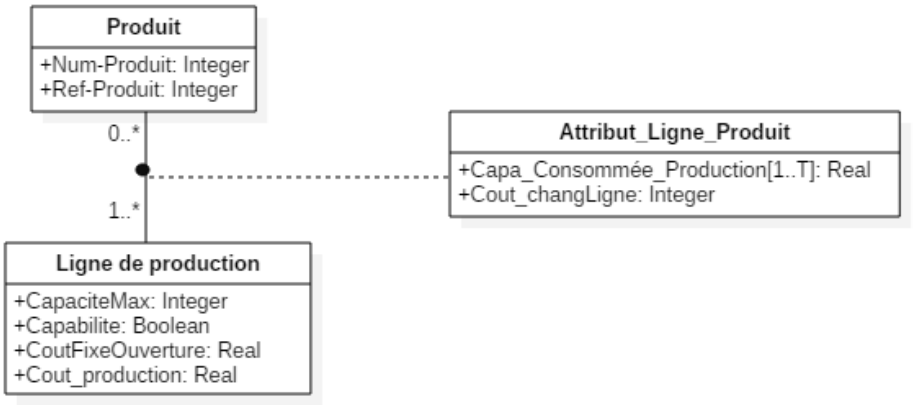


Figure 3. 37- Modélisation UML de l'association Ligne de production-Produit

3.2.6.2. Les liens entre le sous-système physique et le sous-système décisionnel

Le lien entre le sous-système physique et le sous-système décisionnel traduit la définition des différents centres de décision qui agissent sur le sous-système physique, et l'application des différentes contraintes et règles de gestion sur ce sous-système physique. Ainsi, les différentes contraintes de capacité et d'utilisation des ressources seront appliquées aux lignes de production. Les contraintes de stockage et de positivité et la règle de conservation des stocks seront quant à elles appliquées aux arches de stockage des produits, et enfin, les contraintes de demande seront appliquées aux entités de distribution. La Figure 3.38 illustre ces associations :

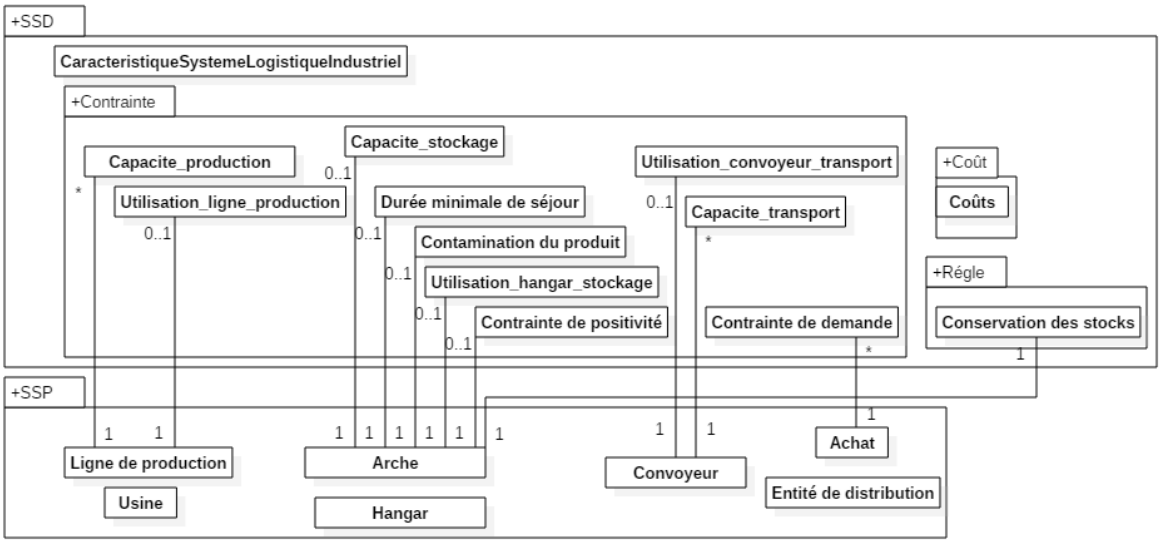


Figure 3. 38- Modélisation UML du lien des sous-systèmes physique et décisionnel

3.2.6.3. Modèle UML global des liens entre les trois sous-systèmes

La Figure 3.39 offre une représentation globale des trois sous-systèmes, ainsi que les différents liens entre eux. Dans cette section, nous avons décrit en détail chaque sous-système et les associations les unissant. Ce modèle désigne donc le modèle de connaissance globale que nous représentons dans la partie suivante sous la forme d'un réseau d'écoulement de flux de notre système logistique industriel étudié.

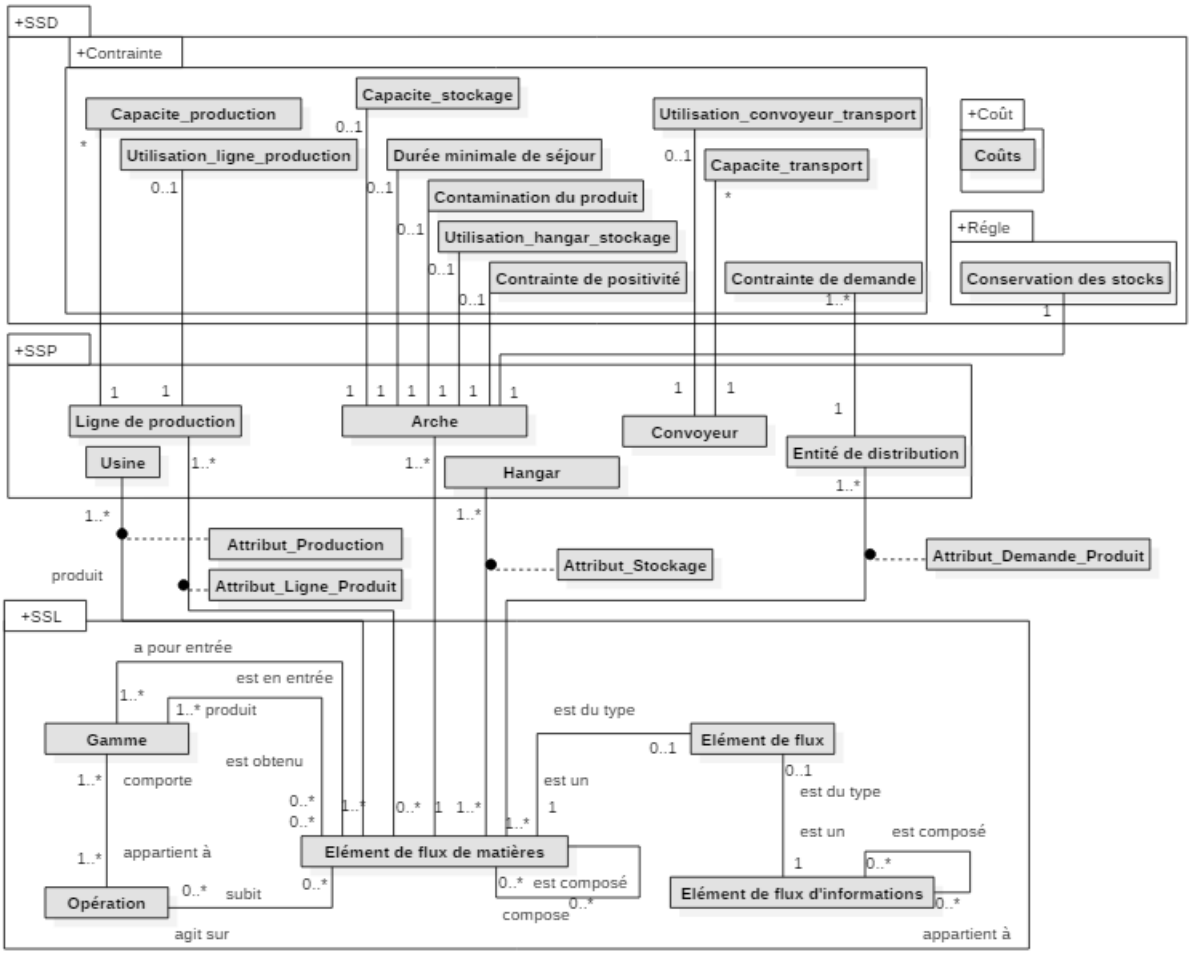


Figure 3. 39- Modélisation UML gloabale des trois sous-systèmes

3.2.6.4. Réseau d'écoulement de flux

Après avoir réalisé une modélisation UML global du système logistique industriel étudié, qui dépeint la modélisation des trois sous-systèmes, et qui définit la structure du système, nous allons représenter, dans cette partie, le modèle de connaissance sous la forme d'un réseau d'écoulement de flux. Celui-ci qui prend en considération les différentes entités du système composant les nœuds du réseau (spécification des objets physiques appartenant au sous-système physique), ainsi que les différents liens entre eux, représentés par les arcs du réseau.

La Figure 3.40 correspond au modèle de connaissance représenté par un réseau d'écoulement de flux. Chaque entité du système est incarnée par un nœud, chacun de ces nœuds (ligne de production, hangar, ….) est caractérisé par un numéro de nœud et par la capacité de la ressource de l'entité associée.

3.2.7. Modèle de graphe Multi-Flot de production et de distribution des produits en vrac

Nous désirons dans cette partie représenter le réseau d'écoulement de flux réalisé dans la partie précédente sous la forme d'un modèle de graphe multi-flot simplifié pour sa dérivation par la suite en un modèle d'optimisation sous la forme d'un modèle mathématique de planification de la production et de la distribution des produits en vrac. Nous soulignons ainsi l'importance de l'identification des règles de contrôle qui permettent la gestion du réseau d'écoulement, ainsi que les contraintes de capacité d'écoulement des flux de matières sur les différents chemins (capacité des arcs dans le graphe multi-flots). Ces contraintes de capacité s'avèrent très importantes lors de l'utilisation des méthodes d'optimisation.

La structure de ce réseau est représentée par un graphe $G=(S, A)$ orienté, qui se compose de deux ensembles finis et disjoints $S= \{S_1, S_2,..., S_n\}$ où $n\geq 1$ et $A= \{A_1, A_2,... A_{n'}\}$ avec $n'\geq 0$, tel que pour i, $1\leq i\leq n'$, A_i est une paire d'éléments de S. S est appelé ensemble de sommets ou nœuds qui peuvent être traversés par les éléments de flux, et A l'ensemble des arcs du réseau, ou liaisons entre nœuds. Dans ce contexte, nous considèrons le système logistique industriel comme un ensemble d'entités (nœuds) inter-reliées (au moyen des liaisons), et dont l'activité consiste à produire (ou à transformer), stocker et distribuer des éléments de flux en vue d'atteindre un ensemble d'objectifs sous un ensemble de contraintes (client satisfait dans les meilleurs délais, et à moindres coûts).

Pour des raisons de lisibilité, la Figure 3.41 donne un exemple d'une représentation du graphe multi-flots qui traduit le réseau d'écoulement de flux d'une manière simplifiée, où ce flot définit la quantité transportée entre deux nœuds successifs (deux entités différentes du système) pour chaque élément de flux et à chaque période de temps. Chaque arc est caractérisé par une capacité maximale qui définit la capacité maximale des différentes entités du système (lignes de production, convoyeurs, hangars de stockage, quais de chargement).

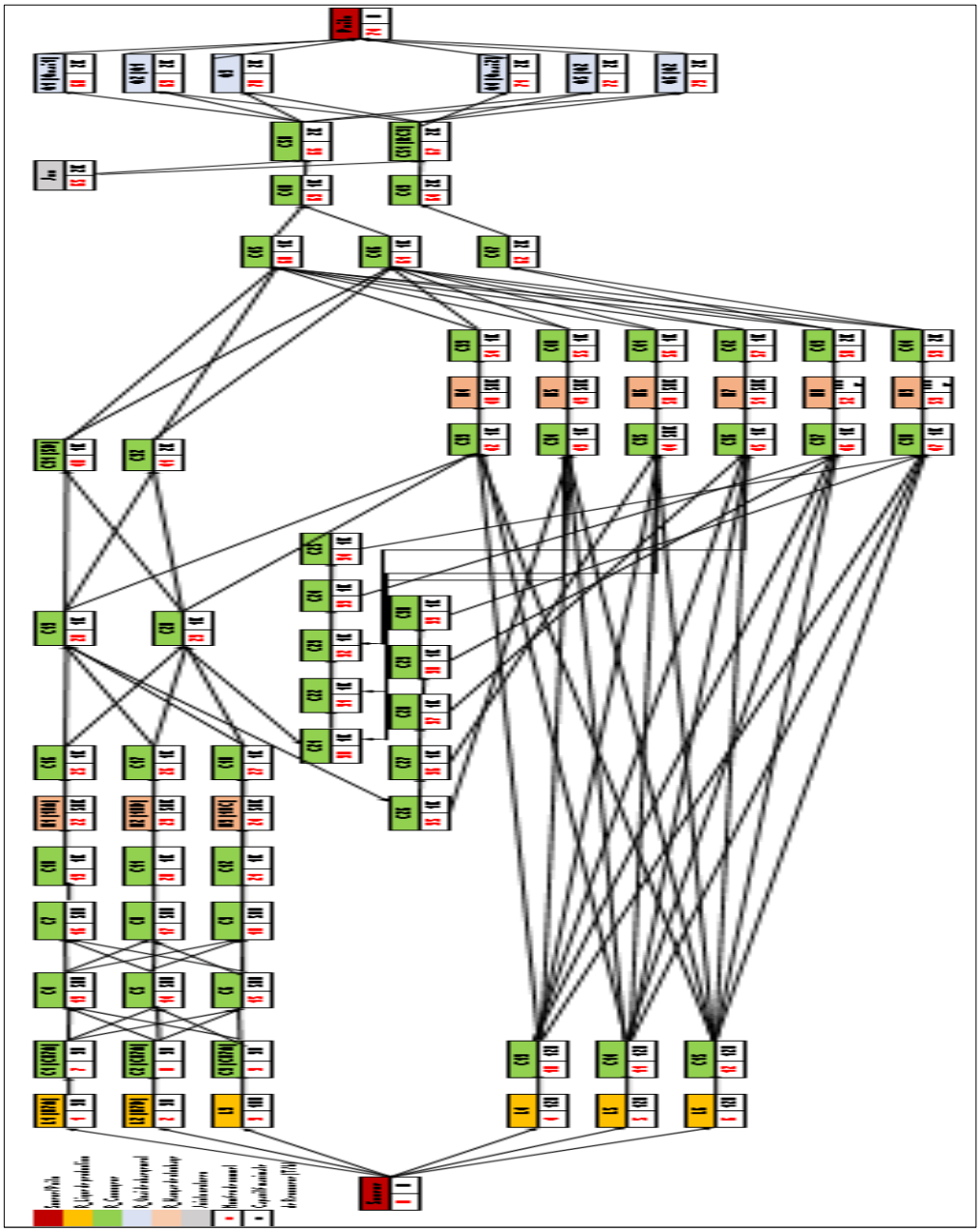


Figure 3. 40- Réseau d'écoulement de flux

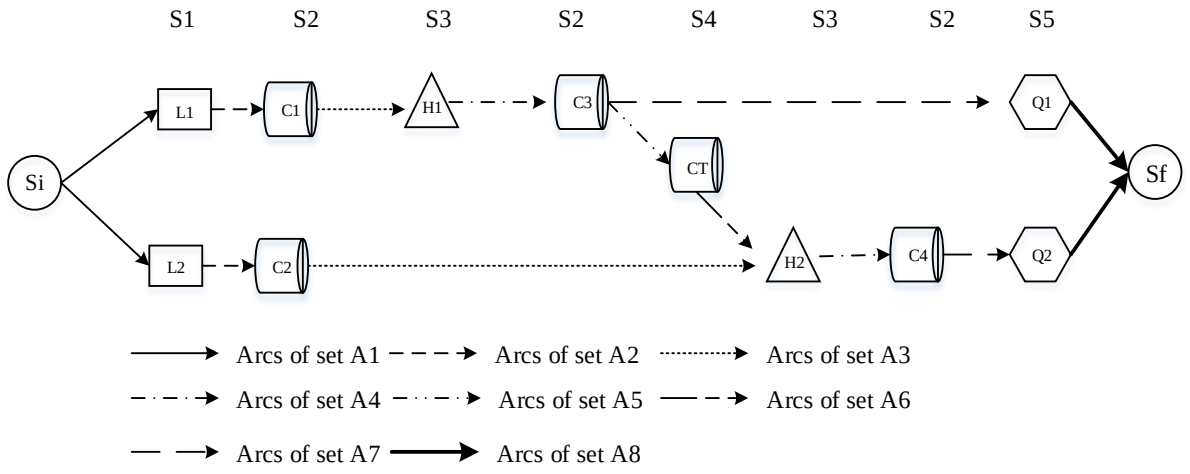


Figure 3. 41- Modèle de graphe multi-flots

Le graphe multi-flots contient sept types de nœuds qui modélisent les éléments suivants : le nœud source S_i, qui est le point source des arcs allant aux sommets représentant les lignes de production S_1, les sommets convoyeurs de transport S_2 caractérisés par un débit maximal, les sommets hangars de stockage S_3 caractérisés par une capacité maximale de stockage, les sommets convoyeurs de transfert S_4 entre les hangars de stockage, les sommets quais de chargement (ou entités de distribution) nommés S_5 qui modélisant les liens entre le système de production et la demande, et finalement le sommet puits S_f. Les deux nœuds source et puits (S_i et S_f) ne sont soumis à aucune contrainte et servent à évaluer le flux dans le graphe.

4. Conclusion

Dans ce chapitre, la démarche de modélisation des systèmes de production industriels a été présentée en détails. Cette démarche de modélisation consiste à concevoir à partir d'un problème réel, une abstraction de ce problème qui sera plus facile à utiliser.

Nous avons proposé dans ce chapitre une méthodologie d'acquisition et de formalisation de la connaissance pour les systèmes industriels de l'industrie process, et plus particulièrement pour MAROC-Phosphore. Cette méthodologie est fondée sur l'analyse du domaine pour la classe des systèmes industriels, et fournit un cadre unificateur, à partir d'un modèle générique de connaissance, pour l'élaboration de modèles de connaissance de ces systèmes dans leur ensemble, ou des maillons opérationnels particuliers. La méthodologie, basée sur un processus de modélisation, a pour objectif d'aider les experts en modélisation et les experts industriels à

modéliser un système complexe tel que le système logistique industriel, afin d'éviter les erreurs typiques qui peuvent être commises lors d'une étude de modélisation :

- Rejet de résultats valables ;
- Acceptation de résultats douteux ;
- Modélisation non complète du problème ;

Pour atteindre les objectifs que nous nous sommes fixés, nous avons élaboré le modèle de connaissance orienté objets de la classe des systèmes étudiés. Dans ce chapitre, nous avons détaillé les phases d'Analyse et de Spécification du domaine en s'appuyant sur la modélisation de MAROC-Phosphore.

Lors de la phase d'Analyse du domaine nous avons utilisé le language de modélisation UML, dont le formalisme rigoureux permet la communication entre experts en modélisation et experts industriels, dans le but de construire un modèle de connaissance. Ce modèle permet de séparer explicitement la phase d'analyse du domaine de celle de sa spécification. Pour établir le modèle générique de connaissance, à partir d'une vision informelle d'un système industriel et de son environnement, nous proposons une décomposition systémique d'un ILS en trois sous-systèmes logique, physique et décisionnel disjoints, complémentaires et communicants deux à deux. Avec cette vision systémique, nous avons construit trois modèles de connaissance complémentaires (un pour chaque sous-système) à l'aide desquels les experts industriels et les experts en modélisation formalisent totalement la connaissance du domaine. A partir de ces trois modèles, le modèle de connaissance global a pu être élaboré.

La phase de spécification sert à compléter et enrichir la vision objet exprimée à travers le modèle UML, afin d'obtenir un modèle de connaissance de la classe de systèmes.

La méthodologie de modélisation présentée permet lors de la traduction/dérivation du modèle de connaissance d'obtenir un ou plusieurs modèles d'action. Le choix du formalisme et de la classe du modèle d'action dépend des objectifs de l'étude fixés par les industriels et les managers du système. En fait, ces modèles d'action sont déduits à partir du même modèle de connaissance, selon le formalisme choisi pour construire le modèle d'action et/ou le degré de finesse implanté dans un modèle d'action : cette pluralité des modèles d'action débouche sur une panoplie d'outils d'aide à la décision généralement complémentaires.

Comme nous l'avons déjà mentionné dans la partie (§1) les systèmes auxquels nous nous intéressons présentent une double complexité. D'une part, elle soulève une complexité dite structurelle et fonctionnelle qui se traduit par la difficulté d'évaluer simplement les critères de performance. Elle met en exergue, d'autre part, une complexité dite "algorithmique", qui désigne la complexité des problèmes d'optimisation combinatoire préalablement soulevés. Pour faire face conjointement à ces deux complexités, nous nous reposons sur la démarche de modélisation présentée précédemment, et sur la démarche d'optimisation qui sera présentée dans les chapitres suivants.

Dans la démarche d'aide à la décision que nous souhaitons mettre en œuvre, nous distinguons deux types de modèles reliés : les modèles d'optimisation et les modèles d'évaluation des performances (des modèles de simulation). Le modèle d'optimisation répond à la complexité algorithmique et permet d'obtenir des solutions optimales en prenant en compte des hypothèses simplificatrices et un ensemble de contraintes donné. Les modèles d'évaluation des performances répondent quant à eux à la complexité structurelle et fonctionnelle. Ils consistent à transformer une solution optimale en solution évaluée, ce qui permet de prendre en compte les différentes données du problème (les hypothèses simplificatrices) séparément du modèle d'optimisation, et qui permet de rajouter de l'information au fur et à mesure, en fonction du niveau de détail souhaité.

En suivant ces deux approches de modélisation et d'optimisation, nous aboutissons à la conception des outils d'aide à la décision pour la planification des systèmes logistiques industriels. La réussite de la démarche de modélisation repose sur la détermination du niveau de détail du modèle d'évaluation des performances et de ses affinements successifs. La prise en compte des deux complexités est plutôt contradictoire : un problème dont la modélisation est trop précise est souvent très difficile à optimiser de manière efficace, et inversement, un problème trop simplement modélisé conduit à des solutions non exploitables.

Dans les chapitres suivants, deux formalismes mis en œuvre pour la résolution des problèmes traités dans cette thèse seront présentés. Le premier formalisme est basé sur une formulation mathématique, et le deuxième sur la simulation à évènements discrets.

.

Chapitre IV : Planification de la production, du stockage et de la distribution des produits en vrac dans un contexte déterministe

Ce chapitre est consacré à la description de trois modèles mathématiques de planification qui permettent de proposer des plans de production, de stockage et de distribution des produits en vrac. Le premier modèle est au niveau stratégique et prend en considération des données agrégées, par la suite, le deuxième modèle au niveau tactique permet de désagréger ces données. Un environnement intégré de planification couvrant ces deux niveaux sera ensuite présenté. Le dernier modèle au niveau opérationnel tient compte des différentes contraintes opérationnelles à une maille plus fine. Des exemples numériques seront présentés après l'exécution de chaque modèle.

Sommaire

1. Introduction 177
2. Mise en œuvre de la méthodologie de modélisation 178
2.1. La problématique 178
2.2. Les objectifs de la modélisation 178
2.3. Dérivation du modèle de connaissance : application au MAROC-Phosphore 179
2.3.1. Hypothèses 180
2.3.2. Le sous-système physique 181
2.3.3. Le sous-système décisionnel 182
3. Modèle mathématique de planification stratégique 183
3.1. Notations 184
3.1.1. Ensembles 184
3.1.2. Paramètres 185
3.1.3. Variables 186
3.2. Contraintes du modèle stratégique 186
3.2.1. Contraintes de satisfaction de la demande. 187
3.2.2. Contraintes de conservation des flux 187
3.2.3. Contraintes de capacité 188
3.2.4. Contraintes de restrictions relatives à la production 188
3.2.5. Contraintes relatives au stockage 189
3.2.6. Contraintes logiques d'utilisation des lignes de production 189
3.2.7. Contraintes logiques d'utilisation des hangars de stockage 189
3.2.8. Contraintes logiques de non changement des lignes de production 190
3.2.9. Contraintes logiques de non changement des hangars de stockage 190
3.2.10. Contraintes d'ouverture des ressources de production et de stockage 190
3.2.11. Contraintes d'intégrité et de non-négativité des variables 191
3.3. Modèle de coût et critères d'optimisation 191

3.3.1. Modèle de coûts 191
3.3.2. Formulation de la fonction objectif 193
3.4. Applications numériques 195
3.4.1. Plan d'expérience 195
3.4.2. Exploitation des résultats : illustration 202
4. Modèle mathématique de planification tactique 213
4.1. Introduction 213
4.2. Processus de planification tactique 214
4.3. Processus intégré de planification 215
4.3.1. Principe de l'environnement intégré de planification 215
4.3.2. Processus intégré de planification : Stratégique / Tactique 216
4.3.2.1. Génération de la demande hebdomadaire 218
4.3.2.2. Affectation des produits finis aux lignes de production 220
4.3.2.3. Affectation des produits finis aux hangars de stockage 221
4.4. Résultats expérimentaux 222
4.4.1. Présentation 222
4.4.2. Analyse de la résolution du MILP 223
4.4.3. Exploitation des résultats 225
5. Modèle mathématique de planification opérationnelle 234
5.1. Introduction 234
5.2. Notations 237
5.2.1. Ensembles 237
5.2.2. Paramètres 237
5.2.3. Variables 238
5.3. Contraintes 238
5.3.1. Contraintes de satisfaction de la demande 239
5.3.2. Contraintes de durée minimale de séjour dans les espaces de stockage 239
5.3.3. Contraintes de configuration initiale des arches de stockage 240
5.3.4. Contraintes de capacité des ressources 241
5.3.5. Contraintes de conservation des flux et des stocks 242
5.3.6. Contraintes de contamination des produits 242
5.3.7. Contraintes de restrictions des ressources de production 243
5.3.8. Contraintes d'intégrité et de non-négativité des variables 243
5.4. Fonction objectif 244
5.5. Applications numériques 244
5.5.1. Présentation 244
5.5.2. Analyse de la résolution du MILP 247
5.5.3. Exploitation des résultats 249
6. Conclusion 252

Liste des figures

Figure 4. 1- Réseau d'écoulement des flux dérivé 182
Figure 4. 2- Graphe multi-flots 184
Figure 4. 3- Comparaison de la demande et de la capacité du système 197
Figure 4. 4- Equilibre charge-capacité du système 197
Figure 4. 5- Distribution de la demande annuelle des familles d'engrais 198
Figure 4. 6- Distribution de la demande annuelle par quai de la famille F1 198
Figure 4. 7- Plan de production et de stock pour la famille 6 sur l'horizon de planification. 204
Figure 4. 8- Profit et CA par scénario 206
Figure 4. 9- Coût total par scénario 206
Figure 4. 10- Coût de production et de stockage par scénario 207
Figure 4. 11- Coût de changement de ligne et d'hangar 207
Figure 4. 12- Ecart entre le scénario SC3 et les autres scénarii : TSD et Profit 209
Figure 4. 13- Satisfaction de la demande par quai dans le cas du scénario SC3 210
Figure 4. 14- Plan de capacité de la ligne 1 211
Figure 4. 15- Plan de production de la famille 1 211
Figure 4. 16- Normes et plan de stock de la famille 1 212
Figure 4. 17- La valeur des stocks des familles de produits pour le SC3 213
Figure 4. 18- Schéma de l'environnement intégré de planification 217
Figure 4. 19- Production trimestrielle de la famille 1 pour le scénario SC3 du PIC 219
Figure 4. 20- Désagrégation de la demande de la famille 1 par produit 219
Figure 4. 21- Désagrégation de la demande trimestrielle à la maille semaine par produit 220
Figure 4. 22- Désagrégation de la demande par quai pour les premières quatre semaines du produit 1 de la famille 1 220
Figure 4. 23- Comportement du solveur lors de la résolution du MILP 224
Figure 4. 24- Taux moyen de satisfaction de la demande par quai de chargement 225
Figure 4. 25- Résultats du scénario SC3 du PIC de l'utilisation de la capacité 226
Figure 4. 26- Résultats du scénario SC3 du PIC : taux moyen d'utilisation de chaque ligne de production sur l'horizon de 3 mois 227
Figure 4. 27- Analyse du besoin en capacité et de la capacité disponible 227
Figure 4. 28- Résulats de la planification 228
Figure 4. 29- Résultats de la planification tactique : taux moyen d'utilisation des lignes de production sur l'horizon de 12 semaines 229
Figure 4. 30- Taux d'utisation de la ligne 2 sur l'horizon de planification 230
Figure 4. 31- Comparaison de la demande et le plan de production du produit 1 231
Figure 4. 32- Plan de production par ligne du produit 1 231
Figure 4. 33- Plan de production de la ligne 1 par quantité de produit 232
Figure 4. 34- Plan de capacité de la ligne 1 par produit 232
Figure 4. 35- Plan de stock au cours de l'horizon de planification 233
Figure 4. 36- Le disponible à promettre pour le produit 1 au quai 1 233
Figure 4. 37- Arches de stockage constituant le hangar de stockage 234
Figure 4. 38- Sources d'un produit déclassé 236
Figure 4. 39- Logique d'affectation des arches de stockage en respectant la durée minimale de stockage 236
Figure 4. 40- Profil de la demande journalière par quai de chargement 245
Figure 4. 41- Quantités demandées des produits finis par famille de produits sur l'ensemble de l'horizon de la planification 246
Figure 4. 42- Comportement du solveur lors de la résolution du MILP 248

Figure 4. 43- Ordonnancement de la production du produit 1 par ligne de production et par période 250
Figure 4. 44- Ordonnancement de la ligne de production 1 sur l'horizon de planification ... 250
Figure 4. 45- Plan de stock du produit 1sur l'horizon de planification 251
Figure 4. 46- Occupation des arches du hangar H1 en période 1 251

Liste des tableaux

Tableau 4. 1- Capabilité des lignes de production 196
Tableau 4. 2- Coefficient de conversion 196
Tableau 4. 3- Capacité des ressources lignes de production et hangars de stockage (en tonnes) 199
Tableau 4. 4- Description des scénarios étudiés 200
Tableau 4. 5- Temps associés à la résolution du modèle linéaire pour les scénarios..... 202
Tableau 4. 6- Temps associés à la résolution du modèle linéaire dans le cas de SC1 203
Tableau 4. 7- Satisfaction de la demande moyenne des scénarios..... 204
Tableau 4. 8- Taux de satisfaction de la demande (TSD) par famille de produits pour SC1. 205
Tableau 4. 9- Résultats de la planification et TSD pour la famille 6 en periode 3 206
Tableau 4. 10- Classement des scénarios par paramètre décisionnel et par ordre décroissant 209
Tableau 4. 11- Nombre de produits par famille de produits 223
Tableau 4. 12- Temps associés à la résolution du modèle linéaire 225
Tableau 4. 13- Configuration initiale des hangars/arches de stockage 247
Tableau 4. 14- Temps associés à la résolution du modèle linéaire 249

1. Introduction

L'état de l'art nous a montré que la planification de la production suivant les trois horizons temporels peut être réalisée à l'aide des techniques de modélisation et d'évaluation des performances (méthodes mathématiques et simulation à événements discrets). Cependant, deux difficultés apparaissent. La première consiste à analyser le système étudié et acquérir la connaissance nécessaire pour en faire un modèle. Tandis que la deuxième difficulté consiste à traduire le modèle obtenu dans un formalisme mathématique ou d'un langage de simulation. En effet, la maîtrise de ces techniques n'est pas évidente malgré la disponibilité de méthodes et des logiciels puissants. [Balci et Nance, 1987] citent le dicton suivant : « personne ne résout le problème, mais tout le monde résout le modèle qu'il a construit du problème ». En d'autres termes, la notion de crédibilité d'un modèle restera toujours subjective, "car la modélisation est un art et dépend de l'expérience de la personne" [Pritsker, 1986]. En outre, la principale caractéristique de la simulation aléatoire est qu'elle autorise plusieurs solutions pour résoudre le même problème.

Pour résoudre ces problèmes lors de la modélisation des ILS, nous avons conçu la méthodologie de modélisation exposée dans le chapitre précédent.

L'objectif de ce chapitre est de mettre en œuvre la méthodologie de modélisation proposée au chapitre précédent, et de présenter de manière concise la démarche d'utilisation des méthodes et outils retenus pour l'élaboration des modèles mathématiques pour la planification des systèmes industriels dans l'industrie de process. La démarche est illustrée à travers l'entreprise MAROC-Phosphore. Dans ce qui suit, nous allons présenter trois modèles mathématiques de planification suivant les trois horizons temporels traités par les problèmes de planification. Nous considérons les problèmes dans lesquels nous cherchons à planifier la production, le stockage et la distribution des produits en vrac, sur un horizon de planification composé de T périodes. Les demandes prévisionnelles pour chaque famille de produits (ou produit) et pour chaque période sont supposées être connues.

Ce chapitre est divisé en quatre parties, la première partie consiste à présenter la mise œuvre de la méthodologie de modélisation pour élaborer des modèles d'optimisation sous la forme de modèles mathématiques pour la planification. Ces modèles sont élaborés au niveau

stratégique dans la deuxième partie, au niveau tactique dans la troisième partie, ainsi qu'au niveau opérationnel dans la dernière partie.

2. Mise en œuvre de la méthodologie de modélisation

L'objectif principal de ce paragraphe est de mettre en œuvre la méthodologie de modélisation présentée dans le chapitre précédent pour élaborer des modèles mathématiques destinés à la planification de la production selon les trois horizons temporels.

2.1. La problématique

Nous avons constaté, dans les chapitres précédents que les industriels recherchent de plus en plus des méthodes et des outils qui leur permettent de planifier efficacement la production et ainsi d'améliorer les critères de performance des ILS.

D'autre part, l'étude du domaine et l'état de l'art ont fait apparaître une multitude de problèmes auxquels les industriels sont confrontés. En effet, il s'agit de réaliser la planification de la capacité du ILS. La capacité du ILS mesure l'aptitude de ce système à traiter les flux de matières, c'est-à-dire qu'elle mesure l'habileté de l'entreprise à satisfaire la demande dans les marchés qu'elle dessert avec ses produits ou à livrer ses clients à temps. Le problème principal pour les industriels est d'utiliser pleinement la capacité et si nécessaire, de l'augmenter pour répondre aux objectifs du long terme - le niveau stratégique. Cette problématique nous permet de définir les objectifs de la modélisation.

2.2. Les objectifs de la modélisation

La maîtrise de la capacité d'un ILS met l'accent sur les décisions à long terme concernant les questions "Combien ?", "Quand ?", "Où ?" et "Comment ?" se font les modifications de capacité durant la planification long terme, ainsi que l'ajustement de la capacité durant la planification moyen et à court terme. Ce type de décisions découle d'une stratégie que l'entreprise élabore en considérant non seulement le capital investi, mais aussi l'impact de l'environnement à travers l'incertitude des prévisions et la réaction de la concurrence. La décision de modification est importante, car une fois établie, la nouvelle capacité demeure en place et s'il y a surcapacité ou sous-capacité, une situation problématique est créée.

Dans ce contexte de réflexion, la mise en œuvre de la méthodologie de modélisation et l'élaboration des modèles mathématiques pour la planification doivent satisfaire des objectifs concernant :

- *la détermination de la capacité* - il s'agit de répondre à la question « Avec la configuration choisie, sommes-nous capables de satisfaire les demandes du marché en produisant en petites séries différents groupes de produits? ». Il s'agit des décisions à long terme ou de la planification stratégique ;
- *la planification de la capacité* ou la planification de la capacité disponible pour satisfaire les demandes en cours de production et ceux sur prévisions commerciales - il s'agit de répondre à des questions de types « Peut-on lancer un ordre de production sans retarder ceux qui sont en cours de production? », si non « Comment et où augmenter la capacité (la durée opératoire) pour un ordre prioritaire sans perturber le fonctionnement en mode nominal? ». Ceci concerne les décisions à moyen terme ou la planification tactique ;
- *l'ordonnancement de la capacité* ou l'ordonnancement de l'approvisionnement, de la production et de la maintenance des moyens. Il s'agit des décisions à court terme.

De plus, la mise en œuvre de la modélisation doit permettre aux experts d'analyser et de résoudre cette classe de problèmes quel que soit l'horizon temporel considéré (niveau stratégique, tactique ou opérationnel). Dans ce contexte, le choix de méthodes et d'outils de modélisation s'avère être d'une importance primordiale. Le choix qui a été fait porte sur la modélisation sous forme de graphe et la résolution des problèmes de flots.

2.3. Dérivation du modèle de connaissance : application au MAROC-Phosphore

Dans cette partie, la méthodologie de modélisation en vue d'élaborer des modèles d'optimisation est illustrée en utilisant le système industriel de Maroc-Phosphore. Ainsi, à partir du modèle de connaissance complet, présenté dans le chapitre 3, on obtient un modèle de connaissance dérivé. Seules les informations pertinentes pour l'élaboration d'un modèle d'optimisation sont retenues. La présentation détaillée de la démarche pour la planification stratégique est présentée par la suite. L'analyse du système, l'identification et la spécification des différents objets appartenant aux trois sous-systèmes nous permettent de construire le modèle de connaissance dérivé.

2.3.1. Hypothèses

Rappelons que nous considérons la chaîne logistique interne d'engrais du groupe OCP SA, produisant pour le marché national et international six familles d'engrais avec deux usines de production d'engrais composées de lignes de production parallèles et partiellement spécialisées. La première usine est composée de quatre lignes de production et la deuxième de trois lignes de production. L'ensemble les lignes de production de l'usine 1 sont connectées directement à quatre convoyeurs en sortie des lignes, qui renversent les produits dans trois autres convoyeurs à l'aide d'un système d'aiguillage, ce qui crée un problème de croisement de flux, en plus ces quatre lignes ne peuvent pas être toutes en marche en produisant quatre produits différents, ainsi deux scénarios sont possibles ; *(i)* Seulement trois lignes sont en marche, et produisent des produits différents, *(ii)* Les quatre lignes sont en marche, mais au moins deux lignes produisent le même produit. Dans ce qui suit, nous supposons qu'au moins deux lignes produisent le même produit, et que la capacité de la ligne résultante est égale à la somme de leurs capacités, ce qui revient à considérer seulement trois lignes de production au niveau de l'usine 1.

Une fois que le traitement des familles de produits finis est achevé, les produits finis sont acheminés vers un des neuf hangars de stockage de capacités différentes. Ce type de zones de stockage est utilisé pour le stockage des produits de grande diversité comme les semences et les engrais. Chaque hangar de stockage peut comporter plusieurs familles de produits. La mise en stock est assurée par un système de convoyeurs et de chariots verseurs. Le conditionnement des produits en vrac, surtout ceux de nature chimique, nécessite certaines conditions liées à la température ambiante qui doit être maintenue à un certain niveau, et un entretien des espaces de stockages vides par aspiration de la poussière pour éviter le risque de contamination des produits moyennant des équipements de vidange (par exemple : épierreurs, dépoussiéreurs, tamiseurs, séparateurs magnétiques, trémies de vidanges). Le déstockage des familles de produits se fait par l'intermédiaire des gratteurs d'enlèvement et des convoyeurs, chaque hangar étant associé à un gratteur de débit différent. Ensuite, le flux des familles de produits est transporté via des convoyeurs de transport, pour être criblé dans des stations de criblage de capacités différentes. À la sortie des lignes de production, le produit se présente sous la forme de grains dont le diamètre est très variable, c'est ainsi que l'opération de criblage permet d'extraire de l'ensemble du produit la tranche granulométrique adéquate, constituant le produit marchand. Les grosses particules, après concassage broyage, sont recyclées. À la sortie des

stations de criblage, le produit est acheminé vers les quais de chargement équipés de portiques de chargement.

Dans ce chapitre, nous nous focalisons sur la résolution des problèmes de planification en univers certain (i.e. déterministe), en supposant que les décisions de conception des systèmes de production et de dimensionnement des capacités sont déjà prises, et qu'elles ne font pas l'objet de travaux de recherche présentés dans ce manuscrit. De plus, les décisions au niveau stratégique sont à la maille mensuelle et à la maille famille de produits au cours de l'horizon de planification *T*.

Par ailleurs, nous supposons que :

- les usines de fabrication produisent des familles de produits diversifiées.
- chaque usine de fabrication est composée de plusieurs lignes de production parallèles et partiellement spécialisées.
- les lignes de productions appartenant à une usine donnée sont identiques.
- les capacités des lignes de production, des hangars de stockage et des convoyeurs de transport sont déterministes.
- les demandes des clients pour chaque famille de produits et à chaque période sont connues.
- tout l'horizon de planification est divisé en périodes au cours desquelles les demandes et les capacités de production sont bien définies.
- la durée de chaque période est constante et correspond à un mois.
- les hangars de stockage ne sont pas homogènes et peuvent accueillir plusieurs familles de produits.

2.3.2. Le sous-système physique

Rappelons que le sous-système physique d'un système logistique industriel est considéré comme étant un maillon opérationnel composé d'un réseau d'écoulement des flux de matières et d'une ou plusieurs interfaces d'entrée/sortie interconnectant le maillon opérationnel au monde externe (cf. chapitre 3, §2.2.1). Ainsi, le réseau d'écoulement des flux comprend les éléments suivants :

- une entité de production composée de 7 lignes de production ;
- une entité de stockage composée de neuf hangars de stockage ;
- une entité de transport composée de 24 convoyeurs pour le transport des matières ;

- une entité de distribution composée de six quais.

Le réseau d'écoulement dérivé à partir du modèle de connaissance (cf. chapitre 3, Figure 3.40) est schématisé sur la Figure 4. 1. Dans ce réseau d'écoulement apparaissent uniquement les nœuds de routage (les nœuds avec plusieurs sorties). Les nœuds dédiés (les nœuds qui ont une seule sortie) ne sont pas modélisés, compte-tenu du fait qu'ils n'ont aucune valeur ajoutée pour la modélisation mathématique.

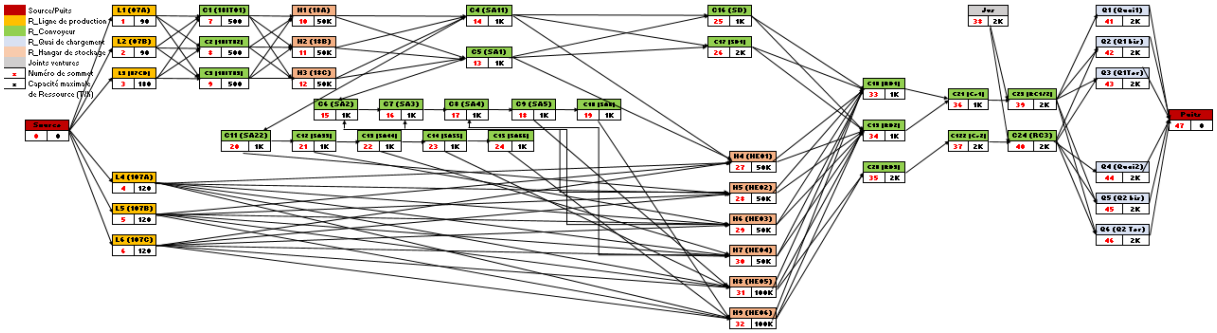


Figure 4. 1- Réseau d'écoulement des flux dérivé

Il s'agit de 33 produits regroupés en six familles de produits qui sont fabriquées dans ce maillon opérationnel (unité ou usine d'engrais). Ainsi, l'élément de flux matière, c'est la famille de produits. Ils suivent la même gamme logique : fabrication, transport, stockage, extraction, transport, et chargement. Les prévisions de la demande pour chaque famille de produits (ou produit), pour chaque période et pour chaque quai de chargement sont connues. Ces prévisions considérées comme flux d'information sont liées aux différentes familles de produits. Toutes les durées opératoires sont connues et déterministes et sont exprimées par familles de produits.

2.3.3. Le sous-système décisionnel

Ici, nous allons retrouver les contraintes liées aux ressources de production, de transport et de stockage, les règles de gestion (l'équilibre des stocks) ainsi que les coûts pris en compte. Il est important de noter que les contraintes de durée minimale de séjour dans les stocks (hangars) ne sont pas considérées (cf. chapitre 3, § 3.2.5) compte-tenu de la maille (le mois) de l'horizon de planification stratégique.

3. Modèle mathématique de planification stratégique

Dans cette partie, nous proposons un modèle mathématique pour la planification stratégique que nous obtenons à partir du modèle de connaissance dérivé. Le but de ce modèle est de planifier la production, la distribution et le transport entre les diverses entités de la chaîne logistique sur un horizon long terme pour satisfaire la demande prévisionnelle.

L'objectif consiste à proposer un planning qui déterminera pour chaque période de l'horizon de planification les quantités à produire sur les différentes lignes de production, les quantités à stocker et celles à distribuer en tenant compte des différentes capacités de production, de stockage et de transport, de manière à maximiser le chiffre d'affaire et à minimiser les coûts logistiques engendrés. En premier lieu, nous introduisons dans ce modèle les données du modèle de connaissance dérivé liées aux demandes prévisionnelles, aux capacités disponibles des différentes ressources et aux différents coûts associés.

Nous considérons F familles de produits finis. Chaque famille f peut être produite dans une ou plusieurs usines (ensembles de lignes de production parallèles et identiques) et chaque usine peut fabriquer un ou plusieurs articles. Chaque article peut être stocké dans n'importe quel stock de la chaîne logistique pour chaque période, ce qui caractérise l'hétérogénéité des stocks. Compte-tenu de ces différents éléments, un certain nombre de notations et contraintes ont été définies. À partir du réseau d'écoulement du modèle de connaissance dérivé, un graphe multi flots est élaboré et illustré par la Figure 4. 1. Les différents ensembles sont définis dans le paragraphe suivant.

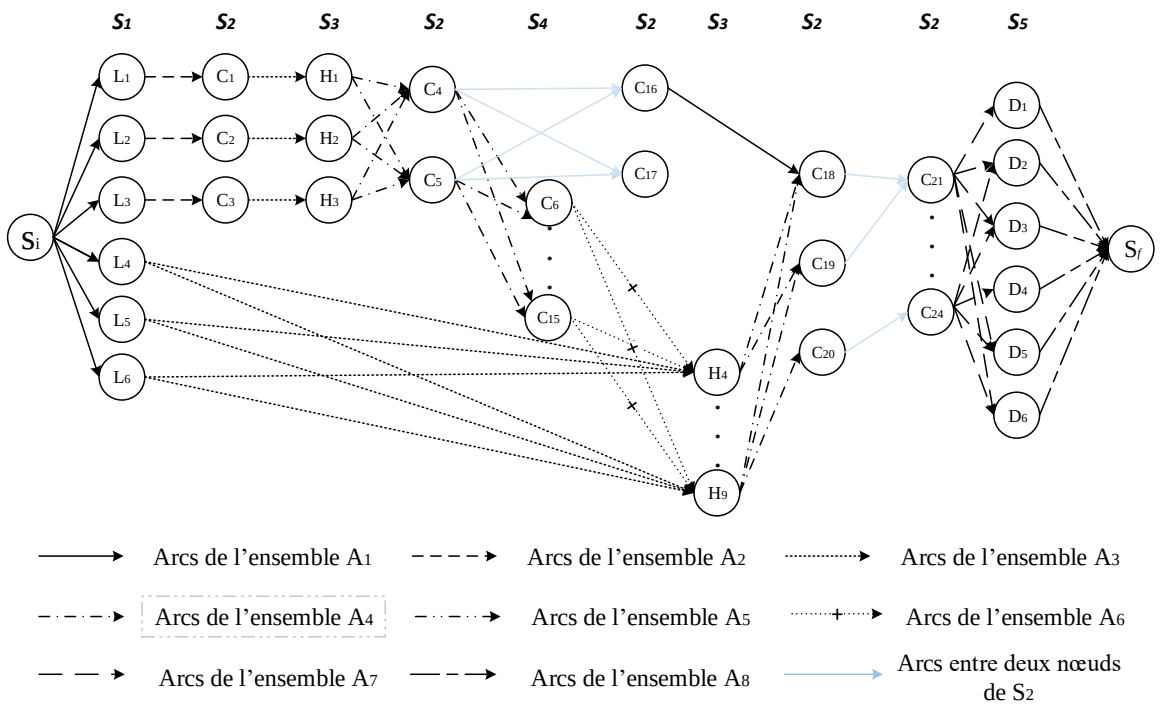


Figure 4. 2- Graphe multi-flots

3.1. Notations

Les notations présentées et utilisées tout au long de ce chapitre sont de différentes natures. Ainsi, nous distinguons les ensembles, les paramètres et les variables comme illustrés au cours des paragraphes suivants.

3.1.1. Ensembles

Les premières notations sont relatives aux ensembles et indices qui facilitent l'introduction et la compréhension des autres notations. Les ensembles du modèle sont introduites comme suit :

<u>Ensembles</u> :

T Ensemble des périodes de l'horizon de planification ;

F Ensemble des familles de produits à planifier ;

S Ensemble des nœuds tels que :

$$S = S_i \cup S_1 \cup S_2 \cup S_3 \cup S_4 \cup S_5 \cup S_f \qquad S_i \cap S_j = \varnothing, \forall i, j \in S$$

S_i Nœud source ;

S_1 Ensemble de nœuds modélisant les lignes de production ;

S_2 Ensemble de nœuds modélisant les convoyeurs de transport ;

S_3 Ensemble de nœuds modélisant les hangars de stockage ;

S_4 Ensemble de nœuds modélisant les convoyeurs de transfert ;

S_5	Ensemble de nœuds modélisant les quais de chargement (points de distribution);
S_f	Nœud puits ;
A	Ensemble des arcs tels que: $A = A_1 \cup A_2 \cup A_3 \cup A_4 \cup A_5 \cup A_6 \cup A_7 \cup A_8 \quad A_i \cap A_j = \varnothing, \forall (i, j) \in A$
A_1	Ensemble d'arcs allant du nœud source S_i à un élément de S_1 ;
A_2	Ensemble d'arcs allant d'un élément de S_1 à un élément de S_2 ;
A_3	Ensemble d'arcs allant d'un élément de S_2 à un élément de S_3 ;
A_4	Ensemble d'arcs allant d'un élément de S_3 à un élément de S_2 ;
A_5	Ensemble d'arcs allant d'un élément de S_2 à un élément de S_4 ;
A_6	Ensemble d'arcs allant d'un élément de S_4 à un élément de S_3 ;
A_7	Ensemble d'arcs allant d'un élément de S_2 à un élément de S_5 ;
A_8	Ensemble d'arcs allant d'un élément de S_5 au puits S_f ;
Indices :	
i / j	Indice de nœud $i, j \in S$;
(i, j)	Indice de l'arc $(i, j) \in A$;
t	Indice de la période $t \in T$;
q	Indice du quai de chargement (point de distribution) $q \in S_5$;
f	Indice de la famille de produits $f \in F$;

En plus de ces notations, ont également été définis un certain nombre de paramètres représentant des données d'entrée du problème considéré.

3.1.2. Paramètres

Les paramètres sont constitués d'éléments relatifs au système de production ainsi que de la demande ou encore ceux permettant de représenter la configuration initiale. Ainsi, nous définissons :

$CL_{f,j}$	Paramètre valant 1 si la ligne de production $j \in S_1$ a la capabilité technique de produire la famille de produits $f \in F$ et 0 sinon ;
$C_{i,j}^{\max}$	Capacité maximale mensuelle (tonnes) pouvant transiter par l'arc $(i, j) \in A$;
$D_{f,q,t}$;	Demande du quai de chargement $q \in S_5$ en famille de produits $f \in F$ à la période $t \in T$
$I_i^{\max}$	Capacité maximale de stockage offerte par le hangar de stockage $i \in S_3$;
$I_{i,f}^{init}$	Stock initial dans le hangar de stockage $i \in S_3$ de la famille de produits $f \in F$;
β_f	Coefficient de conversion associé à la famille de produits $f \in F$;
$Succ_{i,j}$	Paramètre valant 1 si le nœud j est un successeur du nœud i et 0 sinon;
α_f	Nombre de hangars de stockage possible pour stocker la famille de produits $f \in F$;
M	Entier arbitrairement grand ;

Les différents paramètres définis sont utilisés dans les différentes contraintes introduites dans la suite de ce chapitre. Afin d'affecter les valeurs aux différentes variables par l'intermédiaire de ces contraintes ; ces dernières faisant l'objet de la partie suivante.

3.1.3. Variables

Dans cette partie, nous introduisons les variables de décision et nous distinguons ainsi les variables de décisions et celles qui sont binaires.

Variables :	
$\varphi_{i,j,f,t}$	Flot pouvant circuler dans l'arc $(i, j) \in A$ de la famille de produits $f \in F$ à la période $t \in T$;
$I_{i,f,t}$	Quantité stockée dans le hangar $i \in S_3$ de la famille de produits $f \in F$ à la période $t \in T$;
$\omega_{f,q,t}$	Taux de satisfaction de la demande du quai de chargement $q \in S_5$ de la famille de produits $f \in F$ à la période $t \in T$;
Variables binaires :	
$X_{j,f,t}$	Variable binaire valant 1 si la famille $f \in F$ est produite sur la ligne de production $j \in S_1$ à la période, $t \in T$, 0 sinon ;
$Z_{j,f,t}$	Variable binaire valant 1 si la famille $f \in F$ est stockée dans le hangar de stockage $j \in S_3$ à la période, $t \in T$, 0 sinon ;
$Y_{j_1,j_2,f,t}$	Variable binaire valant 1 si la famille $f \in F$ est produite sur la ligne de production $j_1 \in S_1$ à la période $t \in T$ et produite sur la ligne de production $j_2 \in S_1$ pour toute période $t' > t$, 0 sinon ;
$W_{j_1,j_2,f,t}$	Variable binaire valant 1 si la famille $f \in F$ est stockée dans le hangar $j_1 \in S_3$ à la période $t \in T$ et stockée dans le hangar $j_2 \in S_3$ pour toute période $t' > t$, 0 sinon ;
$G_{j,f,t}$	Variable binaire valant 1 si la famille $f \in F$ est dispersée dans le hangar de stockage $j \in S_3$ à la période $t \in T$, 0 sinon. La somme permet de compter le nombre de familles de produits stockées dans un hangar j à la période t ;
U_j	Variable binaire valant 1 si la ligne de production $j \in S_1$ est utilisée au moins sur une période $t \in T$, 0 sinon ;
V_j	Variable binaire valant 1 si le hangar de stockage $j \in S_3$ est utilisé au moins sur une période $t \in T$, 0 sinon ;

3.2. Contraintes du modèle stratégique

Dans cette partie, nous nous intéressons à la manière avec laquelle ont été modélisées les différentes contraintes, à commencer par celles relatives à la satisfaction de la demande

3.2.1. Contraintes de satisfaction de la demande.

La contrainte (4.1) stipule que tout ou partie de la demande doit être satisfaite. Le variable $\omega_{f,q,t}$ représentant le taux de satisfaction. En effet, l'ensemble des flots arrivant au nœud puits correspond à tout ou partie de la demande. Ainsi, sur tout l'horizon *T*, la production totale pour chaque famille de produits ne doit pas excéder la demande totale de cette famille (4.2). La contrainte (4.3) est une contrainte logique qui définit l'existence d'un lien entre la demande et le taux de satisfaction de la demande.

$$\sum_{i \in S | Succ_{i,j}=1} \varphi_{i,j,f,t} = \omega_{f,q,t} \times D_{f,q,t} \qquad \forall j \in S_5,\ f \in F, q \in S_5, t \in T \qquad (4.1)$$

$$\sum_{(i,j) \in A_1, t \in T | Succ_{i,j}=1} \varphi_{i,j,f,t} \leq \sum_{q \in S_5, t \in T} D_{f,q,t} \qquad \forall f \in F \qquad (4.2)$$

$$\omega_{f,q,t} \geq 1 - D_{f,q,t} \qquad \forall f \in F, q \in S_5, t \in T \qquad (4.3)$$

3.2.2. Contraintes de conservation des flux

La contrainte (4.4) définit la conservation des flux au niveau des nœuds de transit (sont exclus les nœuds de stockage). Le flot d'une famille de produits donnée arrivant à un nœud de transit (généralement les convoyeurs et les quais de chargement) est égal au flot sortant de ce nœud. La contrainte (4.5) concerne la conservation des flux au niveau des hangars de stockage (nœuds de stockage). Cette contrainte de conservation des stocks suppose que le niveau de stock d'une famille de produits donnée à la fin de chaque période soit égal à son niveau de stock à la fin de la période précédente augmenté des flots approvisionnés périodiques depuis les lignes de production, et diminué de la consommation périodique des quais de chargement. Finalement la contrainte (4.6) concerne la conservation des stocks sur tout l'horizon de planification, pour chaque hangar de stockage, la somme des flots entrants au stock est égale à la somme des flots sortants.

$$\sum_{i \in S | Succ_{i,j}=1} \varphi_{i,j,f,t} = \sum_{k \in S | Succ_{j,k}=1} \varphi_{j,k,f,t} \qquad \forall j \in S \setminus S_3, \forall f \in F, \forall t \in T,\ j \geq 1,\ j \leq |S| \qquad (4.4)$$

$$I_{j,f,t-1} + \sum_{i \in S | Succ_{i,j}=1} \varphi_{i,j,f,t} = \sum_{k \in S | Succ_{j,k}=1} \varphi_{j,k,f,t} + I_{j,f,t} \qquad \forall j \in S_3, \forall f \in F, \forall t \in T,\ j \geq 1,\ j \leq |S| \qquad (4.5)$$

$$\sum_{i \in S, t \in T | Succ_{i,j}=1} \varphi_{i,j,f,t} = \sum_{k \in S, t \in T | Succ_{j,k}=1} \varphi_{j,k,f,t} \qquad \forall j \in S_3, \forall f \in F,\ j \geq 1,\ j \leq |S| \qquad (4.6)$$

3.2.3. Contraintes de capacité

La contrainte (4.7) concerne la limite des capacités des arcs. Ces limites concernent les capacités des lignes de production à produire les différentes familles de produits. Les flux des familles de produits étant conditionnés en vrac, cette contrainte porte aussi sur la capacité de transport limite des convoyeurs transportant des flux de familles de produits homogènes à une période et sur un chemin donné. La contrainte (4.8) précise la limite de capacité des hangars de stockage : la mise en stock vers ces derniers ne doit pas dépasser leur capacité de stockage offerte pendant une période donnée.

$$\sum_{f \in F} \varphi_{i,j,f,t} \leq C_{i,j}^{\max} \qquad \forall i, j \in S, \forall t \in T, Succ_{i,j} = 1 \qquad (4.7)$$

$$\sum_{f \in F} I_{i,f,t} \leq I_i^{\max} \qquad \forall i \in S_3, \forall t \in T, i \geq 1, i \leq |S| \qquad (4.8)$$

3.2.4. Contraintes de restrictions relatives à la production

La contrainte (4.9) impose le respect de la capabilité des lignes de production à produire ou non une famille de produits donnée. Tandis que la contrainte (4.10) considère la notion de changement de taux de production lié à la diversité des familles de produits fabriqués sur la même ligne de production. Cet aspect a été modélisé par le biais par la variation de la consommation de la capacité de chacune des lignes de production en fonction de la famille de produits fabriqués lors de la période considérée. Chaque famille de produits est associée à un coefficient de conversion qui se multiplie par la capacité réelle de la ligne de production afin de définir le nouveau taux de production associé à la famille de produits considérée. Ainsi, le terme $\sum_{f \in F} \varphi_{i,j,f,t} \times \beta_f$ traduit la quantité de flot en considérant la consommation réelle de la ligne de production en fonction de la famille de produits. Ce changement du taux de production provenant du passage de la production d'une famille de produits donnée à une autre. Bien entendu, à un horizon stratégique, cette variation de la consommation de capacité des lignes demeure pertinente afin de tenir compte de l'impact lié à la diversité des éléments fabriqués.

$$\varphi_{i,j,f,t} \leq CL_{f,j} \times C_{i,j}^{\max} \qquad \forall j \in S_1, f \in F, t \in T, (i,j) \in A_1, Succ_{i,j} = 1 \qquad (4.9)$$

$$\sum_{f \in F} \varphi_{i,j,f,t} \times \beta_f \leq C_{i,j}^{\max} \qquad \forall j \in S_1, t \in T, (i,j) \in A_1, Succ_{i,j} = 1 \qquad (4.10)$$

3.2.5. Contraintes relatives au stockage

La contrainte (4.11) définit le niveau initial des stocks des familles de produits au niveau des hangars de stockage. Les contraintes (4.12) et (4.13) concernent la dispersion des familles des produits dans les hangars de stockage. La contrainte (4.12) limite cette dispersion par un coefficient α_f qui définit le nombre de hangars de stockage mobilisés pour stocker une famille de produits donnée. La contrainte (4.13) assure que si ce hangar de stockage est mobilisé, le flot arrivant à ce dernier ne doit pas dépasser sa capacité offerte de stockage pour une famille de produits donnée.

$$I_{i,f,T_0} = I_{i,f}^{\text{int}} \qquad \forall i \in S_3, \forall f \in F \qquad (4.11)$$

$$\sum_{j \in S_3|, j \geq 1, j \leq |S|} G_{j,f,t} \leq \alpha_f \qquad \forall f \in F, \forall t \in T \qquad (4.12)$$

$$\sum_{i \in S | Succ_{i,j}=1} \varphi_{i,j,f,t} \leq I_i^{\max} \times G_{j,f,t} \qquad \forall j \in S_3,\ f \in F, \forall t \in T,\ j \geq 1,\ j \leq |S| \qquad (4.13)$$

3.2.6. Contraintes logiques d'utilisation des lignes de production

Les contraintes (4.14), (4.15), et (4.16) définissent l'existence d'un lien entre le flot sortant des lignes de production et la variable binaire d'utilisation des lignes de production. Ce lien existe s'il y un flot qui circule dans l'arc $(i, j) \in A_1$ du réseau.

$$X_{j,f,t} \leq \varphi_{i,j,f,t} \qquad \forall j \in S_1, (i,j) \in A_1,\ f \in F, t \in T, Succ_{i,j} = 1 \qquad (4.14)$$

$$M \times X_{j,f,t} \geq \varphi_{i,j,f,t} \qquad \forall j \in S_1, (i,j) \in A_1,\ f \in F, t \in T, Succ_{i,j} = 1 \qquad (4.15)$$

$$\varphi_{i,j,f,t} \leq X_{j,f,t} \times C_{i,j}^{\max} \qquad \forall j \in S_1, (i,j) \in A_1,\ f \in F, t \in T, Succ_{i,j} = 1 \qquad (4.16)$$

3.2.7. Contraintes logiques d'utilisation des hangars de stockage

Les contraintes (4.17) et (4.18) concernent l'utilisation des hangars de stockage, qui se traduit par l'existence d'un lien entre le flot entrant dans un hangar de stockage la variable binaire d'utilisation de ce hangar. Ce lien existe s'il y un flot qui entre au hangar de stockage.

$$M \times Z_{j,f,t} \geq \sum_{i \in S | Succ_{i,j}=1} \varphi_{i,j,f,t} \qquad \forall j \in S_3,\ f \in F, t \in T,\ j \geq 1,\ j \leq |S| \qquad (4.17)$$

$$Z_{j,f,t} \leq \sum_{i \in S | Succ_{i,j}=1} \varphi_{i,j,f,t} \qquad \forall j \in S_3,\ f \in F, t \in T,\ j \geq 1,\ j \leq |S| \qquad (4.18)$$

3.2.8. Contraintes logiques de non changement des lignes de production

Les trois contraintes (4.19), (4.20), et (4.21) introduisent la limitation de la dispersion de la production des familles de produits similaires sur plusieurs lignes de production différentes, et ceci pour chaque période de l'ensemble de l'horizon de planification. Cet aspect correspond à la volonté d'éliminer les pénalités déduites et le temps de changement des familles de produits sur la même ligne de production.

$$\sum_{s\in T|s\geq t+1} X_{j_2,f,s} - M\times(1-X_{j_1,f,t}) \leq Y_{j_1,j_2,f,t}\times M \quad \forall j_1, j_2 \in S_1, f\in F, t\in T, j_1\neq j_2, t\leq T-1 \quad (4.19)$$

$$Y_{j_1,j_2,f,t} \leq X_{j_1,f,t} \quad \forall j_1, j_2 \in S_1, f\in F, t\in T, j_1\neq j_2, t\leq T-1 \quad (4.20)$$

$$Y_{j_1,j_2,f,t} \leq \sum_{s\in T|s\geq t+1} X_{j_2,f,s} \quad \forall j_1, j_2 \in S_1, f\in F, t\in T, j_1\neq j_2, t\leq T-1 \quad (4.21)$$

3.2.9. Contraintes logiques de non changement des hangars de stockage

Les trois contraintes (4.22), (4.23), et (4.24) concernent l'interdiction de la dispersion de la même famille de produits sur plusieurs hangars de stockage. Une famille de produits donnée doit saturer le hangar de stockage sur une période donnée, tout en respectant la capacité offerte de ce hangar. Cet aspect correspond à la volonté d'éliminer les pénalités déduites à la contamination des produits dans le même hangar de stockage.

$$\sum_{s\in T|s\geq t+1} Z_{i_2,f,s} - M\times(1-Z_{i_1,f,t}) \leq M\times A_{i_1,i_2,f,t} \quad \forall i_1, i_2 \in S_3, f\in F, t\in T \quad (4.22)$$
$$\forall i_1\neq i_2, t\leq T-1, i_1, i_2 \geq 1, i_1, i_2 \leq |S|$$

$$A_{i_1,i_2,f,t} \leq Z_{i_1,f,t} \quad \forall i_1, i_2 \in S_3, f\in F, t\in T \quad (4.23)$$
$$\forall i_1\neq i_2, t\leq T-1, i_1, i_2 \geq 1, i_1, i_2 \leq |S|$$

$$A_{i_1,i_2,f,t} \leq \sum_{s\in T|s\geq t+1} Z_{i_2,f,s} \quad \forall i_1, i_2 \in S_3, f\in F, t\in T \quad (4.24)$$
$$\forall i_1\neq i_2, t\leq T-1, i_1, i_2 \geq 1, i_1, i_2 \leq |S|$$

3.2.10. Contraintes d'ouverture des ressources de production et de stockage

Les contraintes (4.25) et (4.26) concernent la décision d'ouverture ou non d'une ligne de production sur tout l'horizon de planification. De même les contraintes (4.27) et (4.28) concernent la décision d'ouverture ou non d'un hangar de stockage sur tout l'horizon de planification.

$$U_j \leq \sum_{f \in F, t \in T} Z_{j,f,t} \qquad \forall j \in S_1, i \in S, (i,j) \in A_1, Succ_{i,j} = 1 \qquad (4.25)$$

$$\sum_{f \in F, t \in T} Z_{j,f,t} \leq M \times U_j \qquad \forall j \in S_1, i \in S, (i,j) \in A_1, Succ_{i,j} = 1 \qquad (4.26)$$

$$\sum_{i \in S, f \in F, t \in T | Succ_{i,j}=1} \varphi_{i,j,f,t} \leq M \times V_j \qquad \forall j \in S_3, j \geq 1, j \leq |S| \qquad (4.27)$$

$$\sum_{i \in S, f \in F, t \in T | Succ_{i,j}=1} \varphi_{i,j,f,t} \geq V_j \qquad \forall j \in S_3, j \geq 1, j \leq |S| \qquad (4.28)$$

3.2.11. Contraintes d'intégrité et de non-négativité des variables

Les contraintes (4.29 - 4.38) définissent le domaine de définition des variables de décision.

$$\varphi_{i,j,f,t} \geq 0 \qquad \forall i, j \in S, (i,j) \in A, f \in F, t \in T \qquad (4.29)$$

$$I_{j,f,t} \geq 0 \qquad \forall j \in S_3, f \in F, t \in T \qquad (4.30)$$

$$\omega_{f,q,t} \in (0..1) \qquad \forall f \in F, q \in S_5, t \in T \qquad (4.31)$$

$$X_{j,f,t} \in \{0,1\} \qquad \forall j \in S_1, f \in F, t \in T \qquad (4.32)$$

$$Z_{j,f,t} \in \{0,1\} \qquad \forall j \in S_3, f \in F, t \in T \qquad (4.33)$$

$$Y_{j_1,j_2,f,t} \in \{0,1\} \qquad \forall j_1, j_2 \in S_1, f \in F, t \in T \qquad (4.34)$$

$$A_{j_1,j_2,f,t} \in \{0,1\} \qquad \forall j_1, j_2 \in S_3, f \in F, t \in T \qquad (4.35)$$

$$G_{j,f,t} \in \{0,1\} \qquad \forall j \in S_3, f \in F, t \in T \qquad (4.36)$$

$$U_j \in \{0,1\} \qquad \forall j \in S_1 \qquad (4.37)$$

$$V_j \in \{0,1\} \qquad \forall j \in S_3 \qquad (4.38)$$

3.3. Modèle de coût et critères d'optimisation

3.3.1. Modèle de coûts

Dans la partie précédente, nous avons évoqué la manière avec laquelle ont été considérées et modélisées les différentes contraintes du problème de la planification stratégique étudié. Ces

différents éléments constituent seulement une part de la modélisation du problème considéré, l'autre part correspond au modèle d'évaluation économique qui comprend les différents coûts et la fonction objectif résultante. Ce modèle d'évaluation économique de la planification de la production comprend les différents coûts relevant de décisions stratégiques ou opérationnelles, deux catégories de coûts : *(i)* les coûts de capacité (4.39 - 4.40) et *(ii)* les coûts de fonctionnement. Les coûts de capacité comprennent les coûts d'ouvertures des ressources de production et de stockage tels que les hangars (4.39) et les lignes de production (4.40). Notons que comme l'horizon de planification du système étudié s'étale sur le long terme, ces coûts sont supposés constants par rapport au temps. Les coûts unitaires (COL_j et COH_j) sont relatifs à l'ouverture des lignes de production et des hangars de stockage au cours de l'horizon de planification.

$$Coût_{Ouverture\_Hangar} = \sum_{j \in S_3} COH_j \times V_j \tag{4.39}$$

$$Coût_{Ouverture\_Ligne} = \sum_{j \in S_1} COL_j \times U_j \tag{4.40}$$

Les coûts opérationnels de fonctionnement ou coûts opérationnels (4.41 - 4.44). Ils correspondent à des coûts récurrents résultant de l'exploitation du réseau d'écoulement de flux. Ces coûts sont relatifs à la production et au stockage des familles de produits (4.41 - 4.42) ainsi que des pénalités (4.43 - 4.44), notamment :

- Le coût total de production des familles de produits sur l'horizon de planification est défini par l'équation (4.41). Le coût unitaire $CP_{f,j}$ varie en fonction de la famille de produits produite *f* et de la ligne de production *j* associée.

$$Coût_{production} = \sum_{j \in S_1, f \in F, t \in T, (i,j) \in A_1 | Succ_{i,j}=1} CP_{f,j} \times \varphi_{i,j,f,t} \tag{4.41}$$

- Le coût total de possession des stocks au niveau des hangars de stockage sur l'horizon de planification est défini par l'équation (4.42). Le coût unitaire $CS_{f,j}$ varie en fonction de la famille de produits *f* à stocker et en fonction du hangar *j* de stockage associé.

$$Coût_{stockage} = \sum_{j \in S_3, f \in F, t \in T} CS_{f,j} \times I_{j,f,t} \tag{4.42}$$

Noton, qu'en réalité, les éléments de coûts introduits dans les coûts opérationnels ne sont pas tous des coûts à proprement parler, certains éléments correspondent davantage à des

pénalités. Les coûts engendrés par les changements des lignes de production et des hangars de stockage au niveau de la production ou du stockage d'une famille de produits donnée et au niveau de chaque période de l'horizon de planification sont relativement difficiles à évaluer précisément. Ces changements sont associés à des pénalités qui traduisent les coûts de perturbation engendrés au sein du système logistique étudié. Nous définissons ainsi :

- Le coût total associé à la pénalité de changement (C_{ChL}) d'une ligne de production de la même famille de produit au cours d'une période de l'horizon de planification. Ainsi, le coût total de changement des lignes de production est donné par l'équation (4.43).

$$Coût_{Changement\_Ligne} = \sum_{j_1 \in S_1, j_2 \in S_1, f \in F, t \in T | j_1 \neq j_2} C_{ChL} \times Y_{j_1, j_2, f, t} \tag{4.43}$$

- De même, l'équation (4.44) définit le coût total associé à la pénalité de changement (C_{ChH}) d'un hangar de stockage de la même famille de produit au cours de la même période de l'horizon de planification.

$$Coût_{Changement\_Hangar} = \sum_{j_1 \in S_3, j_2 \in S_3, f \in F, t \in T | j_1 \neq j_2, t \leq T-1} C_{ChH} \times A_{j_1, j_2, f, t} \tag{4.44}$$

Parmi les différents paramètres introduits peuvent être distingués les coûts unitaires stratégiques. Plus précisément, ceux-ci sont constitués de :

$CP_{f,j}$	Coût variable unitaire (\$/tonnes) de production d'une famille de produits $f \in F$ sur une ligne de production $j \in S_1$;
$CS_{f,j}$	Coût variable unitaire (\$/tonnes) de possession de stock d'une famille de produits $f \in F$ au niveau d'un hangar de stockage $j \in S_3$;
COL_j	Coût d'ouverture d'une ligne de production $j \in S_1$ sur tout l'horizon de planification ;
COH_j	Coût d'ouverture d'un hangar de stockage $j \in S_3$ sur tout l'horizon de planification ;
C_{ChL}	Coût fixe de changement d'une ligne de production sur une période de l'horizon de planification pour une famille de produits donnée ;
C_{ChH}	Coût fixe de changement d'un hangar de stockage sur une période de l'horizon de planification pour une famille de produits donnée ;
PV_f	Prix de vente d'une famille de produits $f \in F$;

3.3.2. Formulation de la fonction objectif

Le réseau d'écoulement de flux précédemment défini devra être économiquement efficient, c'est-à-dire, il devra trouver un flux réalisable qui maximise la valeur de production

totale, tout en générant de faibles coûts d'exploitation. Ainsi, on suppose qu'il existe une limite supérieure pour chaque ressource disponible (ligne de production, convoyeur, …), le flot maximal pouvant circuler entre la source et le puits dans le graphe, ayant été évalué, la seconde étape consiste à trouver la configuration minimisant les coûts associés à l'utilisation des arcs.

Dans la partie précédente, les différents éléments de coûts ont été introduits. Afin de définir la notion du profit, ceux-ci ont été retranchés au chiffre d'affaire issu des ventes, l'objectif étant alors de maximiser la fonction objectif résultante. Celle-ci est définie de manière à trouver la meilleure planification permettant de satisfaire au mieux la demande sans pour autant engendrer des surcoûts trop importants, risquant de mettre à mal la pérennité du système. Pour chaque type de coût nous définissons un coefficient de pondération θ_i, qui prend la valeur $\theta_i = 1$ si le coût est utilisé dans la fonction objectif et la valeur $\theta_i = 0$ sinon. La définition des différents coefficients de pondération utilisés dans la fonction objectif sont :

Valeur de θ_i	Interprétation
θ_1	Coefficient de pondération associé au chiffre d'affaire ;
θ_2	Coefficient de pondération associé au coût d'ouverture d'un hangar de stockage ;
θ_3	Coefficient de pondération associé au coût d'ouverture d'une ligne de production ;
θ_4	Coefficient de pondération associé coût de production ;
θ_5	Coefficient de pondération associé coût de stockage ;
θ_6	Coefficient de pondération associé au coût de changement d'une ligne de production ;
θ_7	Coefficient de pondération associé au coût de changement d'un hangar de stockage ;

La fonction objectif peut ainsi être exprimée par le biais des équations (4.45 - 4.48).

$$MAX : CA - CS - CO \tag{4.45}$$

$$CA = \theta_1 \times \sum_{f \in F, q \in S_5, t \in T} PV_f \times \omega_{f,q,t} \times D_{f,q,t} \tag{4.46}$$

$$CS = \theta_2 \times Coût_{Ouverture\_Hangar} + \theta_3 \times Coût_{Ouverture\_Ligne} \tag{4.47}$$

$$CO = \theta_4 \times Coût_{production} + \theta_5 \times Coût_{stockage} + \theta_6 \times Coût_{Changement\_Ligne} + \theta_7 \times Coût_{Changement\_Hangar} \tag{4.48}$$

Avec :

CA : Chiffre d'affaire ;

CS : Coûts stratégiques ;

CO : Coûts opérationnels.

Dans cette partie nous avons présenté les contraintes et la fonction objectif du modèle de planification stratégique. Ainsi, le modèle prend la forme d'un programme linéaire mixte en nombre entier (MILP). Une fois cette formalisation mathématique élaborée, il convient d'introduire différentes applications numériques de celle-ci. Ces dernières présentées, au sein de la partie suivante, ont pour objectif d'approfondir les différentes explications données jusqu'à maintenant mais également de mettre en évidence son utilisation.

3.4. Applications numériques

Dans cette section, nous présentons les résultats obtenus par la résolution de notre modèle. Nous testons notre modèle sur une instance de taille industrielle en considérant tous les coûts associés à la chaîne logistique interne considérée, et ceci en utilisant le solveur Cplex. Afin d'évaluer la flexibilité du modèle, nous présentons plusieurs scénarios réalistes de prise de décision en variant les valeurs des coefficients de pondération des coûts exprimés dans la fonction objectif.

3.4.1. Plan d'expérience

L'étude de cas de Maroc – Phosphore vise à valider l'applicabilité du modèle mathématique de planification stratégique proposé, dont les résultats d'affectation seront proposés à notre deuxième modèle tactique pour la planification de la production, de stockage et de la distribution des engrais. Cette validation peut être faite en analysant la réponse du modèle face à des situations réalistes.

Plus précisément, nous effectuons une analyse de quelques scénarios réalistes (« *what-if analysis* ») par la prise de la valeur de 0 ou 1 par les différents coefficients de pondération utilisés dans la fonction objectif. L'objectif ainsi de ces différentes applications numériques du MILP est de donner un apport d'explications quant au fonctionnement de celui-ci. Notons que la demande des différentes familles de produits, les capacités ainsi que les coûts sont des données relatives à un contexte industriel réel.

Afin de faciliter l'explication des résultats provenant du modèle linéaire, le cas du système industriel de production, de stockage et de distribution des engrais en vrac de Maroc-Phosphore, qui représente une instance réelle, a été considéré. Notons qu'en respectant la capabilité technique des lignes de production, chaque usine ne peut produire que cinq familles d'engrais, ainsi cette capabilité des lignes de production est donnée dans le Tableau 4. 1.

		F1	F2	F3	F4	F5	F6
U1	L1	1	1	1	1	0	1
	L2	1	1	1	1	0	1
	L3	1	1	1	1	0	1
U2	L4	1	1	1	1	1	0
	L5	1	1	1	1	1	0
	L6	1	1	1	1	1	0

Tableau 4. 1- Capabilité des lignes de production

Notons que la demande des différentes familles de produits est une demande agrégée des demandes réelles des produits finis (qualités d'engrais). La consommation de la capacité des lignes de production varie en fonction de chaque famille d'engrais, et ceci via la définition d'un coefficient de conversion associé à chaque famille d'engrais.

Le Tableau 4. 2 définit le coefficient de conversion de chaque famille d'engrais, la multiplication de ce coefficient par la quantité produite par la ligne de production, définit la consommation de capacité de production associée à la famille d'engrais considérée.

Famille d'engrais	Coefficient de Conversion
1	1
2	1
3	1,25
4	1,1
5	1,2
6	1,55

Tableau 4. 2- Coefficient de conversion

Comme le montrent la Figure 4. 3 et la Figure 4. 4, la charge ne dépasse pas la capacité sur l'ensemble de l'horizon, soit une sous-charge de 0,4%. Cette charge est définie par les prévisions de la demande des différentes familles d'engrais en prenant en compte la consommation de la capacité des lignes de production. Cette demande concerne les différents quais de chargement sur l'ensemble de l'horizon de planification. L'instance du modèle linéaire ainsi définie a été résolue à l'aide du solveur ILOG CPLEX Optimization Studio V12.7.0, sur

un horizon de 12 mois. Les calculs ont été réalisés sous Windows Derver 2016 Standard avec processeur Intel® Xeon® avec 3.20 GHz avec 256Go RAM.

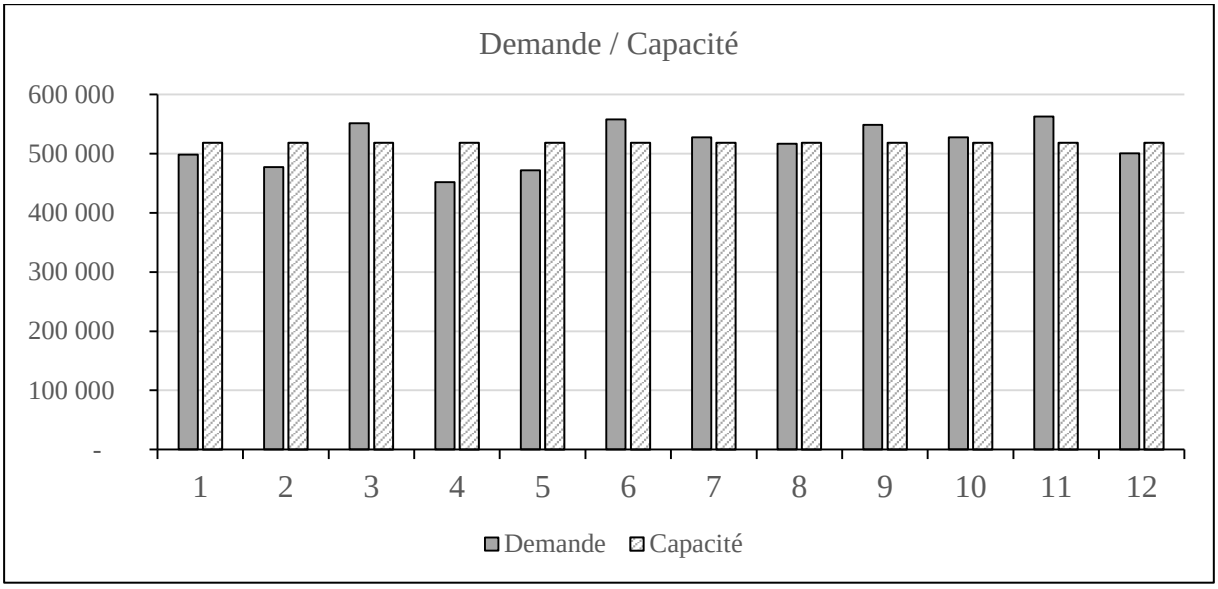


Figure 4. 3- Comparaison de la demande et de la capacité du système

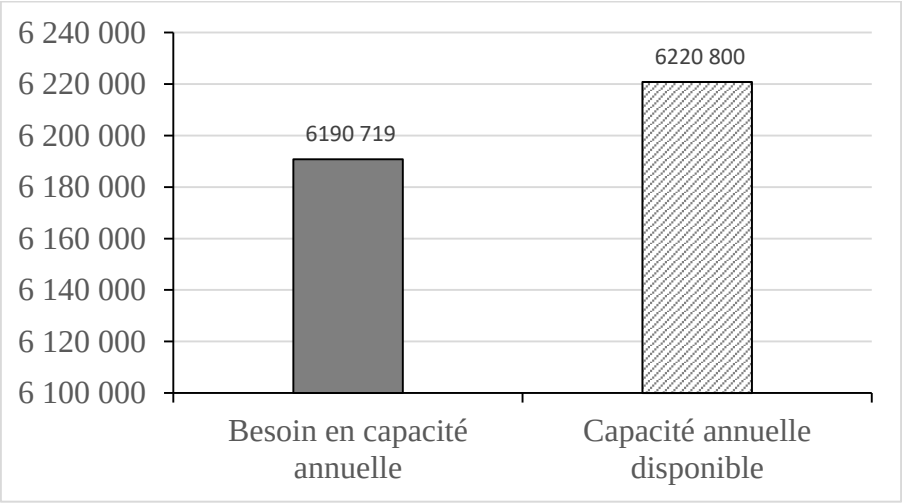


Figure 4. 4- Equilibre charge-capacité du système

La Figure 4. 5 illustre la distribution saisonnière de la demande annuelle agrégée de l'ensemble des six familles d'engrais pour l'ensemble des quais de chargement et ceci à chaque période de l'horizon de planification considéré.

Cette prévision de la demande est définie au niveau de chaque quai de chargement. Nous considérons la demande de chaque famille de produits sur l'ensemble de l'horizon de planification considéré. Notons que cette demande est considérée comme perdue lorsqu'elle ne

peut être satisfaite en temps voulu. Autrement dit, aucun back-order n'est autorisé tandis que des stocks peuvent être constitués afin d'anticiper les productions et lisser la charge. La Figure 4.6 donne un exemple de cette demande annuelle de la famille d'engrais F1 au niveau des six quais de chargement.

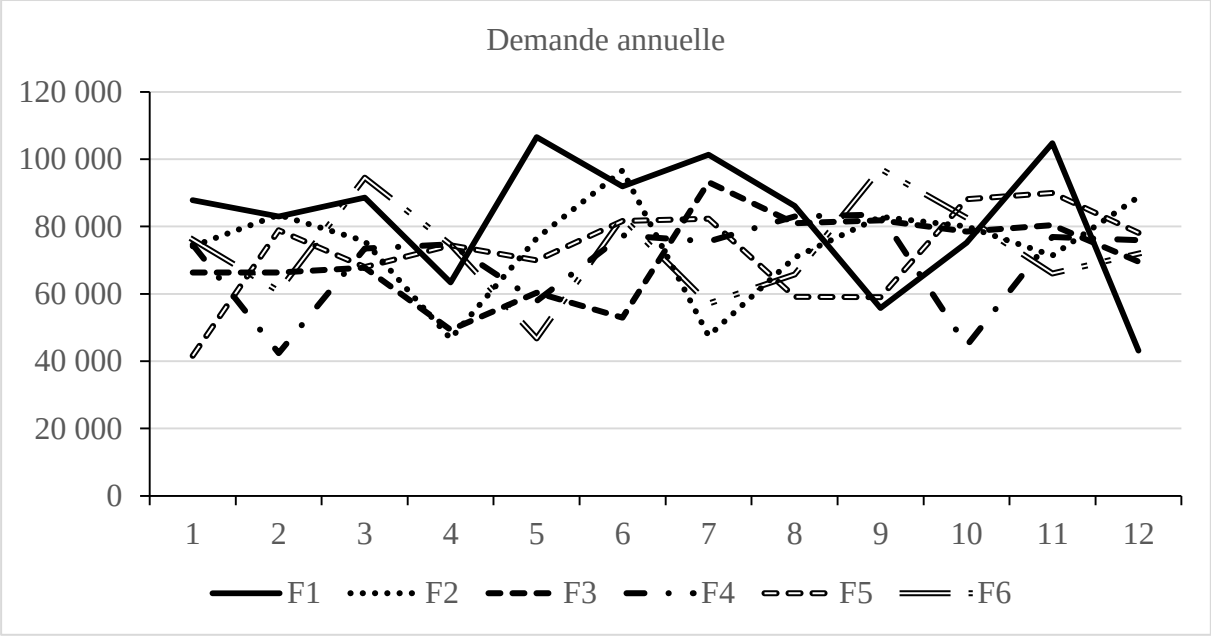


Figure 4. 5- Distribution de la demande annuelle des familles d'engrais

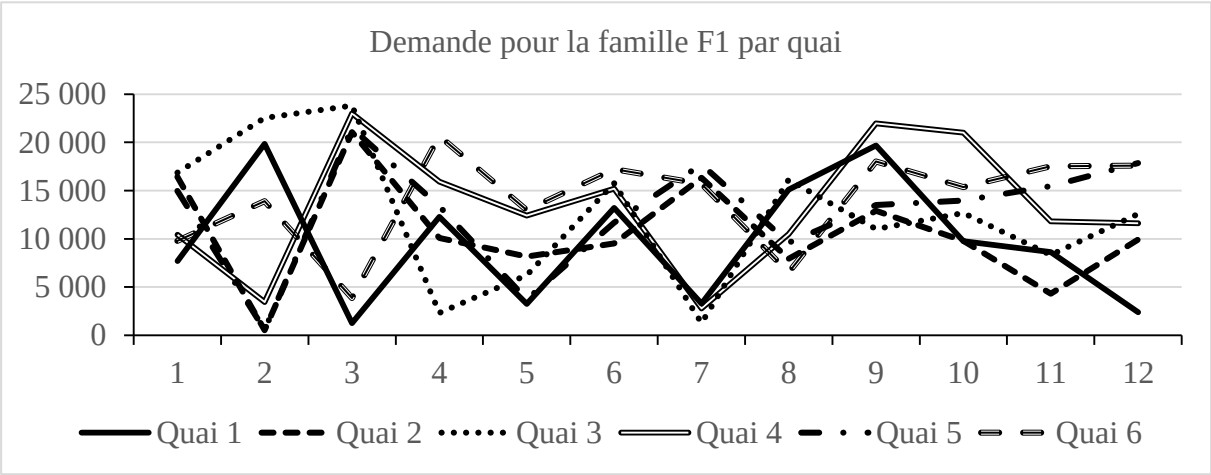


Figure 4. 6- Distribution de la demande annuelle par quai de la famille F1

Le Tableau 4. 3 porte sur les différentes capacités maximales des ressources mobilisées dans le système industriel, à savoir les lignes de production $L_{i=1..6}$ (en tonnes/heure), les hangars de stockage $H_{j=1..9}$ (en tonnes).

Ligne/Hangar	Capacité
L_1	90 t/h
L_2	90 t/h
L_3	180 t/h
L_4	120 t/h
L_5	120 t/h
L_6	120 t/h
H_1	50000 t
H_2	50000 t
H_3	50000 t
H_4	50000 t
H_5	50000 t
H_6	50000 t
H_7	50000 t
H_8	100000 t
H_9	100000 t

Tableau 4. 3- Capacité des ressources lignes de production et hangars de stockage (en tonnes)

L'introduction des différentes applications numériques, du MILP précédemment défini, revêt deux objectifs à savoir l'apport d'une aide à la décision et d'explications supplémentaires quant à l'exécution d'un ensemble de scénarios et l'illustration des temps de résolution associés. Ainsi, l'instance industrielle considérée est relativement petite en termes de données, ce qui présente l'avantage de faciliter l'exploitation ainsi que l'explication des résultats obtenus.
Cette approche d'aide à la décision permettra pour chaque scénario de planifier, sur un horizon de 12 mois avec une périodicité mensuelle, les quantités à produire, à stocker, à transporter et à distribuer des familles d'engrais, de sorte à maximiser le profit défini par les équations (4.45 - 4.48).

A l'issue des optimisations, nous obtenons des plans pour la prise de décisions associées à chacun des scénarios candidats en utilisant le critère des valeurs prises par les coefficients de pondérations $\theta_{i=1..7}$ de la fonction objectif, ainsi que la prise ou non d'une valeur cible du taux de la satisfaction de la demande. Ainsi, ces différents scénarios sont illustrés dans le Tableau 4. 4.

Scénarios	Taux de satisfaction de la demande (TSD) cible	Coefficients de pondération θ_i						
		θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6	θ_7
SC1	X	0	0	0	0	0	0	0
SC2	X	1	0	0	0	0	0	0
SC3	X	1	1	1	1	1	1	1
SC4	X	1	0	0	0	1	0	0
SC5	99%	1	0	0	0	1	0	0
SC6	X	1	0	0	0	0	1	1
SC7	98%	1	0	0	0	0	1	1
SC8	X	1	1	1	0	0	0	0
SC9	99%	1	1	1	0	0	0	0

Tableau 4. 4- Description des scénarios étudiés

Les différents scénarios sont définis comme suit :

Scénario 1 (SC1) : Ce scénario prend en considération une nouvelle fonction objectif qui maximise juste le taux de satisfaction de la demande sur l'ensemble de l'horizon de planification. Ce scénario représente une référence pour la satisfaction de la demande. Il permet aux décideurs de connaître la satisfaction maximale et ainsi de pouvoir élaborer l'offre commerciale qui semble être réaliste. Les coûts y sont négligés.

$$MAX \sum_{f \in F, q \in S_5, t \in T} \omega_{f,q,t}$$

Scénario 2 (SC2) : Ce scénario a pour objectif de maximiser le chiffre d'affaire sur l'ensemble de l'horizon de planification. L'intérêt de ce scénario est d'obtenir une solution qui favorise la production des familles de produits dont les prix de vente sont plus élevés par rapport aux autres. Ce scénario est particulièrement intéressant dans le cas d'une surcharge du système et/ou la saisonnalité de la demande est telle que la capacité est insuffisante.

Scénario 3 (SC3) : Ce scénario cherche à maximiser le chiffre d'affaire et de minimiser les différents coûts associés sur l'ensemble de l'horizon de planification. L'objectif est donc d'obtenir la solution qui maximise le profit. Ce scénario correspond aux objectifs les plus souvent rencontrés dans le milieu

industriel. En effet, il permet de faire le consensus entre le commerce, la finance et la production.

Scénario 4(SC4) : Ce scénario a pour objectif de maximiser le chiffre d'affaire et de minimiser le coût de stockage sur l'ensemble de l'horizon de planification. En d'autres termes ce scénario cherche à réduire les stocks et ainsi de minimiser la trésorerie immobilisée et par conséquence de réduire le fond de roulement. Ce scénario correspond aux objectifs financiers souvent mis en valeurs par la direction financière.

Scénario 5(SC5) : Ce scénario est identique au scénario 4. Il a pour objectif de maximiser le chiffre d'affaire et de minimiser le coût de stockage, tout en définissant un taux de satisfaction de la demande cible de 99% sur l'ensemble de l'horizon de planification. Il répond à la question « Quelle est la solution qui permet de satisfaire la demande au maximum et réduire le fond de roulement ? ». Ce scénario cherche à satisfaire d'une part les objectifs commerciaux : satisfaire la demande ; et d'autre part répondre aux contraintes financières : réduire la trésorerie immobilisée.

Scénario 6(SC6) : Ce scénario a pour objectif de maximiser le chiffre d'affaire et de minimiser les coûts associés au changement des lignes de production et au changement des hangars de stockage sur l'ensemble de l'horizon de planification. Il répond à une pratique industrielle souvent mise en premier plan : ne pas changer l'affectation des ressources de production et de stockage. Dans l'industrie de process ce changement nécessite de nettoyage et coûte cher.

Scénario 7(SC7) : Ce scénario est identique au précédent et a pour objectif de maximiser le chiffre d'affaire et de minimiser les coûts associés au changement des lignes de production et au changement des hangars de stockage tout en cherchant un taux de satisfaction de la demande cible de 98% sur l'ensemble de l'horizon de planification.

Scénario 8(SC8) : Ce scénario a pour objectif de maximiser le chiffre d'affaire et de minimiser les coûts associés à l'ouverture d'une ligne de production et à l'ouverture d'un hangar de stockage sur l'ensemble de l'horizon de planification. Il répond aux questions liées au dimensionnement du système.

Scénario 9(SC9) : Ce scénario est identique au précédent et a pour objectif de maximiser le chiffre d'affaire et de minimiser les coûts associés à l'ouverture d'une ligne de production et à l'ouverture d'un hangar de stockage tout en définissant un taux de satisfaction de la demande cible de 99% sur l'ensemble de l'horizon de planification. Il cherche à répondre à la question « Quelles sont les ressources nécessaires pour satisfaire pleinement la demande ? »

3.4.2. Exploitation des résultats : illustration

Dans le but de ne pas aboutir à des durées d'exécution trop importantes, la résolution a été interrompue au bout de deux heures de temps de calcul. Les différents modèles associés aux différents scénarios ont été exécutés avec des temps de résolution qui se situent entre 122s et 7200s avec des écarts (gap) de la solution optimale de 0% à 3% de la borne inferieure déterminée par Cplex. Cet écart estimé avec la solution optimale provient de la partie du Branch&Bound non encore explorée lors de l'arrêt du programme. Elle correspond ainsi à la fonction objectif d'une solution en partie continue et constitue donc, à ce titre, une borne théorique. Ainsi, le Tableau 4. 5 illustre le temps associé à la résolution des différents scénarios ainsi que les écarts.

Scénario	Temps d'exécution (s)	Ecart estimé avec la solution optimale (%)
SC1	7218	0,09%
SC2	122	0,00%
SC3	7211	3,60%
SC4	346	0,00%
SC5	2114	0,01%
SC6	7202	1,57%
SC7	7200	1,75%
SC8	1948	0,00%
SC9	1211	0,00%

Tableau 4. 5- Temps associés à la résolution du modèle linéaire pour les scénarios

De par l'étude des différents éléments fournis par le solveur, nous pouvons constater que, comme attendu, la résolution ne s'est pas effectuée d'une manière linéaire. Ainsi, pour la résolution du premier scénario (SC1), comme indiqué sur le Tableau 4. 6, la première solution réalisable a été obtenue au bout de 43s. Celle-ci, se situant à environ 4,66% de la solution

optimale a été rapidement améliorée avant de stagner (gain de seulement 1,03% en 7125 secondes soit en 1 heures 58 minutes et 45 secondes).

Temps d'exécution (s)	Ecart estimé avec la solution optimale (%)
43	4,66
60	3,29
76	2,12
93	1,12
110	0,80
145	0,35
264	0,24
339	0,22
693	0,11
805	0,09
7218	0,09

Tableau 4. 6- Temps associés à la résolution du modèle linéaire dans le cas de SC1

L'exécution des autres scénarii ont le même comportement avec des durées différentes. Le scénario 5 (SC5) s'arrête après 2114s avec une solution jugée optimale par le solveur avec un écart à 0,01% de la borne inférieur.

Parmi les premiers paramètres des résultats à analyser, afin d'illustrer le fonctionnement ainsi que le champ d'application des différents modèles linéaires représentant les scénarios, nous nous intéressons dans un premier lieu au volume de la demande satisfaite dans chaque scénario, et ceci par la représentation du taux moyen de la satisfaction de la demande (TSD) de chaque scénario illustré dans le Tableau 4. 7. Comme montré, le taux moyen de satisfaction le plus élevé de 99% est celui du scénario SC1 qui vise juste à maximiser le taux de satisfaction de la demande, contre le taux le plus faible 97% associé au scénario SC3 qui maximise le profit (maximise le chiffre d'affaire en minimisant tous les coûts associés à la chaîne logistique industriel).

Scénario	Taux moyen de satisfaction de la demande
SC1	99,53%
SC2	98,73%
SC3	97,26%
SC4	98,20%
SC5	99,06%
SC6	98,15%
SC7	98,86%

SC8	98,59%
SC9	99,11%

Tableau 4. 7- Satisfaction de la demande moyenne des scénarios

L'obtention d'un taux moyen de satisfaction de la demande inférieur à 100% pour une capacité supérieure de 0,4% s'est traduite par la saisonnalité de la demande. En d'autres termes, il y a des périodes pour lesquelles la capacité de production est inférieure à la demande et les stocks sont vides comme le montre la Figure 4. 7. Par exemple, il était attendu que le SC1 (maximisation du TSD), pour lequel le solveur déclare la solution comme optimale, obtienne une valeur de TSD de 100%. Le TSD par famille de produits sur l'horizon de planification est donné dans le Tableau 4. 8. Les familles 2, 5 et 6 ont un TSD respectivement égal à 99%, 99% et 96%. L'analyse des résultats pour la famille 6 montre que lors de la période 3 la capacité était insuffisante et ainsi comme le montre le Tableau 4. 8, le TSD moyen est de 72,33%. On peut remarquer que les TSD pour les quais 3 et 4 sont respectivement égaux à 0 et 34%. La solution choisie par le solveur valorise la satisfaction de la demande sur les périodes suivantes, génère du stock en période 3 et ainsi le TSD du quai 3 est égale à 0.

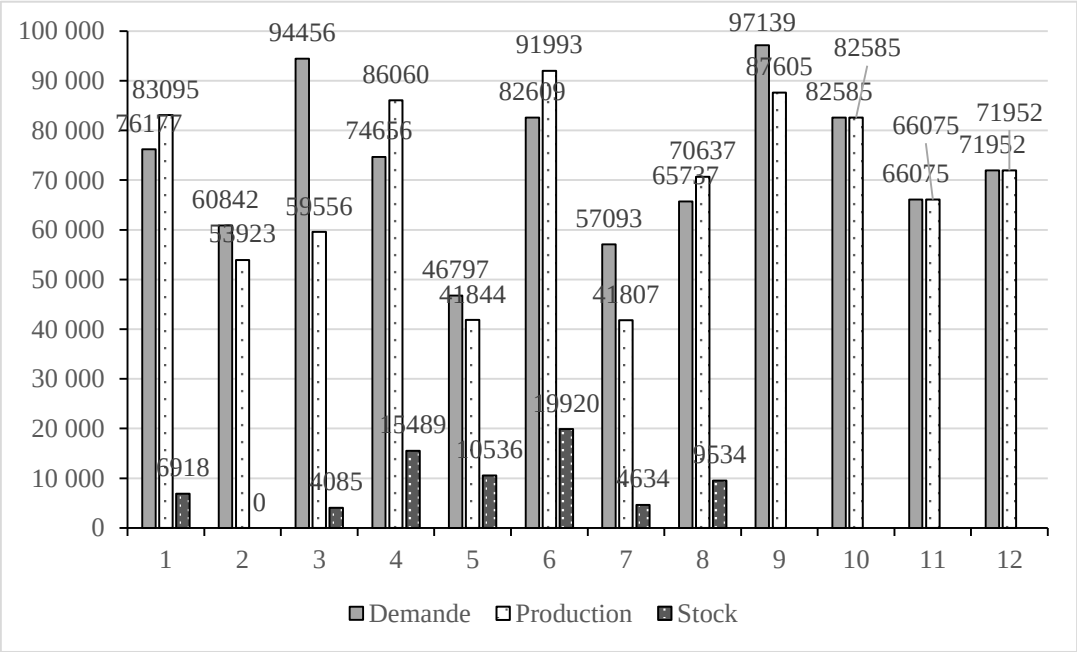


Figure 4. 7- Plan de production et de stock pour la famille 6 sur l'horizon de planification

Suite à l'exécution des différents scénarios sous le solveur CPLEX, nous avons comparé dans la Figure 4. 8 le profit et le chiffre d'affaire ; la Figure 4. 9 le coût total résultant de la somme des différents coûts pris en compte dans chaque scénario ; et la Figure 4. 10 les coûts de production et de stockage.

Famille	Demande	Production	TSD
F1	987808	987808	100%
F2	892229	894667	99%
F3	847723	847727	100%
F4	840063	840063	100%
F5	865237	871398	99%
F6	837132	876118	96%

Tableau 4. 8- Taux de satisfaction de la demande (TSD) par famille de produits pour SC1

Quai	Demande	Production	TSD
1	1247	1247	100%
2	21065	21065	100%
3	23814	0	0%
4	22986	7815	34%
5	21474	21474	100%
6	3870	3870	100%
TSD Moyen			72,33%

Tableau 4. 9- Résultats de la planification et TSD pour la famille 6 en periode 3

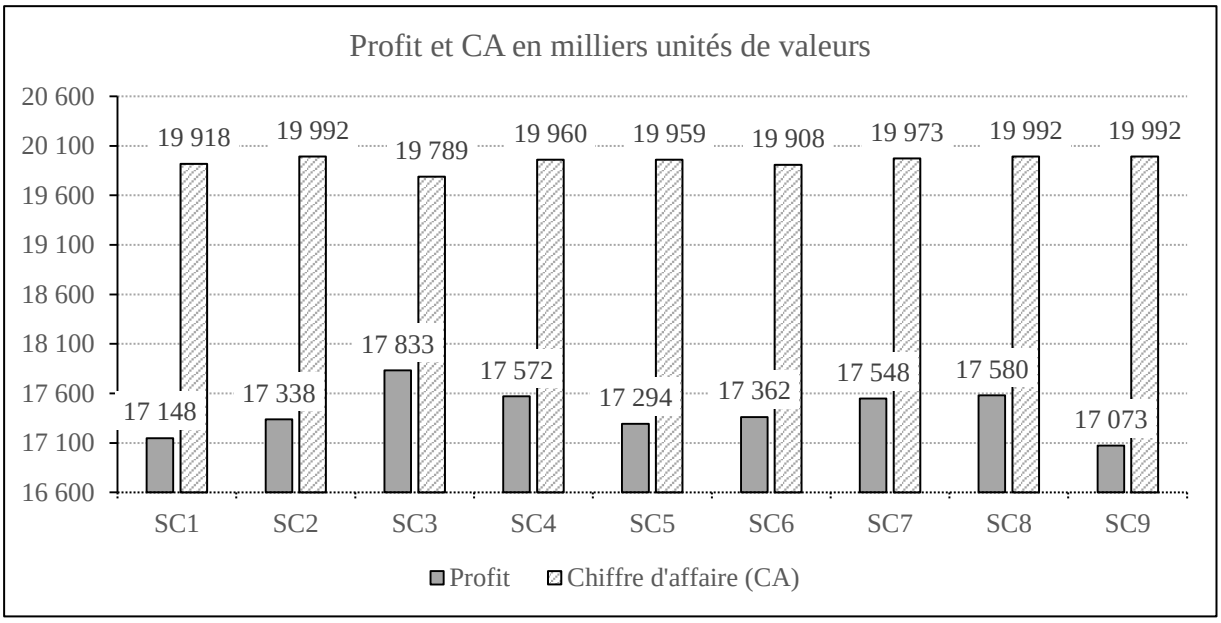


Figure 4. 8- Profit et CA par scénario

Le résultat montre que le scénario SC9 représente le coût total le plus élevé, ceci montre que si on se place dans le cas où le décideur vise à maximiser le chiffre d'affaire tout en minimisant l'ouverture des lignes de production et des hangars de stockage, ce qui se traduit par la satisfaction au maximum de la demande tout en limitant l'utilisation des ressources de production et de stockage, ce qui génère des coûts importants liés principalement au stockage.

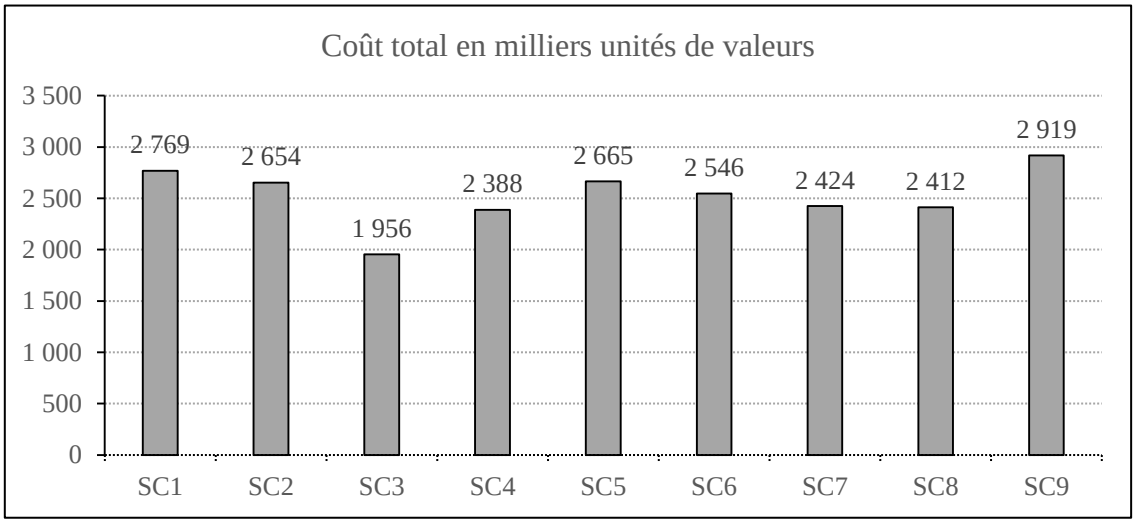


Figure 4. 9- Coût total par scénario

Les constats dessus sont également vrais pour le scénario 6 qui vise, rappelons-le, à maximiser le chiffre d'affaire et à minimiser les coûts associés au changement des lignes de production et au changement des hangars de stockage sur l'ensemble de l'horizon de

planification. Sous ce scénario, comme le montre la Figure 4. 11, les coûts de changement de ligne de production et d'hangar sont les plus faibles.

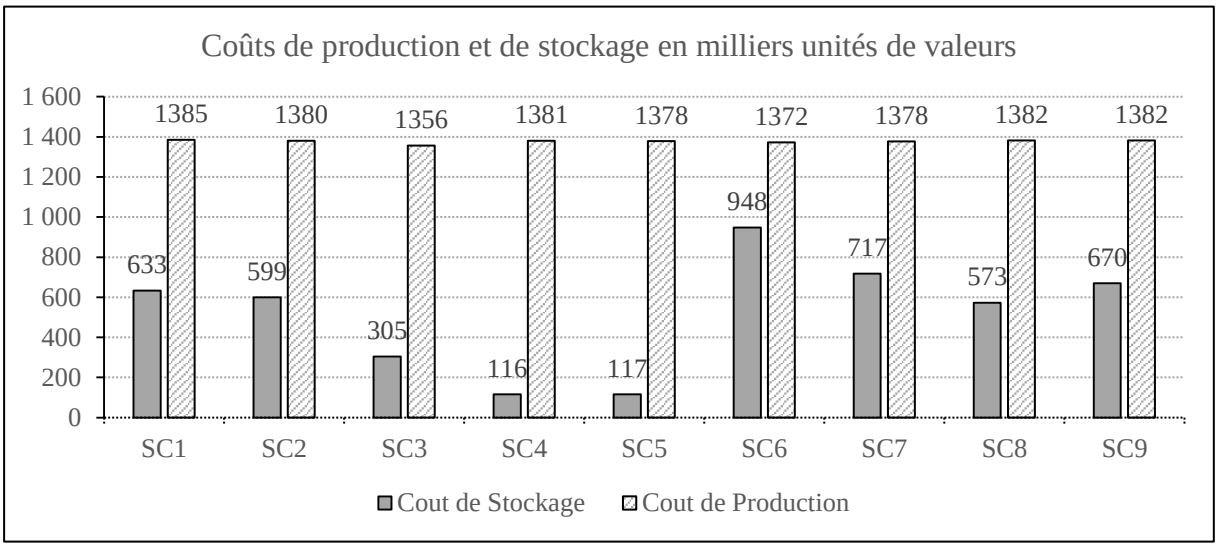


Figure 4. 10- Coût de production et de stockage par scénario

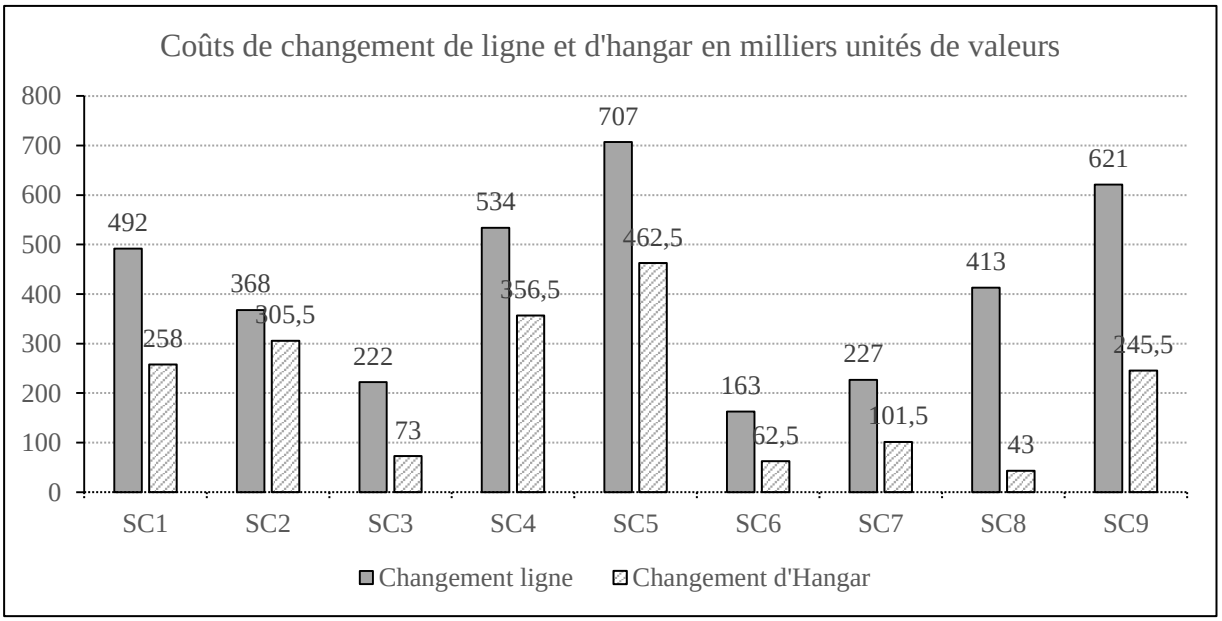


Figure 4. 11- Coût de changement de ligne et d'hangar

Le Tableau 4. 10 présente le classement de chaque scénario par rapport aux différents paramètres décisionnels. Le classement est établi dans l'ordre décroissant de chaque paramètre considéré. Ainsi, le scénario 1 (SC1) a le meilleur TSD (1/9) mais, en revanche, il a un profit qui est relativement faible (8/9) et un coût total élevé (2/9). Le scénario 2 (SC2) dont l'objectif

est de maximiser le chiffre d'affaire obtient le chiffre d'affaire le plus élevé, cependant le profit est relativement faible (6/9). Le scénario 3 (SC3) permet d'obtenir le meilleur profit (1/9) avec le coût total le plus faible (9/9). L'analyse montre que le scénario 4 (SC4) qui maximise le chiffre d'affaire et minimise le coût de stockage permet, certes d'obtenir un coût de stockage faible (9/9) et donc un coût total faible (8/9), mais avec un profit qui laisse à désirer (3/9). Le scénario 5 (SC5) qui est similaire au SC4 tout en définissant un taux de satisfaction de la demande cible de 99% a un coût de stockage plus élevé que le SC4 (8/9) et donc un coût total plus élevé (3/9), un meilleur TSD (3/9) et un profit plus faible (7/9). Le scénario 6 (SC6), qui minimise le changement de ressource de production et de stockage, a des coûts de changement faibles : coût de changement de ligne (9/9) et coût de changement d'hangar (8/9). Cependant, le TSD (8/9) et le profit (6/9) sont plus faibles. Pour le scénario 7 (SC7) qui est similaire au SC6, tout en définissant un taux de satisfaction de la demande cible de 98%, les résultats sont similaires. Le scénario 8 (SC8) qui cherche à maximiser le chiffre d'affaire et à minimiser les coûts associés à l'ouverture d'une ligne de production et à l'ouverture d'un hangar de stockage donne des résultats satisfaisants : un coût faible (7/9) et un profit classé en deuxième position (2/9). Pour le scénario 9 qui est similaire au SC8, tout en définissant un taux de satisfaction de la demande cible de 99%, les résultats sont décevants : le coût total le plus élevé (1/9) et le plus faible profit. Comme on peut le voir à partir de ces constats, il n'y a aucun scénario qui peut être considéré comme étant le meilleur. Ces résultats prouvent l'intérêt de l'utilisation de modèles d'optimisation dans le processus décisionnel lors de l'élaboration du PIC et le dimensionnement de la capacité et l'offre commerciale. L'hypothèse que le non changement de ligne de production et d'hangar réduit les coûts est contestée par les résultats : ce scénario a un profit relativement faible (7/9) et le coût de stockage le plus élevé et un coût total moyen.

Scénario	TSD	Coût de stockage	Coût de changement de ligne	Coût de changement d'hangar	Coût d'Ouverture de ligne	Coût d'Ouverture d'hangar	Coût total	Profit
SC1	1	4	4	4	Le même coût – toutes les lignes de production sont utilisées.	*	2	8
SC2	5	5	6	3		*	4	6
SC3	9	7	8	7		8	9	1
SC4	7	9	3	2		*	8	3
SC5	3	8	1	1		*	3	7
SC6	8	1	9	8		7	5	6
SC7	4	2	7	6		*	6	4
SC8	6	6	5	9		9	7	2
SC9	2	3	2	5		*	1	9

*Les scenarii ont le même cout d'ouverture d'hangar : tous les hangars sont utilisés et les couts sont élevés.

Tableau 4. 10- Classement des scénarios par paramètre décisionnel et par ordre décroissant

À travers les différents éléments indiqués tout au long de cette partie, nous pouvons constater que l'élaboration du PIC est basée sur un processus d'aide à la décision où chaque scénario est associé d'une part à une planification de la production, du stockage et de distribution, et d'autre part, à un coût et un profit. Il nous semble que le scénario 3 (SC3) est un bon rapport qualité de service et profit. Ce scénario a certes le plus faible TSD avec un écart de moins de 2,2% par rapport au meilleur (SC1), cependant il a le meilleur profit de tous les scénarii et un profit de 4% supérieur par rapport du SC1. La Figure 4. 12 donne la comparaison entre le SC3 et les autres en termes d'écart de TSD et de profit.

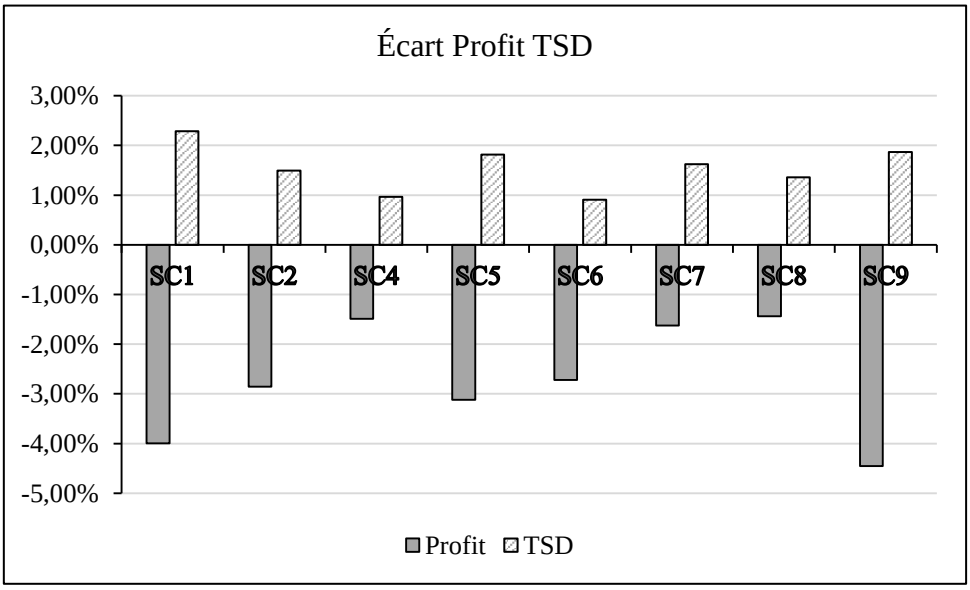


Figure 4. 12- Ecart entre le scénario SC3 et les autres scénarii : TSD et Profit

Cependant, il convient tout de même de s'intéresser à quelques-uns des paramètres relatifs à la fonction objectif associée au volume des ventes et aux différents coûts relatifs au système

industriel étudié. Notons que dans le cadre de cette analyse des résultats, il est opportun de s'intéresser à la présentation des résultats de la planification d'un scénario parmi l'ensemble des scénarios présentés, nous optons ainsi pour le scénario SC3.

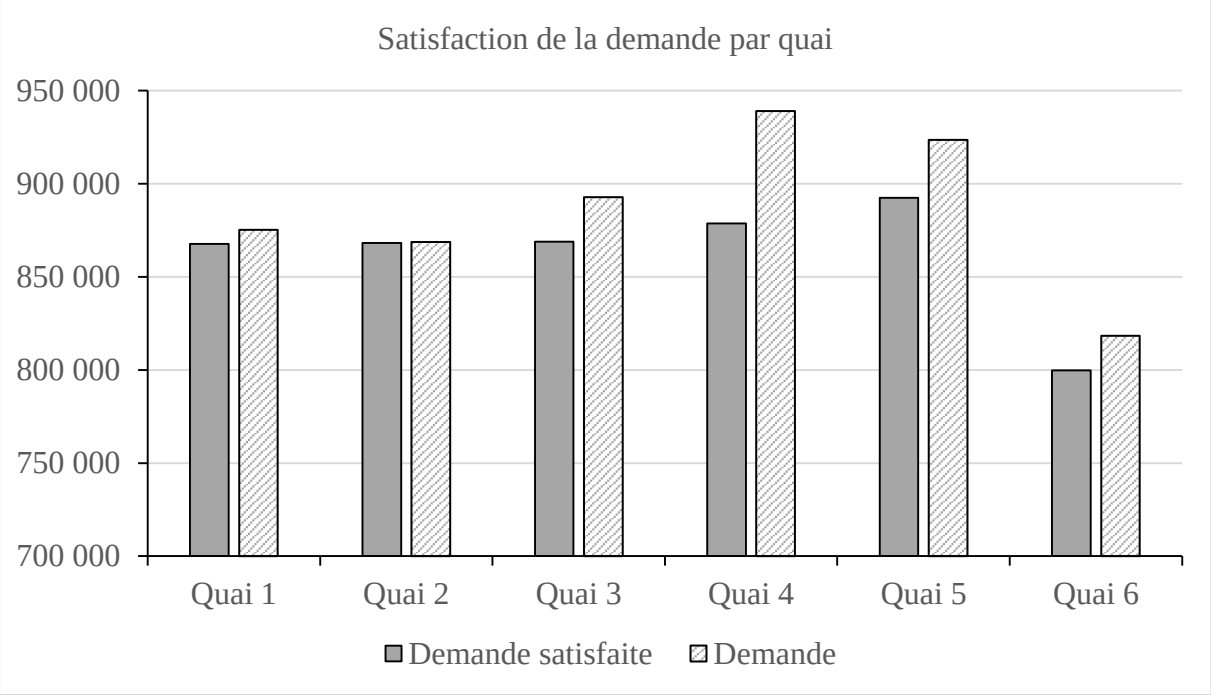


Figure 4. 13- Satisfaction de la demande par quai dans le cas du scénario SC3

La Figure 4. 13 montre le volume de la demande satisfaite sur l'ensemble de l'horizon de planification dans le cas du scénario SC3 à partir de la solution obtenue par le MILP associé, et ceci est exprimé au niveau de chaque quai de chargement pour l'ensemble des familles de produits. Nous constatons qu'en moyenne la demande au niveau du quai 1 est satisfaite à 99,13%, puis le quai 2 représente une satisfaction exprimée à 99,94%, ensuite la satisfaction de la demande au quai 3 est à 97,33%, tandis que la satisfaction la plus faible est illustrée au niveau du quai 4 de 93,57%, et finalement les quais 5 et 6 représentent respectivement une satisfaction de la demande de 96,62% et 97,74%.

Comme il a été souligné dans le premier chapitre, l'objectif du PIC est de permettre un consensus entre l'objectif commercial, l'objectif financier et l'objectif de la gestion des opérations de production. Outre les coûts, le profit et le TSD, le PIC fournit le plan de capacité, le plan de production et les normes de stock par ressource de production et de stockage. À titre d'exemple ces éléments peuvent être retrouvés sur les Figure 4. 14, Figure 4. 15 et Figure 4. 16, illustrant respectivement le plan de capacité de la ligne 1, le plan de production de la famille 1 et les normes de stock pour la famille 1 lors de l'horizon de planification. Comme illustré sur

la Figure 4. 14 la capacité est utilisée à 100% par les familles 1, 2 et 6. Pour la production de la famille 1 toutes les lignes de production sont utilisées lors de l'horizon de planification (Figure 4. 15). À l'exception de la période cinq (P5) pendant laquelle les lignes 1, 2 et 6 sont mobilisées, deux lignes par période sont affectées.

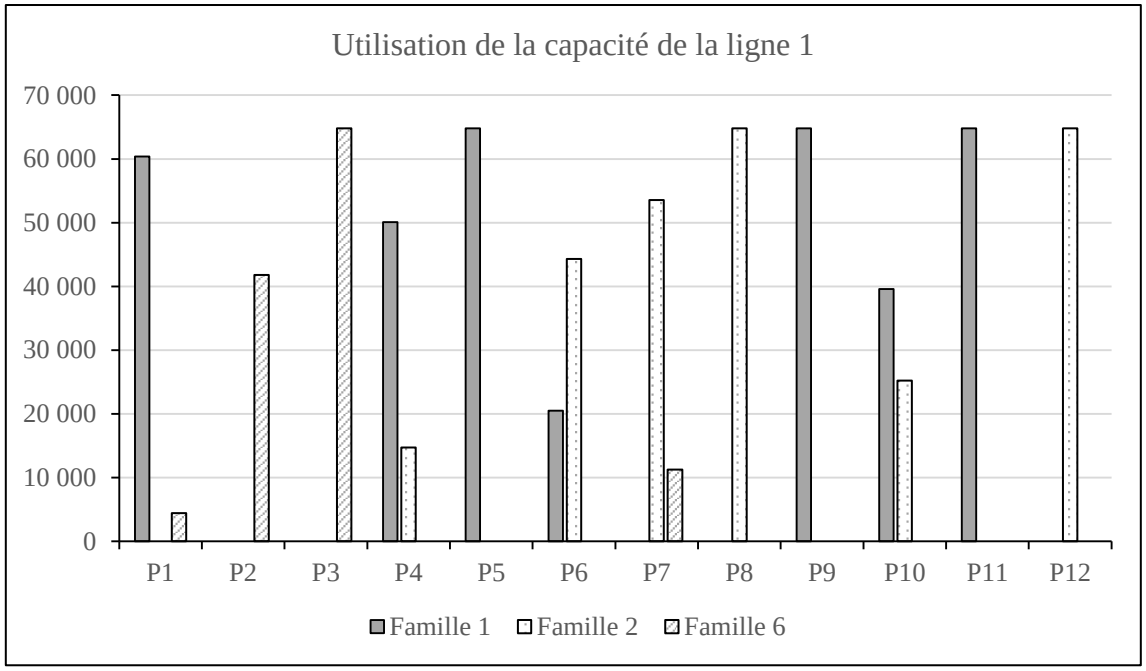


Figure 4. 14- Plan de capacité de la ligne 1

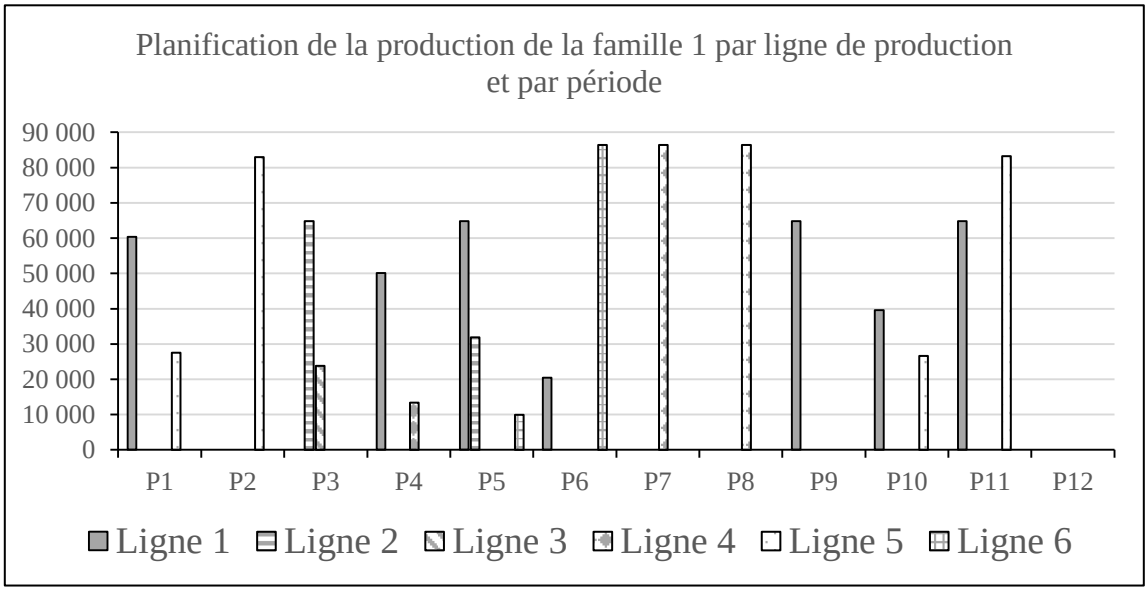


Figure 4. 15- Plan de production de la famille 1

Comme illustré dans la Figure 4. 16, deux hangars sont principalement utilisés H_8 pendant les périodes P6 et P11 et H_2 pendant les périodes P9 et P11.

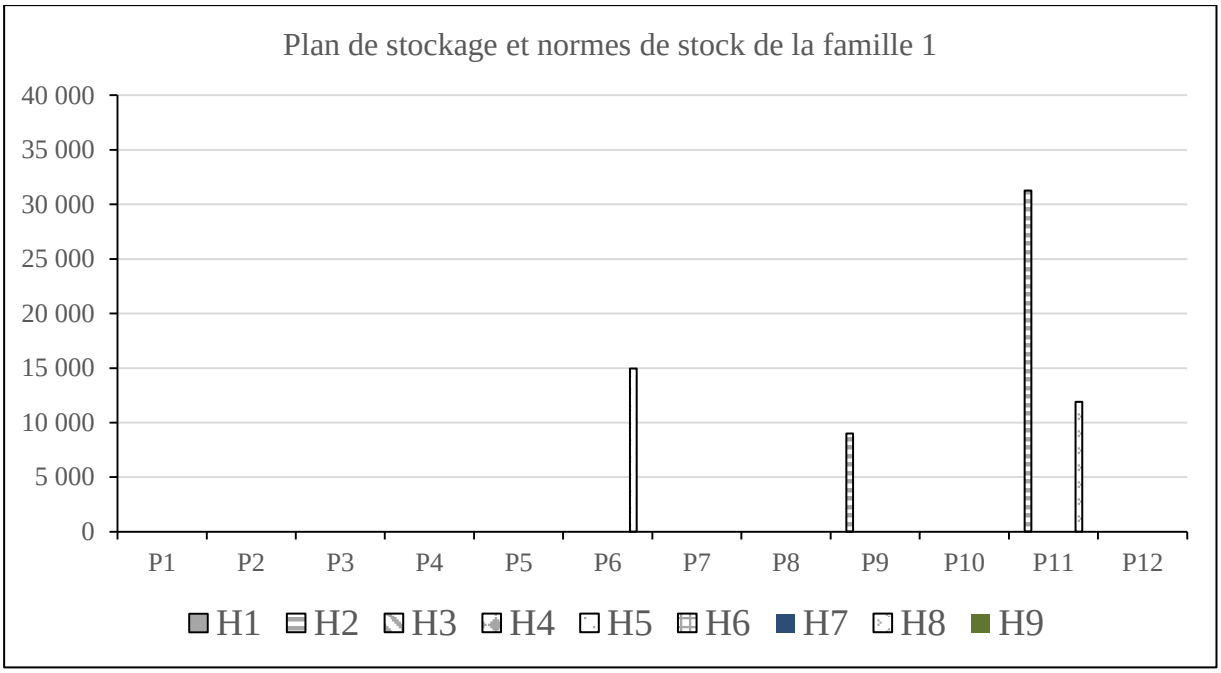


Figure 4. 16- Normes et plan de stock de la famille 1

La phase de constitution des stocks a pour objectif, partant d'une planification donnée, de satisfaire la demande restante par une anticipation de la production en utilisant les capacités disponibles. La phase de la planification ne consiste pas juste à chercher à produire exactement la demande de la période considérée, sans chercher à pallier des problèmes capacitaires par une anticipation de la production via la constitution des stocks, qui permet de profiter des capacités disponibles lors de chaque période afin de satisfaire la demande restante lors des suivantes.

La Figure 4. 17 illustre l'état des stocks, et ceci via la définition de la quantité stockée au niveau de chaque hangar et à chaque période de l'horizon de planification. Ainsi, 5 hangars de stockage sont utilisés pour le modèle du scénario SC3, à savoir H_1, H_2, H_3, H_8, et H_9, avec une quantité maximale de 226593 tonnes exprimée au niveau du hangar H_8 sur l'ensemble de l'horizon de planification et une quantité minimale de 6701 tonnes exprimée au niveau du hangar H_3.

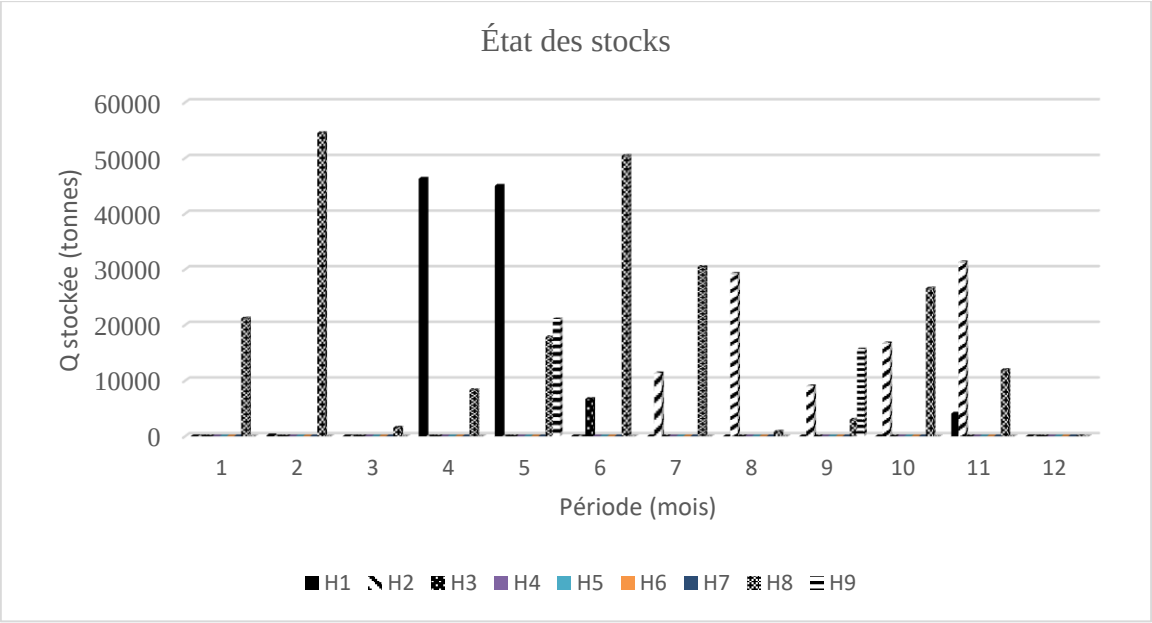


Figure 4. 17- La valeur des stocks des familles de produits pour le SC3

Les différents résultats montrent tout d'abord que la prise en compte d'un scénario par le décideur permet d'obtenir des informations riches sur la prise de décision via les différents indicateurs liés à la planification. Des résultats similaires peuvent être faits suite à l'exécution des différents scénarios.

Une fois ces décisions stratégiques déterminées, celles-ci doivent être déclinées à la maille tactique au fur et à mesure de l'avancé dans le temps. Cette étape se traduit, notamment, par la définition d'une planification de la production pour laquelle a été construit un modèle spécifique présenté au sein de la partie suivante.

4. Modèle mathématique de planification tactique

4.1. Introduction

La section (§3) a été adressée exclusivement à la planification long terme des activités de production, de stockage et d'expédition du système logistique industriel étudié, sans intégrer les différentes interactions avec les processus de décisions moyen terme. Ceci constituant uniquement l'un des plans du processus de pilotage d'un tel système. Partant de ce constat, nous proposons au sein de cette section un processus intégré de planification long et moyen terme. Plus précisément, il s'agit de définir un modèle de planification moyen terme, ainsi qu'un environnement intégré de planification couvrant les horizons stratégiques et tactiques, et ainsi

représenter les interactions entre les deux modèles. Cet environnement d'intégration des deux modèles de planification est un moyen pour faciliter la déclinaison des décisions prises à un niveau sur le niveau immédiatement inférieur, et aussi pour mettre en œuvre des boucles de faisabilité permettant de garantir la réalisabilité des décisions prises sur les deux horizons de planification.

Dans ce contexte, la partie (§4.2) est consacrée à la présentation du processus de planification tactique, tandis que la partie (§4.3) définit le fonctionnement de l'environnement intégré de planification ainsi construit, et ce, à travers une schématisation de celui-ci intégrant les deux processus de planification à long et à moyen terme.

4.2. Processus de planification tactique

La modélisation adoptée afin de résoudre le problème de planification tactique est dérivée de celle introduite au sein des sections (§2 et §3) de ce même chapitre, l'objectif étant d'utiliser le même formalisme mathématique. Ainsi, d'une manière similaire au processus de planification stratégique du système logistique industriel étudié et présenté auparavant, celui relatif à la planification tactique a été modélisé aussi sous la forme d'un graphe multi-flots. Cependant, dans ce cas, n'ont pas été considérés des couples (famille de produits, demande mensuelle), mais plutôt des couples (produits finis, demande hebdomadaire). À ce niveau, les familles de produits sont désagrégées à la maille produit fini et les décisions sont modifiées en fonction des prévisions tactiques et les données du marché.

Le modèle de flot associé à ce modèle tactique est composé d'un ensemble de nœuds représentant chacun des lignes de production, des hangars de stockage, des convoyeurs de transport et des points de distribution, ainsi que des arcs ayant des capacités maximales. La demande des produits finis est exprimée au niveau des nœuds représentant les points de distribution (dans notre cas les quais de chargement).

Dans chaque période de l'horizon de planification, chaque couple (produit fini, demande hebdomadaire), a été relié à l'ensemble des lignes de production (situées dans la ou les usines) auxquelles le produit fini associé a été affecté et ayant la capabilité technique de le fabriquer. L'ensemble des hangars de stockage auxquels le produit fini associé a été affecté, ayant la capacité de stockage pour le stocker, et l'ensemble de convoyeurs de transport ayant la capacité de transport suffisante pour transporter le produit fini.

Compte-tenu de ces éléments, le flot circulant dans le graphe permet de représenter la quantité de chaque produit fini fabriqué lors de chaque période au sein de chaque ligne de production, transporté par chaque convoyeur de transport, stocké dans chaque hangar de stockage et distribué au niveau de chaque quai de chargement, et ceci en tenant compte des contraintes capacitaires.

L'objectif du graphe de flot est de trouver la meilleure configuration permettant de faire circuler à coût minimum la quantité du flot qui maximise la satisfaction de la demande tout en minimisant les différents coûts associés au système, ce qui revient à maximiser le profit.

La modélisation proposée du problème de planification tactique est donnée en Annexe 2, cette modélisation est relativement proche de celle introduite en section (§3), est également résolue à l'aide d'un modèle linéaire, ainsi le MILP (programmation linéaire mixte en nombres entiers) proposé permet d'adresser des problèmes de grande taille.

4.3. Processus intégré de planification

Le processus intégré de planification proposé repose sur une hiérarchisation des décisions en fonction des horizons associés et, ceci, au-delà des simples découpages tactique et stratégiques. Afin de mettre en œuvre ce processus, un environnement de planification est proposé par la suite.

4.3.1. Principe de l'environnement intégré de planification

L'environnement intégré de planification est basé sur une hiérarchisation des décisions en fonction des horizons associés. Le processus de planification stratégique est divisé en plusieurs sous-processus décisionnels à savoir :

- l'affectation des familles de produits aux usines de production et ensuite les lignes de productions associées et ceci en respectant la capabilité de ces lignes à produire ou non une famille de produits donnée. Ces décisions consistent à déterminer aussi l'ouverture ou non des lignes de production.
- l'affectation des familles de produits aux hangars de stockage en prenant en considération la capacité maximale de ces ressources de stockage. Ces décisions consistent à déterminer aussi l'ouverture ou non de tous ces hangars de stockage.

- les processus décisionnels relatif à l'affectation des convoyeurs de transport ainsi que les points de distribution et le choix du hangar de stockage pour l'enlèvement des familles de produits afin de satisfaire la demande.

Ces décisions d'affectations prises au niveau stratégique sont intégrées par le modèle linéaire précédemment présenté. Cependant l'utilisation de l'environnement intégré permet de tester différentes hypothèses permettant le dimensionnement capacitaire. Ces décisions sont réalisées vis-à-vis des familles de produits à une maille mensuelle, et au fur et à mesure de l'avance du temps, doivent être reconsidérées au niveau tactique. Notons que ceci suppose, au sein du système de production étudié, de considérer les produits finis en tant que tels, et non des regroupements de ces derniers ; cette phase de déclinaison, de par la prise en compte de contraintes à une maille plus fine « maille temporelle hebdomadaire » au lieu de la « maille temporelle mensuelle ». L'environnement intégré a également pour objectif de prendre en considération les décisions d'affectation des familles de produits aux lignes de production au niveau stratégique pour établir une nouvelle matrice de capabilité technique des lignes de production (à produire ou non les produits finis) et de l'intégrer au niveau tactique. Ainsi, les décisions prises sur l'affectation des hangars de stockages ont été reconsidérés au niveau tactique pour mettre en évidence la mobilisation d'un ou de tous ces hangars de stockage au niveau tactique. Cette approche de planification intégrée s'inscrit ainsi dans une boucle de faisabilité permettant de valider les décisions stratégiques en fonction des nouvelles données du marché. Aussi, elle peut être une étape importante pour la prise de mesures correctrices ainsi qu'à la modification des décisions prises au niveau long terme. Compte-tenu de ces éléments, ce processus de planification tactique a été distingué, un modèle spécifique lui ayant été associé.

4.3.2. Processus intégré de planification : Stratégique / Tactique

L'interaction entre les différentes phases d'un environnement intégré de planification représente un atout important à ce dernier. Cet aspect s'intéresse tant à la maille des données prises en compte, qu'aux boucles de faisabilité garantissant la pertinence des décisions prises d'un niveau à l'autre. Ainsi, la Figure 4.18 représente d'une manière graphique les caractéristiques d'un environnement intégré de planification proposé dans ce chapitre.

Comme indiqué précédemment, la première étape est constituée des décisions relatives à l'affectation des différentes ressources su système, et plus particulièrement l'affectation des lignes de production et des hangars de stockage. Ces différents éléments, définissant la majeure

partie du Plan Industriel et Commercial, sont ensuite repris afin de définir le niveau tactique de la planification. Ces décisions, initialement exprimées à la maille familles de produits – période mensuelle, sont alors déclinées au niveau produit fini – période hebdomadaire.

Ainsi, dans ce contexte, est défini le Programme Directeur de Production, qui représente une planification moyen terme consistant à décider des quantités de chaque produit à fabriquer sur chaque ligne de production, à stocker dans chaque hangar de stockage, et à distribuer dans chaque point de distribution, tout en respectant les décisions du stratégique. De plus, la mise en œuvre d'une boucle de faisabilité consistant à éventuellement remettre en cause les décisions d'affectation des lignes de production au niveau stratégique pour la définition d'une nouvelle capabilité technique de ces lignes de production au niveau tactique, que les décisions d'affectation des hangars de stockage aux familles produits prises au niveau stratégique pour la définition des nouvelles affectations au niveau tactique.

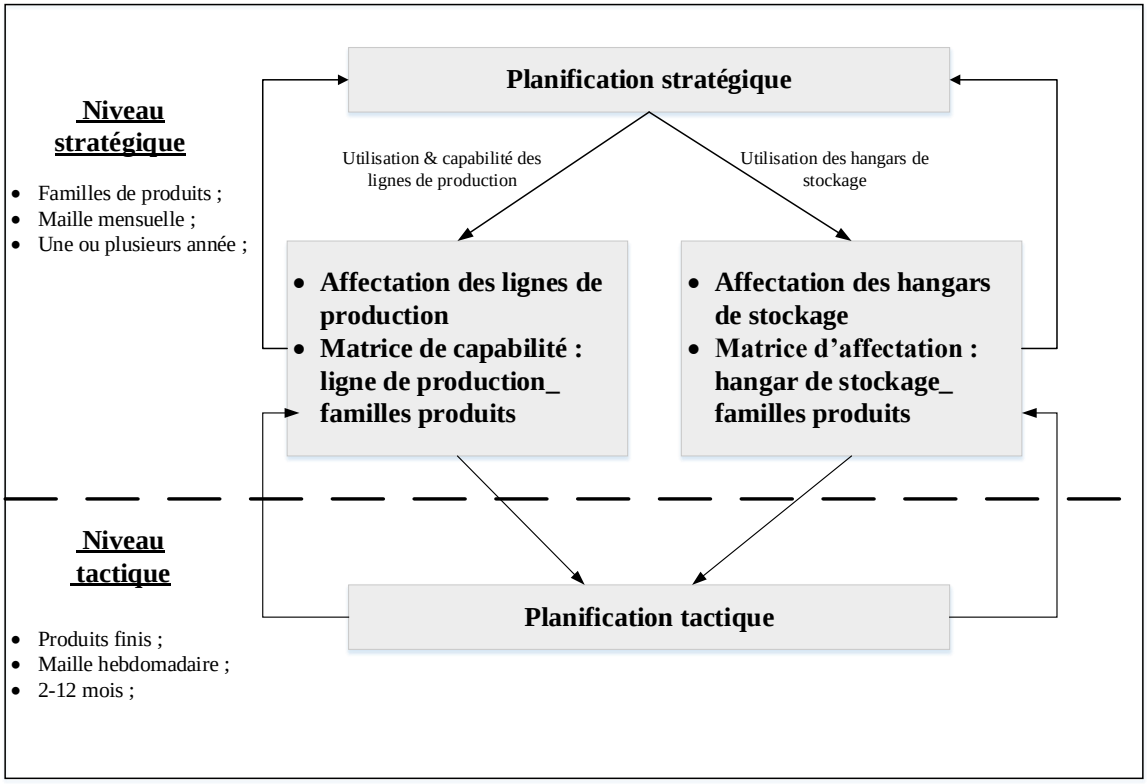


Figure 4. 18- Schéma de l'environnement intégré de planification

Dans le cadre de notre environnement intégré de planification décrit dans la Figure 4.18, le propre de la planification consiste à effectuer la planification de la production à partir des décisions d'affectations long terme et en fonction des nouvelles données du marché. Ceci

suppose donc de respecter les différentes affectations des familles produits au niveau stratégique.

Dans la phase de l'environnement intégré de planification, les décisions relatives au contexte stratégique sont prises en compte au niveau tactique.

4.3.2.1. Génération de la demande hebdomadaire

La première étape de l'environnement intégré consiste à générer la demande hebdomadaire des produits finis au niveau des différents quais de chargement, cette demande est générée à partir de la quantité produite mensuelle qui résulte du plan stratégique réalisé dans la section (§3). Cette quantité produite qui représente le flot sortant des lignes de production, est exprimée à la maille « mois » et « famille de produits », ensuite et afin de générer la demande du modèle tactique, des règles de désagrégation des données basées sur les coefficients saisonniers issus des prévisions moyen terme et les pourcentages des ventes des produits sont appliquées afin de générer des quantités à la maille « semaine » et « produit fini », et ceci pour chaque quai de chargement. À titre d'exemple le scénario SC3 du PIC est considéré. Les figures qui suivent détaillent ce processus. La Figure 4. 19 donne le résultat de la planification de la production trimestrielle de la famille 1 composé de quatre produits. Elle devient la demande à satisfaire pour le PDP. Les figures qui suivent présentent respectivement la désagrégation des données de la famille 1 en données produits (Figure 4. 20), leur désagrégation à la maille semaine (Figure 4. 21) par produit et la répartition de la demande du produit 1 par quai pour le premier trimestre (Figure 4. 22) du plan annuel du PIC.

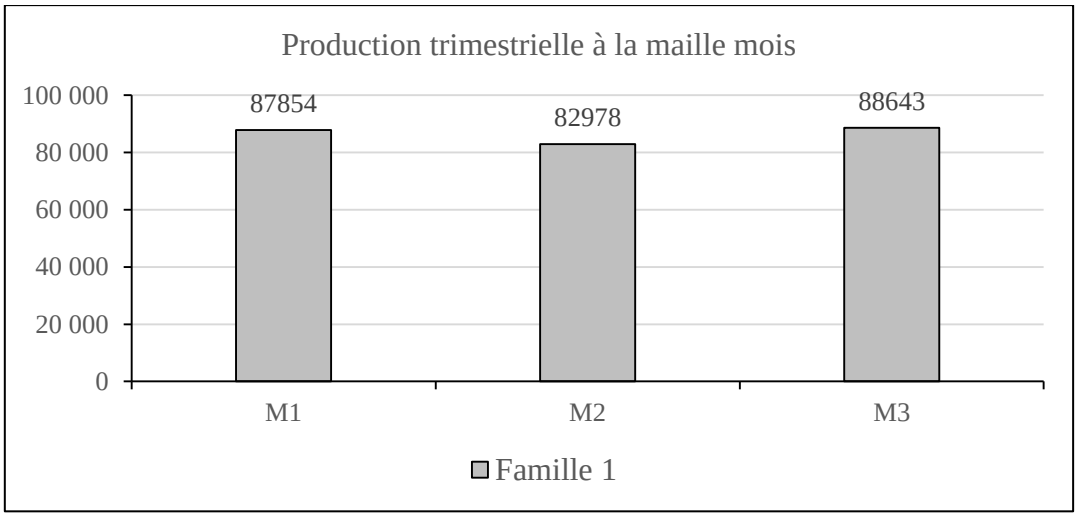


Figure 4. 19- Production trimestrielle de la famille 1 pour le scénario SC3 du PIC

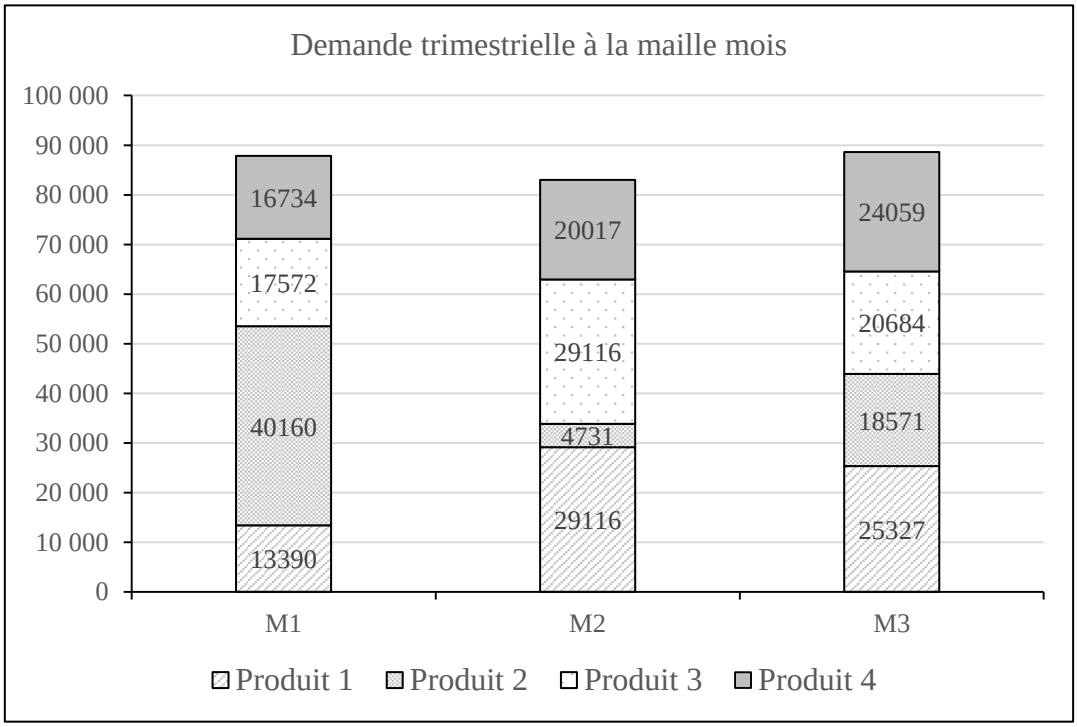


Figure 4. 20- Désagrégation de la demande de la famille 1 par produit

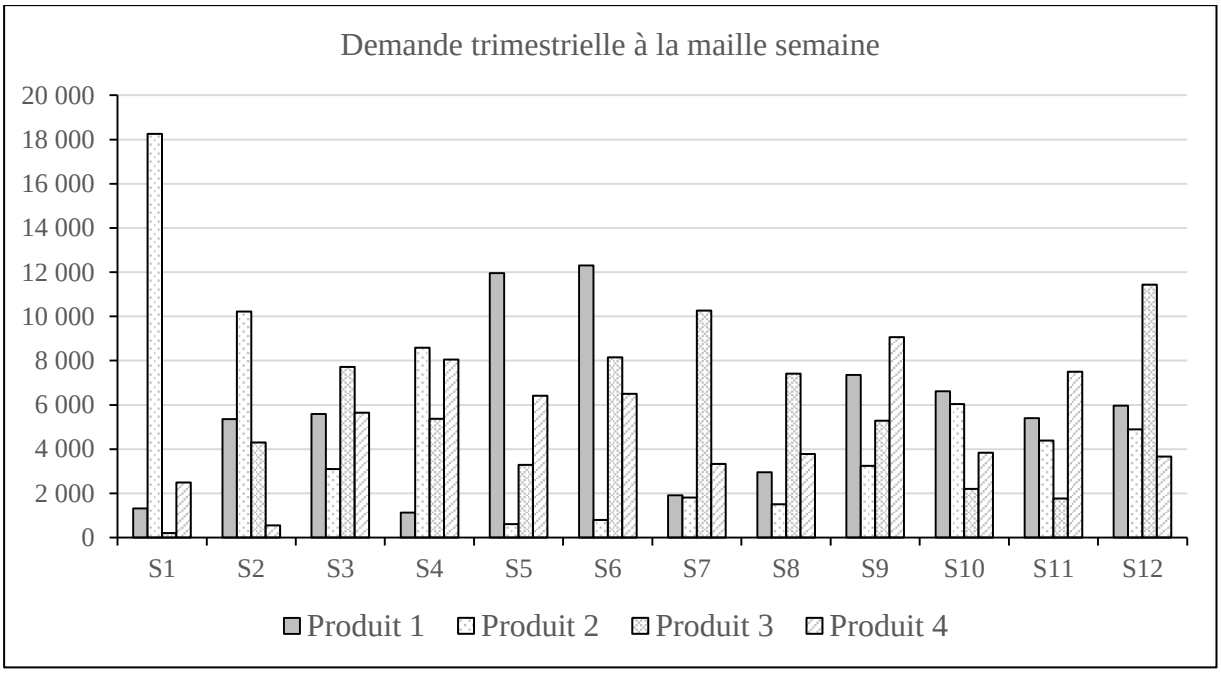


Figure 4. 21- Désagrégation de la demande trimestrielle à la maille semaine par produit

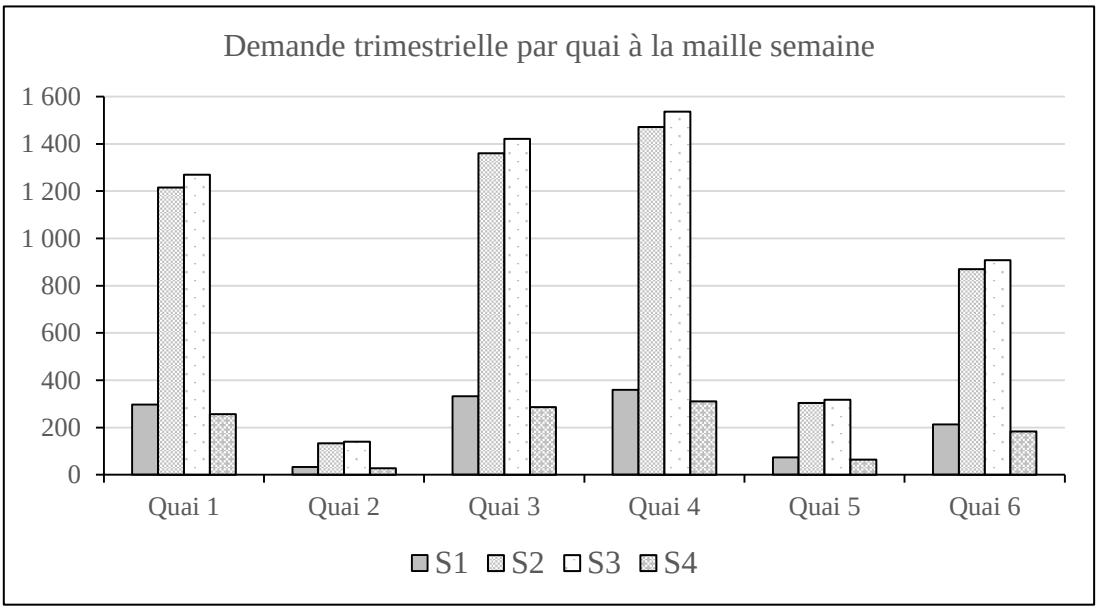


Figure 4. 22- Désagrégation de la demande par quai pour les premières quatre semaines du produit 1 de la famille 1

4.3.2.2. Affectation des produits finis aux lignes de production

La deuxième étape de l'environnement correspond à l'affectation des produits finis aux différentes lignes de production du système de production considéré. Celle-ci consiste à décider des affectations des produits finis en prenant en considération les affectations résultantes des familles de produits (familles de produits) aux lignes de production au niveau stratégique. Notons qu'une telle désagrégation couplée avec la notion de capabilité technique, suppose la

définition d'une nouvelle capabilité $CL'_{p,j}$ des lignes de production à produire ou non un produit fini donné. De par ces différents éléments ainsi que les contraintes du niveau stratégique, nous définissons la contrainte d'affectation (4.49) ajoutée au modèle tactique.

$CL'_{p,j}$ Nouvelle capabilité technique valant 1 si la ligne de production $j \in S_1$ a la capabilité de produire le produit fini $p \in P$ et 0 sinon;

$$\varphi_{i,j,p,t} \leq CL'_{p,j} \times C_{i,j}^{\max} \qquad \forall j \in S_1, p \in P, t \in T, (i,j) \in A_1, Succ_{i,j} = 1 \quad (4.49)$$

4.3.2.3. Affectation des produits finis aux hangars de stockage

Une fois les produits finis, ils sont affectés aux lignes de production, il convient aussi de déterminer l'affectation de ces produits aux hangars de stockage, ainsi que le nombre de ces ressources de stockage utilisées. Notons que ces décisions peuvent également être impactées par l'affectation des familles de produits aux hangars de stockage réalisée ainsi au niveau supérieur (stratégique).

Plus précisément, il convient de distinguer deux paramètres, à savoir ceux pour lesquels l'affectation des familles produits aux hangars constitue une décision stratégique et une contrainte au niveau tactique, et ceux pour laquelle la détermination des ressources de stockage utilisées au niveau stratégique est utilisée comme entrée au modèle tactique. En effet, dans les deux cas, la définition de l'affectation et l'utilisation des hangars de stockage constituent une contrainte pour le déploiement du modèle de planification au niveau tactique.

La prise en considération de ces contraintes se fait par le biais du paramètre $affect_{p,j}$ défini ci-dessous représentant la nouvelle affectation des produits finis aux hangars de stockage, ainsi que la nouvelle contrainte (4.50) ajoutée au modèle tactique décrivant cette affectation.

$affect_{p,j}$ Nouvelle affectation des produits finis aux hangars de stockage ;

$$\sum_{t \in T} G_{j,p,t} \leq M \times affect_{p,j} \qquad \forall j \in S_3, p \in P, j \geq 1, j \leq |S| \qquad (4.50)$$

En effet, cette contrainte a pour but d'affecter les produits finis aux différents hangars de stockage en tenant compte des décisions d'affectation déjà prises à la maille familles de produits, ainsi que celles portant sur l'utilisation d'un ou de plusieurs hangars de stockage.

Notons que ces deux contraintes (4.49 - 4.50), sont ajoutées à la formulation mathématique du modèle de planification tactique présenté dans l'Annexe 2, afin de définir le modèle intégré de planification.

Notons qu'au-delà de la planification à moyen terme, cette étape intègre également la notion de boucle de faisabilité entre les deux niveaux tactique-stratégique, ce qui permet de mettre en évidence l'opportunité de modifier une affectation préalablement établie lors de la planification stratégique, ce qui peut être provoqué par une évolution imprévue du marché en général ou pour un segment de produits en particulier.

4.4. Résultats expérimentaux

Cette partie a uniquement pour objet d'illustrer le fonctionnement du processus intégré de planification. Afin de faciliter l'explication des résultats provenant du modèle linéaire, l'exemple industriel de Maroc Phosphore a été considéré.

4.4.1. Présentation

Celui-ci, correspond au système industriel étudié dans la section (§3). Rappelons qu'il s'agit de la chaîne logistique interne de production d'engrais produisant pour le marché local et international 33 qualités d'engrais, celle-ci est constituée de deux usines composées chacune de 3 lignes parallèles de production d'engrais de capacités différentes, d'un ensemble d'hangars de stockage hétérogènes de capacités différentes, dédiés au stockage des produits de grande diversité comme les qualités d'engrais. La mise en stock, le déstockage et le transport de ces qualités d'engrais dans le système se font via un ensemble de convoyeurs à bandes ayant des débits différents. Ensuite, ces qualités d'engrais sont criblés dans des stations de criblage pour avoir la granularité demandée par les clients finaux, ensuite transportés vers les points de distribution représentés ainsi par les quais de chargement pour être livrés aux marchés internationaux.

L'un des objectifs principaux associés à l'intégralité de nos travaux de recherche est l'obtention de modèles et méthodes capables d'adresser des problèmes de taille industrielle. Le MILP relatif à notre environnement intégré de planification n'échappant pas à cette règle, celui-ci a fait l'objet d'un test dans le but d'évaluer sa capacité à résoudre une instance industrielle importante tout en intégrant des contraintes du niveau supérieur de planification, et ceci dans un temps adéquat. Pour le cas d'un portefeuille de produits finis composé de 33 qualités

d'engrais, l'objectif du MILP du modèle intégré, est la réalisation d'une programmation hebdomadaire de la production, le nombre de périodes considérées a été fixé à 12 semaines, ce qui correspond aux carnets de commandes fermes et anticipées suivant les contrats commerciaux avec les clients. Cet horizon est largement supérieur au délai cumulé d'approvisionnement et de production.

Nous testons notre modèle en intégrant les différents coûts présentés avec le modèle tactique en Annexe 2, l'ensemble des capacités du système (de production, de stockage et de transport), inspirés du cas réel, ainsi que la demande des différentes qualités d'engrais exprimée au niveau de chaque quai de chargement. Suite à l'analyse des différents scénarii, le choix s'est porté sur le scénario 3 (SC3) qui vise la maximisation du profit, ce qui correspond à la maximisation du chiffre d'affaires et la minimisation des différents coûts logistiques. Ainsi, pour la suite, les résultats de ce scénario représentent les données en entrée pour le MILP tactique, l'objectif étant de maximiser le profit.

Ce cas numérique vise à valider l'applicabilité du modèle mathématique intégré au niveau tactique proposé et qui reprend les résultats d'affectation proposés au niveau stratégique. Le nombre et le nom des produits associés à chaque famille de produits sont donnés dans le Tableau 4. 11.

Famille de produits	1	2	3	4	5	6
Nombre de produits	4	8	5	4	11	1
Nom du produit	$P_{1..4}$	$P_{5..12}$	$P_{13..17}$	$P_{18..21}$	$P_{22..32}$	P_{33}

Tableau 4. 11- Nombre de produits par famille de produits

4.4.2. Analyse de la résolution du MILP

L'un des éléments les plus importants relatifs à la définition d'un modèle linéaire correspond à son temps de résolution. Celui-ci étant, bien entendu, dépendant du nombre de variables et de contraintes considérées, caractérise sa capacité à résoudre des instances de plus ou moins grandes tailles. Suite à l'exécution du modèle de planification intégré au niveau tactique, en ajoutant les différents paramètres décrits auparavant, et dans le but de ne pas aboutir à des durées d'exécution trop importantes, la résolution a été interrompue au bout de deux heures de temps de calcul, celle-ci se situant à 0,50% de la borne inférieure déterminée par

Cplex. L'instance du modèle linéaire ainsi définie a été résolue à l'aide du solveur ILOG CPLEX Optimization Studio V12.7.0, pour un horizon de 12 semaines. Les calculs ont été réalisés sous Windows Derver 2016 Standard avec processeur Intel® Xeon® avec 3.20 GHz avec 256Go RAM. Pour le résultat obtenu ont été sauvegardés, respectivement, la durée nécessaire à l'obtention d'une première solution réalisable ainsi que l'écart entre la meilleure obtenue au bout de deux heures de temps de calcul et la borne inférieure déterminée par le solveur. Notons que cette dernière correspond à la valeur d'une solution relaxée, c'est-à-dire ne satisfaisant pas l'ensemble des contraintes considérées. Aussi, elle constitue une borne à priori inatteignable par une solution entière. Notons que cette dernière correspond à la valeur d'une solution relaxée, c'est-à-dire ne satisfaisant pas l'ensemble des contraintes considérées. Aussi, elle constitue une borne à priori inatteignable par une solution entière. Cependant, elle présente l'avantage de donner une estimation fiable de la qualité des résultats obtenus. Ce modèle tenant compte en entrée des demandes initiales, des différents coûts et des différentes capacités, fournit une solution qui décide des quantités à produire et de leurs affectations.

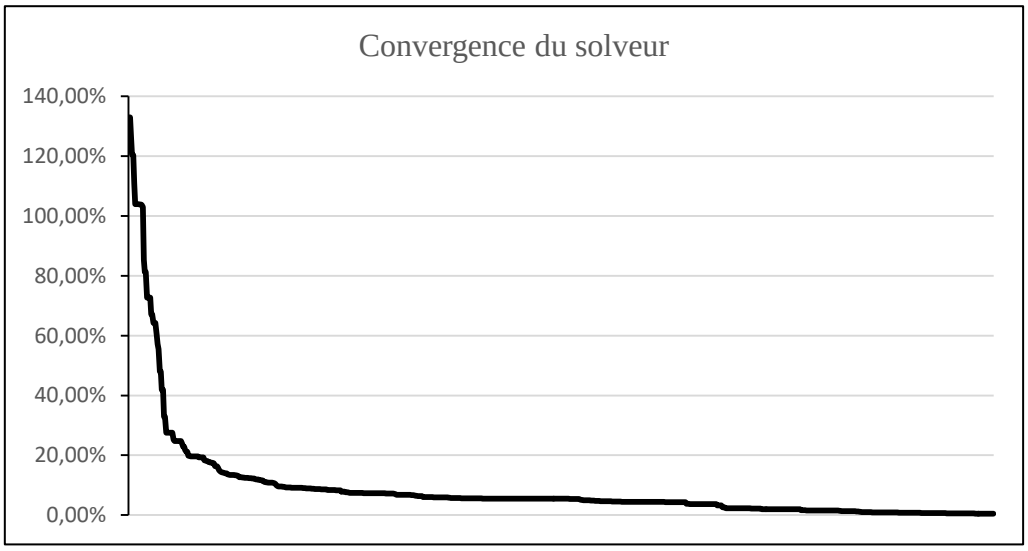


Figure 4. 23- Comportement du solveur lors de la résolution du MILP

De par l'étude des différents éléments fournis par le solveur et comme le montre la Figure 4. 23, nous pouvons constater que, comme attendu, la résolution ne s'est pas effectuée d'une manière linéaire. Ainsi, lors de la résolution, comme indiqué sur le Tableau 4. 12, la première solution réalisable a été obtenue au bout de 12s. Celle-ci, se situant à environ 132,95% de la solution optimale a été rapidement améliorée à 7,36% après 606s (environ 10 minutes) avant de stagner (gain de seulement 5,80% en 2994 secondes soit en 49 minutes et 54 secondes et un gain de 6,86% en 1 heure 49 minutes et 54 secondes). Ces temps d'exécution et la qualité des

résultats montrent que le modèle proposé peut être utilisé dans un contexte industriel lors du processus décisionnel dans le cadre de la planification tactique. En effet, il peut être exécuté avec un temps de résolution de 10 minutes pour tester différents scénarii et hypothèses et ensuite il cherche la meilleure solution possible avec un temps de résolution plus important.

Temps d'exécution (s)	Ecart estimé avec la solution optimale (%)
12	132,95%
98	72,73%
118	41,86%
136	27,40%
202	18,85%
360	13,40%
440	12,59%
522	9,17%
606	7,36%
3600	1,56%
7200	0,50%

Tableau 4. 12- Temps associés à la résolution du modèle linéaire

4.4.3. Exploitation des résultats

L'analyse des résultats du PDP montre que la demande des différents produits finis est satisfaite avec un taux moyen de 98,31%. Sur la Figure 4. 24 peuvent être consultés les taux de satisfaction de la demande par quai de chargement lors du PDP.

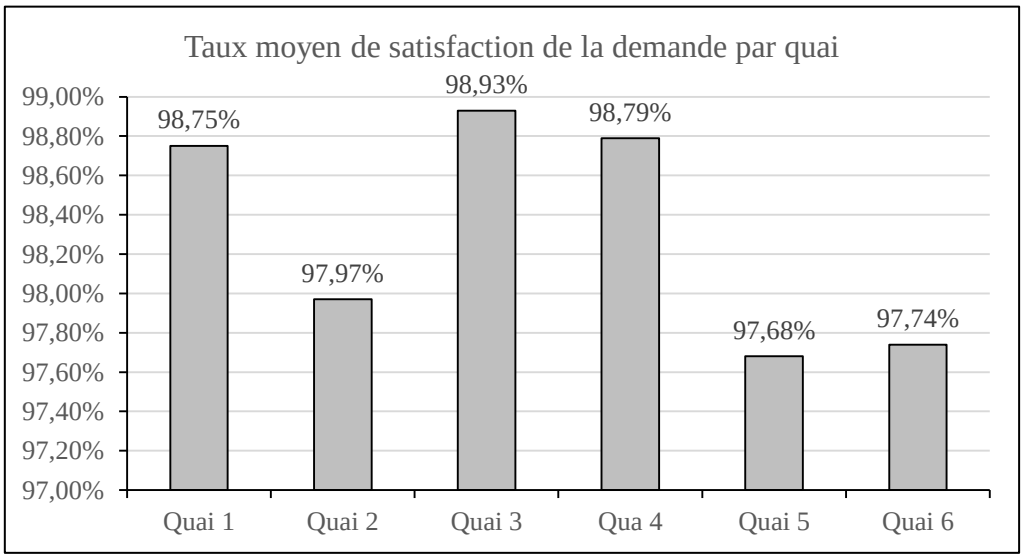


Figure 4. 24- Taux moyen de satisfaction de la demande par quai de chargement

Rappelons que le scénario SC3 du PIC avait un TSD moyen de 97,24% sur tout l'horizon de 12 mois. Concernant l'horizon de 3 mois ce qui correspond à la portée du plan tactique (12 semaines) ce taux est de 99,99%. On peut se poser la question de savoir quelle est la raison pour cette différence entre le PIC et le PDP. Afin de répondre à cette question, l'analyse de l'utilisation de la capacité et de la répartition de la demande s'impose.

Le premier point qui mérite une analyse est l'utilisation de la capacité du scénario SC3 du PIC. Afin de mieux appréhender ce point, considérons le graphique de la Figure 4. 25 qui illustre la capacité utilisée pour la production. On peut observer, compte tenu de fonction objectif que la capacité pendant les trois périodes (mois) n'est pas utilisée complètement avec un taux moyen d'utilisation de 97,89% sur l'horizon de planification. Sur la Figure 4. 26 peut être consulté le taux d'utilisation des différentes lignes de production. Ainsi, on peut constater qu'il existe suffisamment de capacité pour produire la demande lors de la planification tactique. Il reste 2,48% de capacité non utilisée. En d'autres termes, les décisions prises au cours du processus de planification stratégique autorisent une réserve de capacité (flexibilité volume) dans le but d'ajuster rapidement le volume de production à la demande réelle.

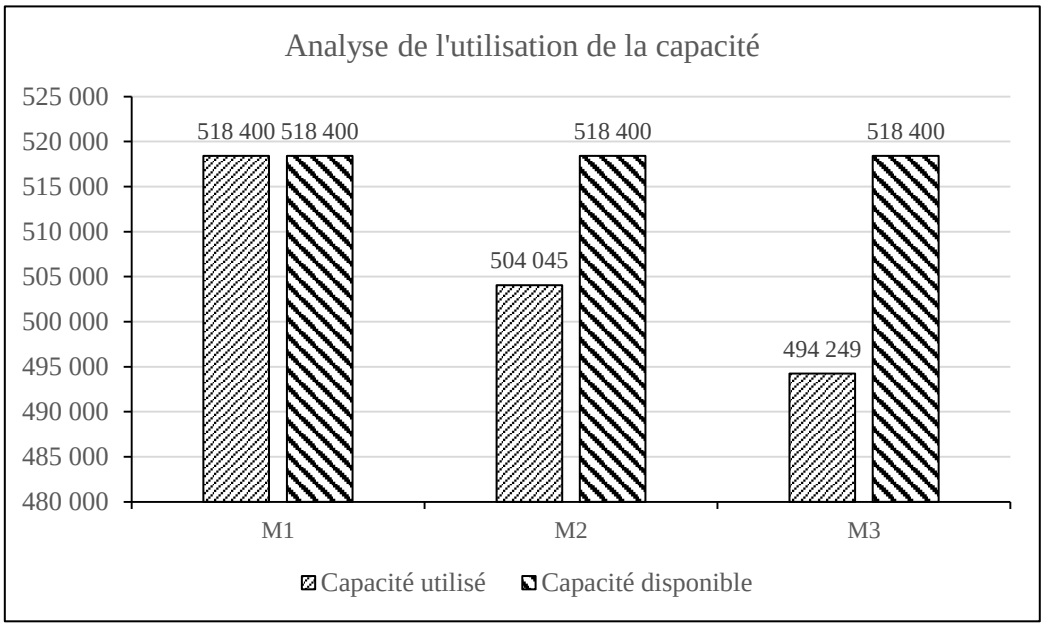


Figure 4. 25- Résultats du scénario SC3 du PIC de l'utilisation de la capacité

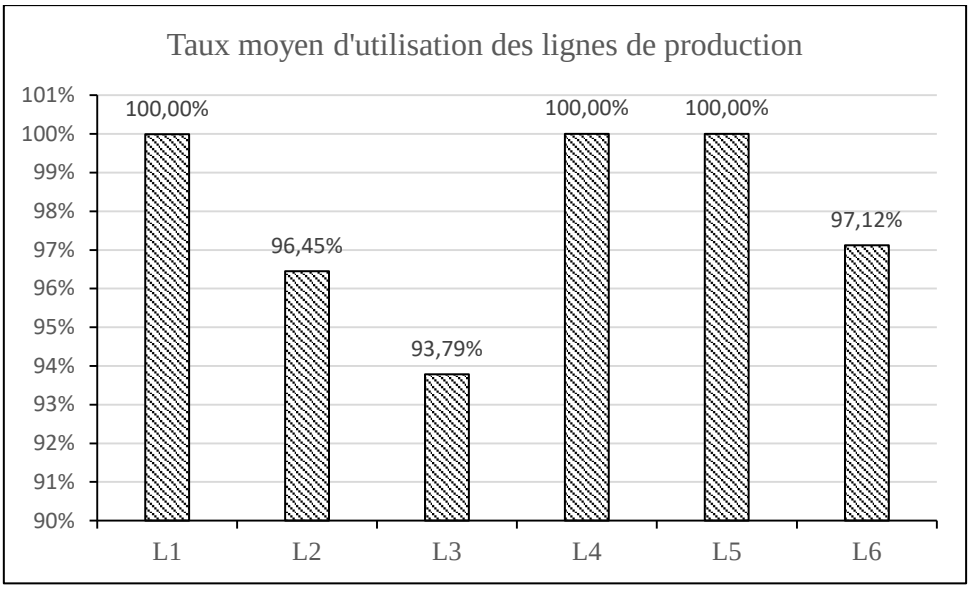


Figure 4. 26- Résultats du scénario SC3 du PIC : taux moyen d'utilisation de chaque ligne de production sur l'horizon de 3 mois

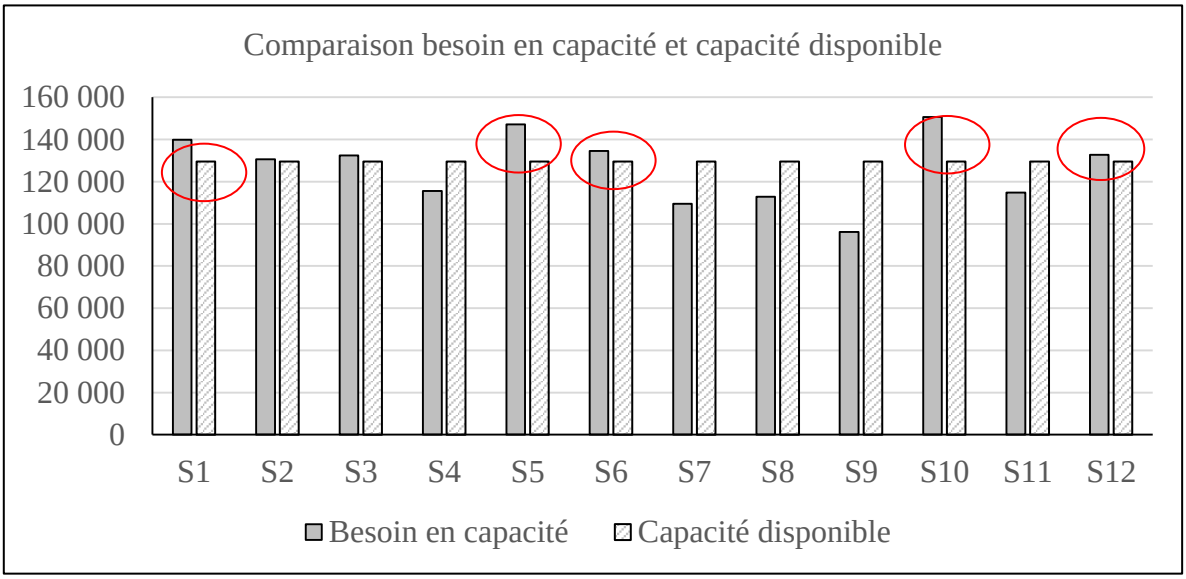


Figure 4. 27- Analyse du besoin en capacité et de la capacité disponible

Cependant, lors de la désagrégation des résultats du plan stratégique, apparaissent des problèmes. Avant de s'intéresser à la Figure 4. 27 donnant l'illustration de la comparaison entre le besoin en capacité et la capacité disponible, il convient de revenir sur la première période de la Figure 4. 25. En effet, comme indiqué lors de cette période (mois M1) la capacité est suffisante pour satisfaire la demande. Cependant, comme le montre la Figure 4. 27 à cause de l'application des coefficients de désagrégation (cf. § 4.3.2.1) lors de la première semaine S1 le besoin en capacité est supérieur à la capacité disponible. Ce constat est également valable pour les semaines S5, S6, S10 et S12. À travers l'analyse de cette figure, nous pouvons remarquer que le besoin en capacité supérieur à la capacité disponible apparaît souvent la première ou la

deuxième semaine du mois. Cette répartition de la demande explique le plus faible TSD lors de la planification tactique.

Les résultats de la planification sont donnés par la Figure 4. 28. On peut mettre en évidence l'anticipation et la création du stock pour faire face au déséquilibre capacitaire pour les périodes S4, S5, S6, S7, S8, S9 et S11. À travers l'analyse, nous pouvons constater qu'il y du stock pendant des périodes de déséquilibre capacitaire tels que les périodes S5 et S6. Le choix fait par le solveur est de générer du stock pour satisfaire la demande plus tard en périodes S6, S7 et S8, plutôt que de satisfaire la demande en périodes S5. Ce choix fait par la solution quasi optimale (gap de 0,5%) peut s'expliquer avec la fonction objectif. Plus précisément, la programmation de la production est toujours mise en œuvre avec pour seul objectif de planifier la production de la demande dans le but de maximiser les profits. Ainsi, en fonction des coûts et des prix de vente des produits, il s'avère qu'il est plus intéressant de ne pas satisfaire complètement la demande avec une perte de 1,69% de TSD moyen (98,31% contre 100%) pour augmenter le profit.

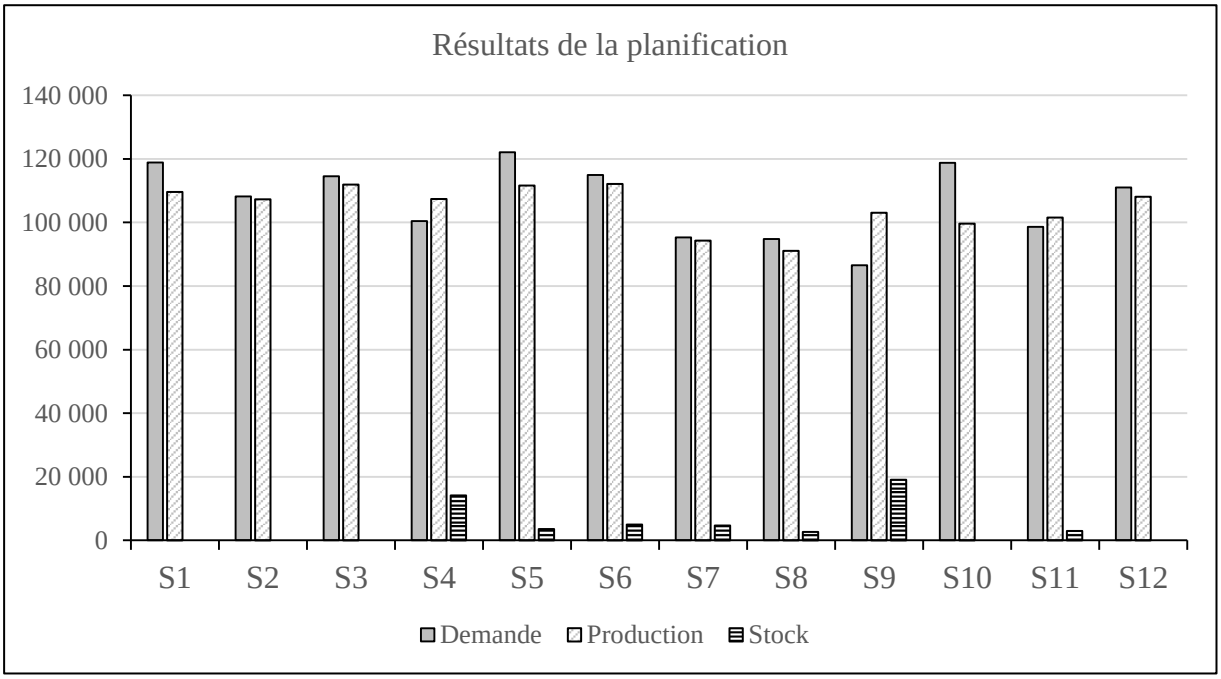


Figure 4. 28- Résulats de la planification

Ce choix est arbitraire et il est fait lors du processus décisionnel de planification. À titre d'exemple, un scénario possible est de maximiser le TSD en fonction des résultats du PIC. En d'autres termes, sans considérer les différents coûts, l'objectif est de satisfaire les décisions du PIC au maximum. Ce scénario pour lequel les résultats ne sont pas présentés a obtenu une solution avec un TSD moyen de 99,87%. Il est considéré comme référence sur le TSD compte

tenu de la répartition de la demande hebdomadaire. Les déséquilibres de la charge et la capacité observés pendant les périodes mentionnées empêchent la satisfaction de la demande totale.

D'autre part, l'analyse de l'utilisation de la capacité au cours de la planification tactique montre que celle-ci est utilisée en moyenne à 95%, rappelons que lors du PIC le taux moyen d'utilisation était de 97,89%. Comme le montre la Figure 4. 29, il n'y a aucune ligne de production utilisée à 100%. La Figure 4. 30 présente le taux hebdomadaire d'utilisation de la ligne 2. L'analyse des deux Figure 4. 30 et Figure 4. 29 met en évidence que le taux moyen d'utilisation de la ligne 2 de 94% est dû au fait qu'il existe des périodes de satisfaction totale de la demande en fin d'horizon. D'autre part, cette réserve de capacité lors de planification tactique permet de respecter la décision du PIC de garder une capacité disponible (flexibilité volume) et ainsi faire face aux changements du marché. Rappelons que la planification tactique se fait sur un horizon glissant et elle est revue à chaque période.

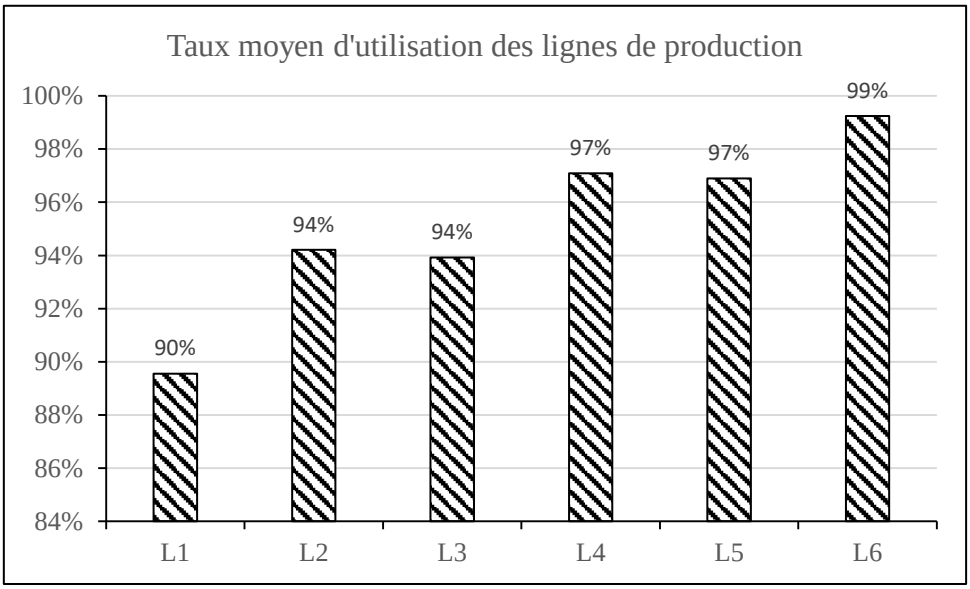


Figure 4. 29- Résultats de la planification tactique : taux moyen d'utilisation des lignes de production sur l'horizon de 12 semaines

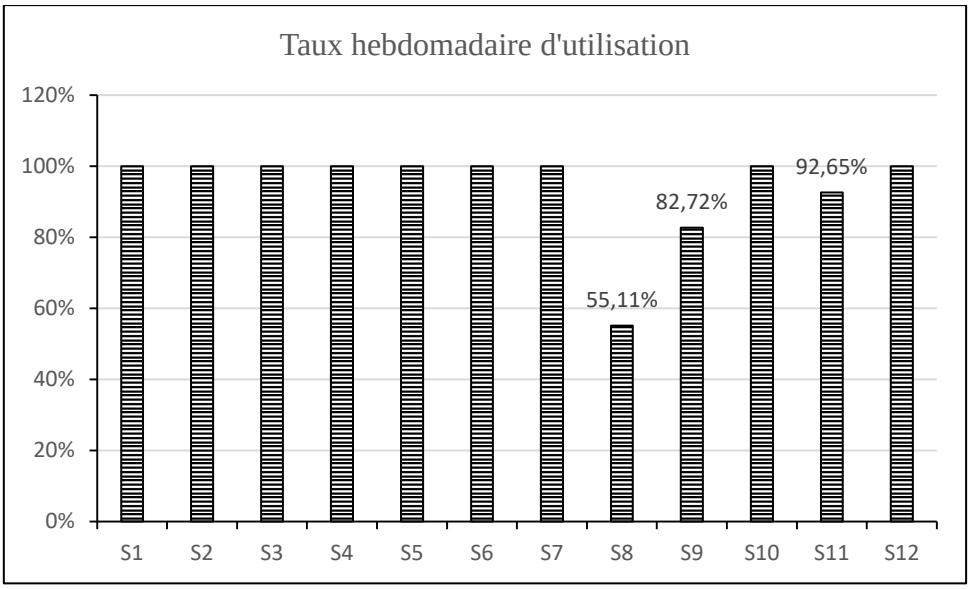


Figure 4. 30- Taux d'utisation de la ligne 2 sur l'horizon de planification

L'étape de planification tactique consiste, comme illustré au sein de cette partie, à réaliser le plan tactique de l'ensemble du système en s'appuyant sur le processus intégré. Plus précisément, il s'agit de déterminer les quantités de chaque produit fini à fabriquer sur chaque ligne de production lors de chaque période et, ceci, en tenant compte des affectations déterminées au niveau stratégique, ainsi que du déploiement capacitaire réalisé (constituant le PIC). Notons, qu'au-delà de la planification de la production moyen-terme, cette phase intègre également la notion de boucle de faisabilité tactique-stratégique. À la fin du processus décisionnel les résultats obtenus sur l'horizon de planification sont les suivants :

- *le plan de production par produit* : à titre d'exemple la Figure 4. 31 et la Figure 4. 32 illustrent respectivement la demande et la production du produit 1 et le plan de production par ligne sur l'horizon de planification ;
- *le plan de production et le plan de capacité par ligne* : à titre d'exemple ces plans peuvent être consultés pour la ligne 1 sur la Figure 4. 33 et la Figure 4. 34 ;
- *le plan de stock par produit* : compte tenu de la fonction objectif, le stock et très faible. La Figure 4. 35 présente le stock de plusieurs produits ;
- *le plan tactique de vente par produit* : compte tenu du fait que la quantité de production du produit 1 correspond exactement à la demande, le plan de production représente également le plan de vente. Le produit 1 n'a pas de stock d'anticipation au cours de l'horizon de planification ;
- *le disponible à promettre par produit et par quai* : la Figure 4. 36 illustre le disponible à promettre du produit 1 au quai 1 ;

En compléments de ces plans, sont évidemment déterminés le plan de besoins en matières, le besoin en fond de roulement et le plan des besoins de distribution.

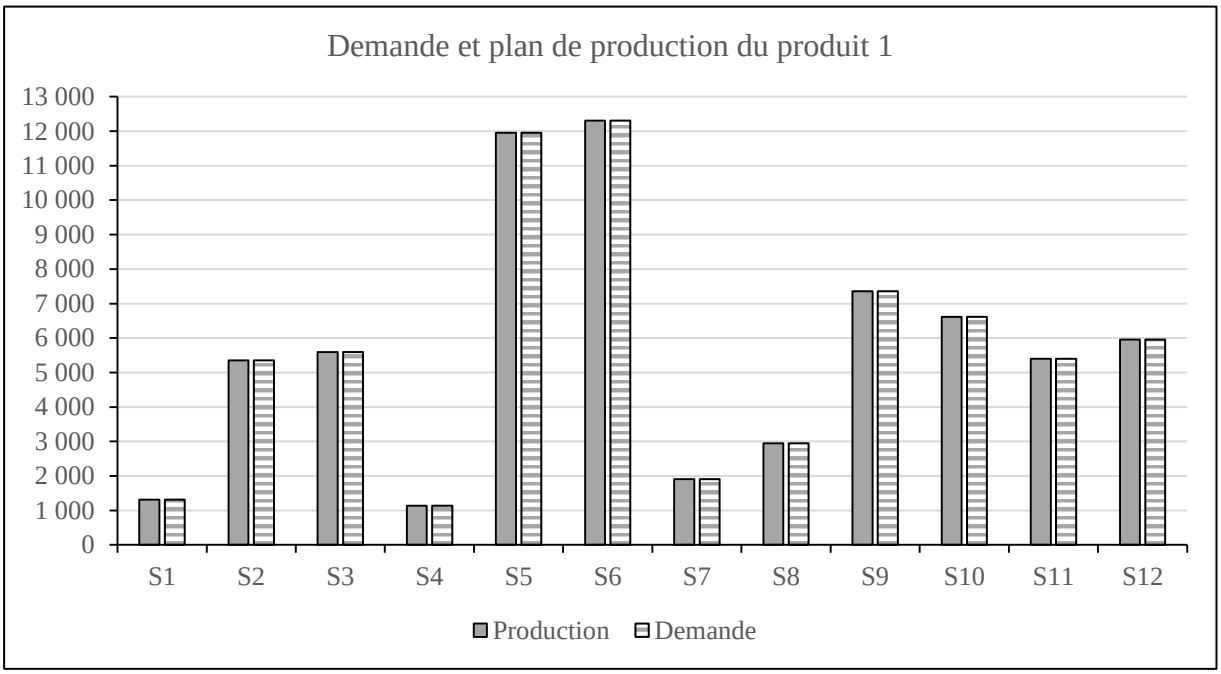


Figure 4. 31- Comparaison de la demande et le plan de production du produit 1

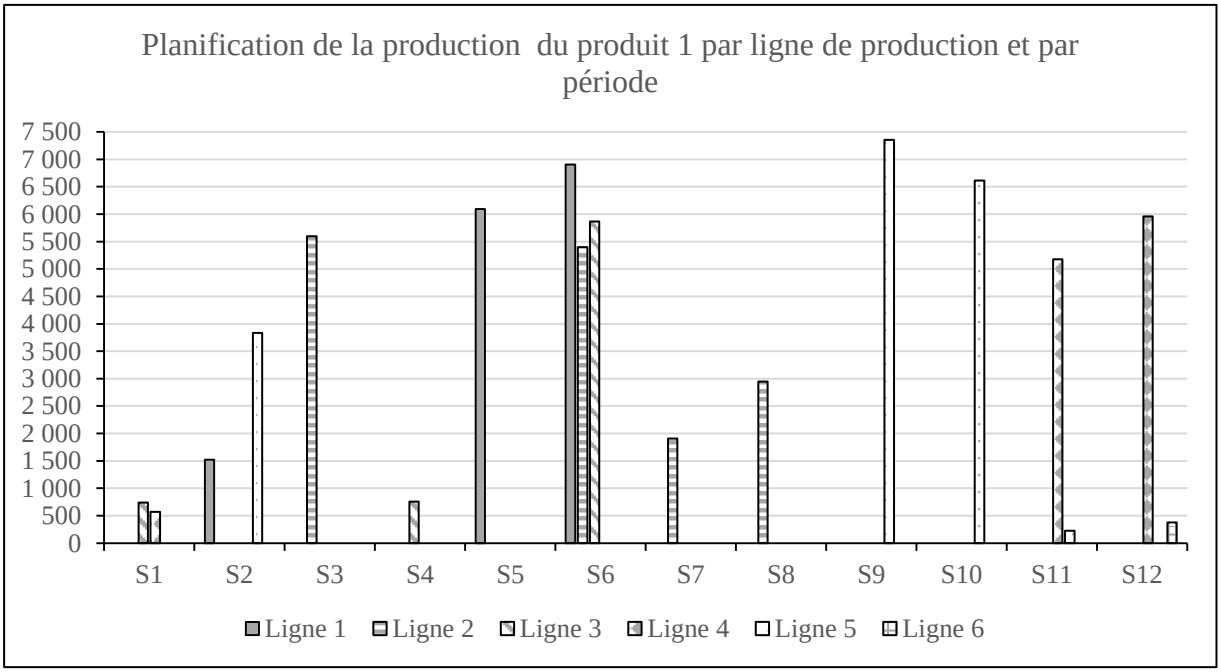


Figure 4. 32- Plan de production par ligne du produit 1

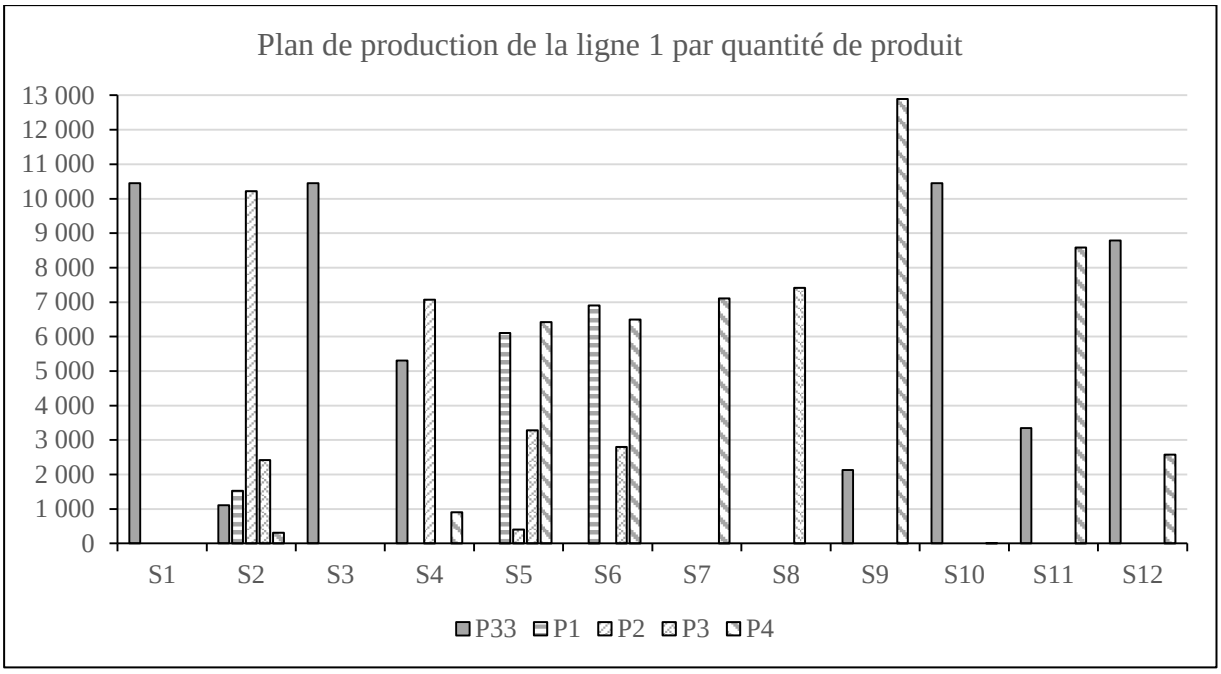


Figure 4. 33- Plan de production de la ligne 1 par quantité de produit

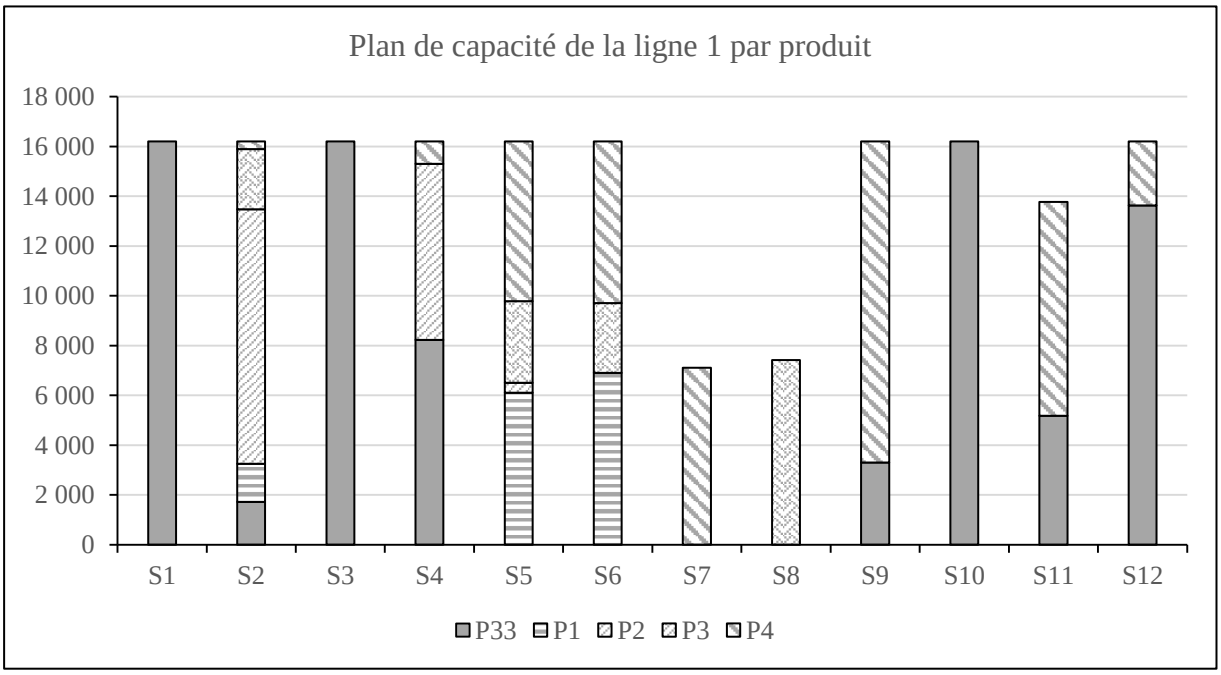


Figure 4. 34- Plan de capacité de la ligne 1 par produit

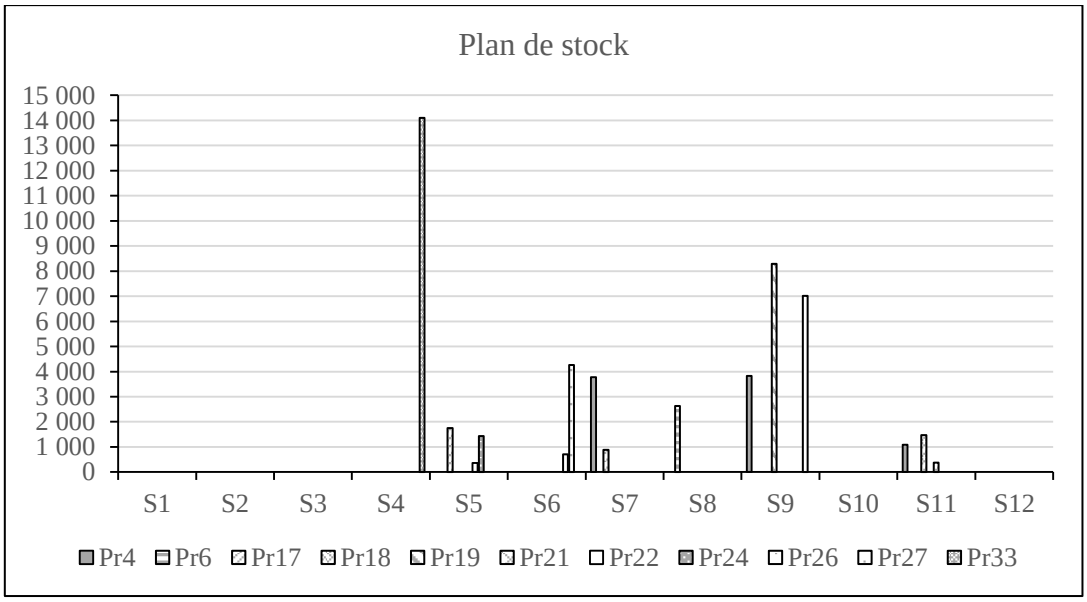


Figure 4. 35- Plan de stock au cours de l'horizon de planification

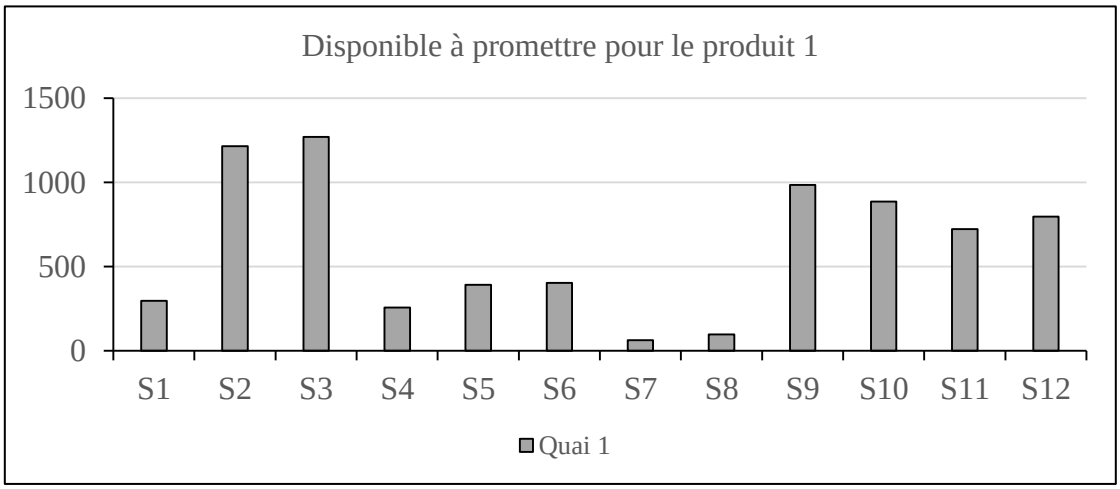


Figure 4. 36- Le disponible à promettre pour le produit 1 au quai 1

L'étape de planification tactique consiste, comme illustré au sein de cette section, à réaliser la majeure partie du Programme Directeur de Production (PDP). Plus précisément, il s'agit de déterminer les quantités de chaque produit fini à fabriquer sur chaque ligne de production et à stocker dans chaque hangar de stockage lors de chaque période et, ceci, en tenant compte des affectations déterminées au niveau stratégique ainsi. Notons, qu'au-delà de la planification de la production moyen-terme, cette phase intègre également la notion de boucle de faisabilité tactique-stratégique. En effet, la modélisation sous la forme d'un graphe multi-flot adoptée permet de mettre en évidence l'opportunité de modifier une affectation préalablement établie lors de la planification stratégique. Ceci peut, par exemple, être provoqué par une évolution imprévisible du marché. En effet, l'objectif de cette étape tactique est de cadrer et de préparer la planification opérationnelle en déterminant les quantités prévisionnelles

de chaque produit fini circulant dans le graphe de flot. Ainsi en ajoutant des contraintes plus fines sur l'opération de stockage, nous définissons la planification opérationnelle, tout en considérant le niveau réel de la demande.

5. Modèle mathématique de planification opérationnelle

5.1. Introduction

Après avoir présenté les deux modèles de planification stratégique et tactique, ainsi que leur environnement intégré dans les sections précédentes, cette partie est dédiée à la présentation d'un modèle de planification à court terme. La modélisation adoptée est dérivée de celle introduite au sein des sections (§2, §3 et §4) de ce même chapitre, l'objectif étant d'utiliser le même formalisme mathématique. Ainsi, le modèle mathématique est présenté aussi sous la forme d'un graphe de flot.

A ce niveau de modélisation le modèle opérationnel considère le couple (produits finis, demande journalière) et prend de manière exhaustive les différentes contraintes opérationnelles. À ce niveau de détail, chaque hangar de stockage s'organise sous forme de séparations banalisées dites « arches» comme illustré dans la Figure 4.37. Chaque hangar de stockage des produits finis en un ensemble de *n* espaces de stockage appelés arches de stockage ($a_1, a_2, \ldots a_n$). Chaque arche de stockage ne peut comporter qu'un seul produit fini à chaque période de l'horizon de planification et ceci pour éviter toute contamination.

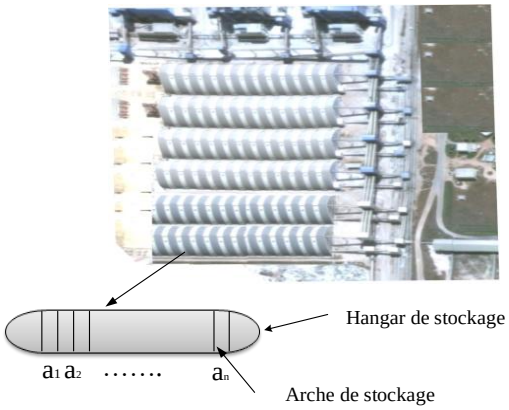


Figure 4. 37- Arches de stockage constituant le hangar de stockage

Chaque hangar de stockage est constitué d'un nombre limité d'arche de stockage, ainsi dans le système industriel étudié, nous considérons 7 hangars de stockage de 12 arches de

stockage et 2 hangars de stockage de 24 arches de stockage. De plus, toutes les arches de stockage ont une capacité maximale de stockage de 4166 tonnes.

Les flux de produits en vrac sont stockés cette fois-ci dans les arches de stockage. Ainsi, chaque arche de stockage ne peut contenir qu'un produit à la fois, mais avec une affectation dynamique aux produits finis à stocker. Dans ces arches de stockage, vu la nature chimique du produit fini, la réaction entre les composants chimiques se poursuit et pour atteindre l'étape finale de cette réaction et répondre à la fois aux spécifications commerciales et aux contraintes technologiques, un temps de stockage est imposé au produit, connu par la durée de mûrissement. Chaque arche de stockage est dédiée à un produit donné, cette spécification est nécessaire pour éviter le mélange de produits appelé "produit déclassé", autrement dit, le risque de contamination des produits étant donné que les produits n'ont pas la même nature. Plusieurs sources de ce produit déclassé sont représentées dans la Figure 4. 38. Ce mélange de produits n'influe pas seulement sur la qualité physique mais aussi sur la qualité chimique à savoir les jours de mûrissement correspondants. Pour éviter ce risque, pour le même produit, la première quantité entrée en arche de stockage stock sera aussi la première à être consommée. La consommation des arches de stockage, se fait donc dans la séquence d'arrivée des quantités. La quantité suivante ne sera entamée qu'après épuisement de la quantité précédente, afin de respecter la durée de mûrissement du produit selon la date de son arrivé à l'arche de stockage. La demande journalière des produits finis est exprimée au niveau des nœuds représentant les points de distribution (quais de chargement). Elle doit être totalement satisfaite tout en définissant la durée de chargement pour chaque produit fini au niveau de chaque quai de chargement et à chaque période de l'horizon de planification. Cette durée de chargement varie en fonction de la date de début de chargement et la quantité à charger, et peut influencer sur le taux de satisfaction de la demande au niveau de chaque quai de chargement.

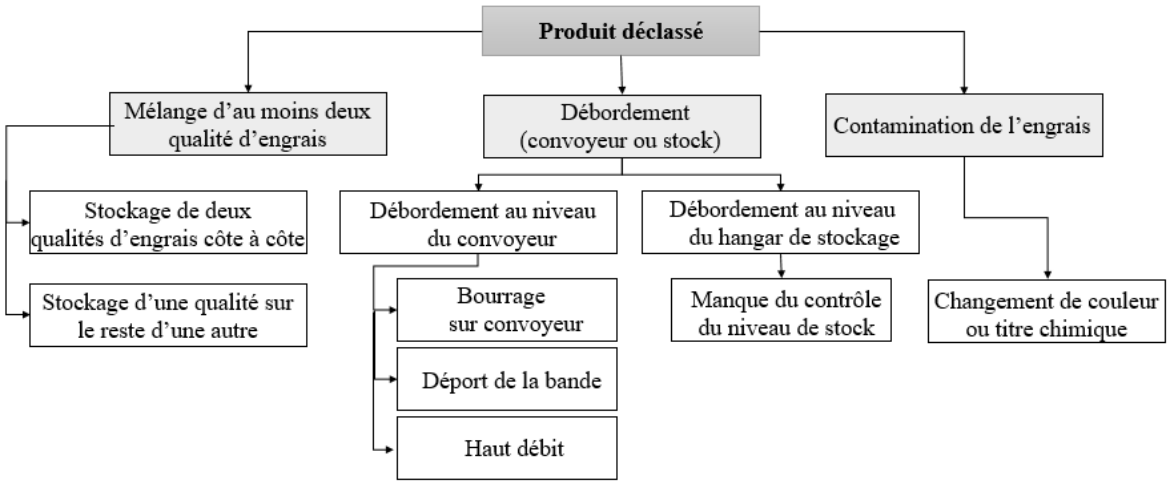


Figure 4. 38- Sources d'un produit déclassé

Ainsi, la Figure 4.39 décrit la logique d'affectation des produits finis aux arches de stockage en respectant cette contrainte de durée minimale de séjours.

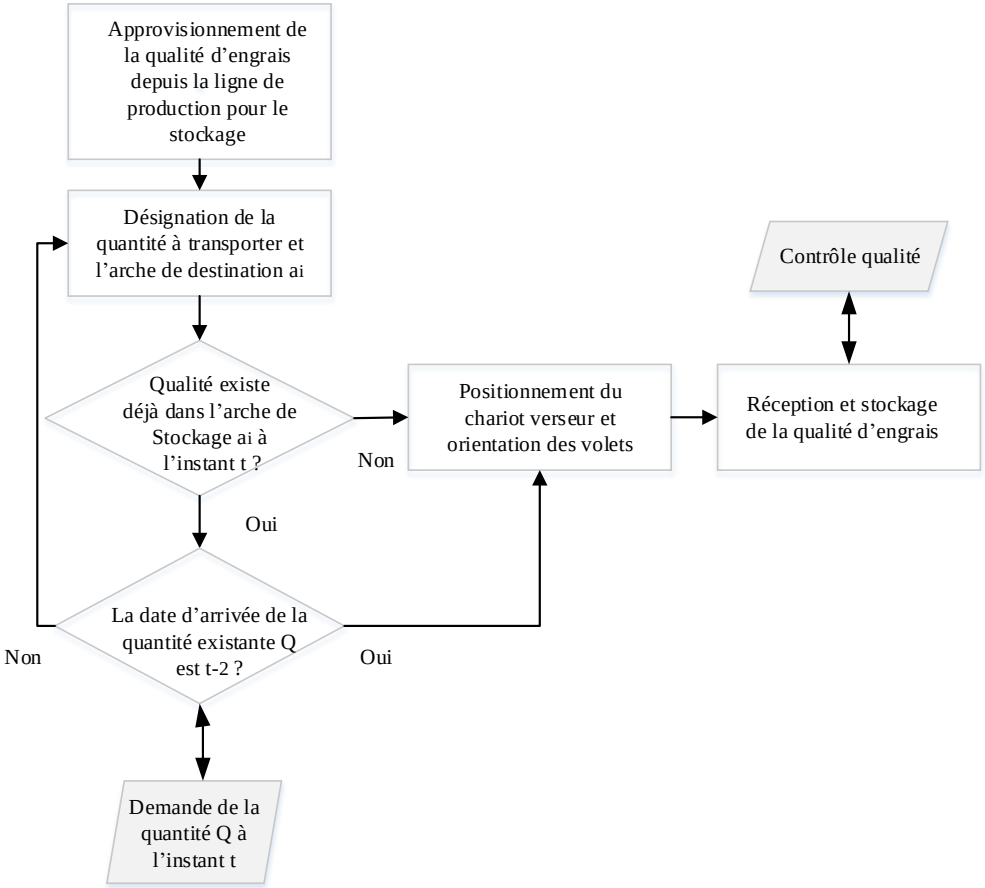


Figure 4. 39- Logique d'affectation des arches en respectant la durée minimale de stockage

L'objectif du graphe de flots étant de trouver la meilleure configuration permettant de faire circuler la quantité du flot qui maximise la satisfaction de la demande et qui minimise le stock.

Après avoir modélisé et décrit le problème, il est désormais possible de présenter le MILP ainsi construit. Pour faciliter sa présentation, il convient d'introduire maintenant les différentes notations utilisées. Ainsi, nous présentons dans ce qui suit les différentes notations et paramètres, le modèle linéaire et ses contraintes.

5.2. Notations

Dans cette partie, nous allons expliciter la modélisation mathématique du problème de planification opérationnelle, à partir du modèle de connaissances détaillé et présenté dans le chapitre 3. Uniquement les notations complémentaires par rapport aux modèles stratégiques et tactiques sont présentées par suite.

5.2.1. Ensembles

Les premières notations sont relatives aux ensembles et indices qui facilitent la compréhension des autres notations. Les ensembles du modèle sont introduites comme suit :

Ensembles :

S_3 Ensemble de nœuds modélisant les hangars de stockage;

Ar Ensemble des arches de stockage $Ar \subset S_3$;

A' Ensemble des arcs $(i, a_i; j, a_j)$ allant du nœud (i, a_i) au nœud (j, a_j). Notons que $\forall i \in S/S_3, a_i = 1$;

Indices :

a Indice de l'arche de stockage $a \in Ar$;

5.2.2. Paramètres

Les paramètres sont relatifs aux différents éléments du système étudié (demande, configuration initiale…). Ainsi, nous définissions :

$C_{i,j}^{\max}$ Capacité maximale journalière (tonnes) pouvant transiter par l'arc $(i, j) \in A$;

$D_{p,q,t}$ Demande journalière au quai de chargement $q \in S_5$ en produits finis $p \in P$ à la période $t \in T$;

$Ar_{i,a}^{\max}$	Capacité maximale de stockage offerte par l'arche de stockage $a \in Ar$ appartenant au hangar de stockage $i \in S_3$;
$Ar_{i,a}^{init}$	Stock initial dans l'arche de stockage $a \in Ar$ appartenant au hangar de stockage $i \in S_3$;
Dch_q	La période du début de chargement d'un produit donnée dans le quai de chargement $q \in S_5$;
NAr_j	Nombre d'arches de stockage dans chaque hangar de stockage $j \in S_3$;
NF_p	La famille associée au produit fini $p \in P$;

5.2.3. Variables

La planification de la production, du stockage et d'expédition des produits finis étudiés à court terme, se traduit par l'affectation de ces produits finis aux lignes de production, aux arches de stockage, la sélection des quais de chargement pour la distribution, et l'identification de convoyeurs de transport pour l'allocation des flux entre les différents nœuds du réseau. Ces affectations se font via un ensemble de variables de décision.

Variables:

$\varphi_{i,a_i,j,a_j,p,t}$	Flot pouvant circuler dans l'arc $(i,a_i;j,a_j) \in A'$ du produit fini $p \in P$ à la période $t \in T$;
$I_{i,a,p,t}$	Quantité stockée dans l'arche $a \in Ar$ appartenant au hangar $i \in S_3$, du produit fini $p \in P$ à la période $t \in T$;
$\omega_{p,q,t}$	Taux de satisfaction de la demande du quai de chargement $q \in S_5$ du produit fini $p \in P$ à la période $t \in T$;
$K_{p,q,s,t}$	Quantité du produit $p \in P$ chargée à partir de la période $s \in T$ au niveau du quai $q \in S_5$ pour satisfaire la demande à la période $t \in T$;

Variables binaires :

$Q_{j,a,p,t}$	Variable binaire valant 1 si le produit fini $p \in P$ est stocké dans l'arche de stockage $a \in Ar$ appartenant au hangar de stockage $j \in S_3$ à la période $t \in T$, 0 sinon ;

5.3. Contraintes

Comme mentionné ci-dessus, il s'avère que le processus de fabrication, de stockage, de transport et d'expédition des produits finis en vrac est très complexe, impliquant une grande variété de produits finis, un grand nombre de routage, de multiples contraintes liées aux différentes ressources, et une pénalité élevée en cas de retards de livraison. Ces caractéristiques rendent la planification à court terme, au sein de cet environnement complexe, très difficile.

Dans cette partie nous nous intéressons à la modélisation des différentes contraintes du problème.

5.3.1. Contraintes de satisfaction de la demande

Les contraintes (4.51 - 4.54) définissent la satisfaction de la demande globale au niveau de tous les quais de chargement et sur tout l'horizon de planification. Ainsi cette demande est définie par l'ensemble de flots (quantités produites) arrivant au nœud puits. Toute ou une partie de la demande est satisfaite, tout en définissant la durée de chargement pour chaque produit fini au niveau de chaque quai de chargement sur l'ensemble de l'horizon de planification. La variable $\omega_{p,q,t}$ représente le taux de satisfaction de la demande, sa liaison avec la demande est définie par la contrainte (4.51). Ainsi les contraintes (4.52) et (4.53) permettent de déterminer la période de fin de chargement en fonction de la période de début de chargement et la durée de chargement de chaque produit fini au niveau de chaque quai de chargement. La contrainte (4.52) définit la quantité chargée à la période $t \in T$, cette quantité est égale à la demande satisfaite du produit $p \in P$ au niveau du quai $q \in S_5$ à la période $t \in T$. Le début de chargement étant la période $s \in T / s \leq t$. La contrainte (4.53) vérifie que la somme des flots qui entre en quai à la période $t \in T$ est égale à la somme des quantités arrivant au quai dans les périodes $s \in T / s \geq t$. Ainsi, sur tout l'horizon T, la production totale de chaque produit fini ne doit pas excéder la demande totale de ce produit (4.54).

$$\omega_{p,q,t} \geq 1 - D_{p,q,t} \qquad \forall p \in P, q \in S_5, t \in T \qquad (4.51)$$

$$\sum_{s \in T | s \geq 1, s \geq t - Dch_q, s \leq t} K_{p,q,s,t} = \omega_{p,q,t} \times D_{p,q,t} \qquad \forall p \in P, q \in S_5, t \in T \qquad (4.52)$$

$$\sum_{i \in S, a_i \in Ar, a_j \in Ar | succ_{i,j} = 1, a_i \leq NAr_i, a_j \leq NAr_j} \varphi_{i,a_i,j,a_j,p,t} = \sum_{s \in T | s \geq t} K_{p,q,t,s} \quad \forall p \in P; j, q \in S_5, t \in T \qquad (4.53)$$

$$\sum_{j \in S_1, (i,j) \in A_1, a_j, a_i \in Ar, t \in T | Succ_{i,j} = 1, a_j \leq NAr_j} \varphi_{i,a_i,j,a_j,p,t} \leq \sum_{q \in S_5, t \in T} D_{p,q,t} \quad \forall p \in P \qquad (4.54)$$

5.3.2. Contraintes de durée minimale de séjour dans les espaces de stockage

Les contraintes (4.55) décrivent le temps minimum de séjour des produits finis dans les arches de stockage. Ainsi, vu la composition chimique du produit fini et pour répondre à la fois aux exigences commerciales, un temps de stockage dans l'arche de stockage estimé à deux jours

est imposé au produit pour sa stabilisation et son équilibre avant son déstockage. Ainsi, le produit qui entre à la période $t \in T$ reste en stock jusqu'au la période $t+2$. En effet le flot $\varphi_{j,a_j,k,a_k,p,t'+2}$ qui sort du nœud et qui modélise l'arche doit être égal ou inférieur au stock initial $I_{j,a_j,p,t=0}$ plus la somme des flots $\varphi_{i,a_i,j,a_j,p,s}$ qui entre en stock à la période $s \le t'$ plus la somme des flots $\varphi_{j,a_j,k,a_k,p,s}$ qui sort de l'arche de stockage à la période $s \le t'+1$.

Tandis que la contrainte (4.56) permet d'interdire le mélange de deux lots (quantités) du même produit fini arrivant dans une arche de stockage dans deux périodes successives, et ceci afin de respecter la durée minimale de stockage du produit selon la date de son arrivé à l'arche de stockage. Ainsi, si le produit fini existe dans l'arche de stockage à la période $t'-1 \in T$ et qui va sortir de cette arche à la période $t'+1 \in T$ (après sa stabilisation), il est interdit de mettre dans cette arche de stockage le même produit à la période $t' \in T$ afin d'éviter son mélange avec la première quantité et par conséquence sa sortie à la période $t'+1 \in T$ avant sa durée minimale de stockage.

$$\forall j \in S_3, a_j \in Ar, p \in P, t, t' \in T, t' = t-2, a_j \le NAr_j, j \ge 1, j \le |S|$$
$$\sum_{k \in S, a_k \in Ar | succ_{j,k}=1, a_k \le NAr_k} \varphi_{j,a_j,k,a_k,p,t'+2} \le I_{j,a_j,p,t=0} + \sum_{s \in T, i \in S, a_i \in Ar | s \le t', succ_{i,j}=1, a_i \le NAr_i} \varphi_{i,a_i,j,a_j,p,s}$$
$$- \sum_{s \in T, k \in S, a_k \in Ar | s \le t'+1, s \ge 1, succ_{j,k}=1, a_k \le NAr_k} \varphi_{j,a_j,k,a_k,p,s} \tag{4.55}$$

$$\forall j \in S_3, a_j \in Ar, p \in P, t, t' \in T, t' = t-1, a_j \le NAr_j, j \ge 1, j \le |S|$$
$$\sum_{i \in S, a_i \in Ar, p \in P | a_i \le NAr_i, succ_{i,j}=1} \varphi_{i,a_i,j,a_j p,t'} \le M \times (1 - \sum_{p \in P} Q_{j,a_j,p,t'-1}) \tag{4.56}$$

5.3.3. Contraintes de configuration initiale des arches de stockage

Les deux contraintes (4.57) et (4.58) décrivent la configuration initiale des espaces de stockage. La contrainte (4.57) consiste à déterminer la quantité initiale stockée dans les arches de stockage pour un produit fini donné. Cette quantité du stock initial est définie par le minimum entre la capacité offerte de l'arche et la demande des deux premières périodes de l'horizon, si ce produit fini existe dans l'arche $a_j \in Ar$ appartenant au hangar $j \in S_3$ dans ces deux premières périodes. Sinon la quantité du stock initial de cette arche est nulle (4.58). Les deux contraintes suivantes (4.59) et (4.60) stipulent que la production et la mise en stocks des produits finis dans les deux premières périodes de l'horizon de planification sont nulles.

Finalement la contrainte (4.61) formule que la somme des flots sortant de l'arche de stockage $a_j \in Ar$ dans les deux premières périodes de l'horizon est égale à la quantité initiale stockée dans cette arche pour un produit fini donné.

$$\forall j \in S_3, a_j \in Ar, p \in P, j \geq 1, j \leq |S|, a_j \leq NAr_j, p = Ar_{j,a_j}^{init}, p \geq 1$$

$$I_{j,a_j,p,t=0} = MIN(Ar_{j,a_j}^{\max}, \sum_{q \in S_5, t \in T | t \leq 2} D_{p,q,t}) \tag{4.57}$$

$$\forall j \in S_3, a_j \in Ar, p \in P, j \geq 1, j \leq |S|, a_j \leq NAr_j, p \neq Ar_{j,a_j}^{init}, p \geq 1$$

$$I_{j,a_j,p,t=0} = 0 \tag{4.58}$$

$$\forall j \in S_3, a_j \in Ar, j \geq 1, j \leq |S|, a_j \leq NAr_j$$

$$\sum_{i \in S, a_i \in Ar, p \in P, t \in T | p = Ar_{j,a_j}^{init} a_i \leq NAr_i, t \leq 2, succ_{i,j} = 1} \varphi_{i,a_i,j,a_j,p,t} = 0 \tag{4.59}$$

$$\forall j \in S_3, a_j \in Ar, j \geq 1, j \leq |S|, a_j \leq NAr_j$$

$$\sum_{k \in S, a_k \in Ar, p \in P, t \in T | p \neq Ar_{j,a_j}^{init} a_k \leq NAr_k, t \leq 2, succ_{j,k} = 1} \varphi_{j,a_j,k,a_k,p,t} = 0 \tag{4.60}$$

$$\forall j \in S_3, a_j \in Ar, p \in P, a_j \leq NAr_j, j \geq 1, j \leq |S|, p = Ar_{j,a_j}^{init}$$

$$\sum_{k \in S, a_k \in Ar | succ_{j,k} = 1, a_k \leq NAr_k} (\varphi_{j,a_j,k,a_k,p,1} + \varphi_{j,a_j,k,a_k,p,2}) = I_{j,a_j,p,0} \tag{4.61}$$

5.3.4. Contraintes de capacité des ressources

Les deux contraintes (4.62) et (4.63) stipulent la limitation des capacités des ressources utilisées. La première contrainte (4.62) concerne les capacités des lignes de production et des convoyeurs de transport, ainsi le flux circulant dans les arcs du graphe de flot ne doit pas dépasser la capacité offerte par ces ressources, tandis que la contrainte (4.63) concerne cette fois-ci la capacité des arches de stockage composant le hangar de stockage, la mise en stocks des quantités de produits finis ne doit pas dépasser la capacité offerte par ces arches de stockage.

$$\sum_{p \in P} \varphi_{i,a_i,j,a_j,p,t} \leq C_{i,j}^{\max} \quad \forall i, j \in S, a_i, a_j \in Ar, t \in T, succ_{i,j} = 1, a_i \leq NAr_i, a_j \leq NAr_j \tag{4.62}$$

$$\sum_{p\in P} I_{j,a_j,p,t} \le Ar_{j,a_j}^{\max} \qquad \forall j \in S_3, a_j \in Ar, t \in T, j \ge 1, j \le |S|, a_j \le NAr_j \tag{4.63}$$

5.3.5. Contraintes de conservation des flux et des stocks

Les égalités (4.64) et (4.65) constituent des contraintes de conservation des flux et des stocks respectivement. La conservation des flux stipule que la somme des flots entrants d'un un nœud est égale à la somme des flots sortants. Tandis que la conservation de stocks au niveau des arches de stockage suppose que le niveau de stock d'un produit fini à la fin de chaque période est égal à son niveau de stock à la fin de la période précédente augmenté des flots entrants et diminué des flots sortants. Finalement, la contrainte (4.66) concerne la conservation des stocks dans tout l'horizon de planification, pour chaque arche de stockage, la somme des flots entrants plus le stock initial est égal à la somme des flots sortants.

$$\forall j \in S / S_3, a_j \in Ar, p \in P, t \in T, a_j \le NAr_j, j \ge 1, j \le |S|$$

$$\sum_{i\in S, a_i \in Ar | succ_{i,j}=1, a_i \le NAr_i} \varphi_{i,a_i,j,a_j,p,t} = \sum_{k\in S, a_k \in Ar | succ_{j,k}=1, a_k \le NAr_k} \varphi_{j,a_j,k,a_k,p,t} \tag{4.64}$$

$$\forall j \in S_3, a_j \in Ar, p \in P, t \in T, a_j \le NAr_j, j \ge 1, j \le |S|$$

$$I_{j,a_j,p,t-1} + \sum_{i\in S, a_i \in Ar | succ_{i,j}=1, a_i \le NAr_i} \varphi_{i,a_i,j,a_j,p,t} = \sum_{k\in S, a_k \in Ar | succ_{j,k}=1, a_k \le NAr_k} \varphi_{j,a_j,k,a_k,p,t} + I_{j,a_j,p,t} \tag{4.65}$$

$$\forall j \in S_3, a_j \in Ar, p \in P, a_j \le NAr_j, j \ge 1, j \le |S|$$

$$I_{j,a_j,p,t=0} + \sum_{i\in S, a_i \in Ar, t\in T | succ_{i,j}=1, a_i \le NAr_i} \varphi_{i,a_i,j,a_j,p,t} = \sum_{k\in S, a_k \in Ar, t\in T | succ_{j,k}=1, a_k \le NAr_k} \varphi_{j,a_j,k,a_k,p,t} \tag{4.66}$$

5.3.6. Contraintes de contamination des produits

Les contraintes (4.67 - 4.69) décrivent le problème de contamination des produits finis dans les espaces de stockage. Ainsi, le mélange de deux produits finis qui ont des caractéristiques chimiques différentes conçoit un produit fini déclassé qui ne répond pas aux spécifications demandées par le client, ainsi, ces différentes contraintes permettent d'imposer le stockage d'un seul produit fini dans une arche de stockage à chaque période de l'horizon de planification.

$$\sum_{p\in P} Q_{j,a_j,p,t} \le 1 \qquad \forall j \in S_3, a_j \in Ar, t \in T, a_j \le NAr_j, j \ge 1, j \le |S| \tag{4.67}$$

$$I_{j,a_j,p,t} \le M \times Q_{j,a_j,p,t} \qquad \forall j \in S_3, a_j \in Ar, p \in P, t \in T, a_j \le NAr_j, j \ge 1, j \le |S| \tag{4.68}$$

$$Q_{j,a_j,p,t} \le I_{j,a_j,p,t} \qquad \forall j \in S_3, a_j \in Ar, p \in P, t \in T, a_j \le NAr_j, j \ge 1, j \le |S| \tag{4.69}$$

5.3.7. Contraintes de restrictions des ressources de production

La contrainte (4.70) stipule que les lignes de production ont une capabilité technique à produire ou non un produit fini donné. Donc le flot sortant d'une ligne de production doit respecter la capacité de production de cette ligne tout en prenant en considération la capabilité de cette ligne à produire le produit fini en question. Tandis que la contrainte (4.71) définit le changement du taux de production qui varie en fonction du produit fini fabriqué sur une ligne de production donnée. Ainsi, chaque produit fini est associé à un coefficient de conversion qui, après sa multiplication par la capacité réelle de la ligne de production, définit le nouveau taux de production associé au produit fini considéré. La contrainte (4.72) considère que la production à la période $t' \in T \mid t' = t-1$ est nulle, et ceci en se basant sur la contrainte de durée minimale de séjour dans les arches de stockage, ainsi un produit fini fabriqué à la période $(t-1) \in T$ ne doit sortir du stock qu'à la période $(t+1) \in T$. Ainsi, à la période $(t-2) \in T$ de l'horizon de planification T, la production totale de chaque produit fini ne doit pas excéder la demande totale de ce produit à la période $t \in T$ (4.73).

$$\varphi_{i,a_i,j,a_j,p,t} \leq CL_{p,j} \times C_{i,j}^{\max} \qquad \forall j \in S_1, a_j, a_i \in Ar, p \in P, t \in T, (i,j) \in A_1, Succ_{i,j} = 1 \quad (4.70)$$

$$\sum_{p \in P} \varphi_{i,a_i,j,a_j p,t} \times \beta_f \leq C_{i,j}^{\max} \qquad \forall j \in S_1, a_j, a_i \in Ar, t \in T, (i,j) \in A_1, Succ_{i,j} = 1, a_j \leq NAr_j$$
(4.71)

$$\sum_{j \in S_1, (i,j) \in A_1, a_i, a_j \in Ar, p \in P, t \in T \mid t \geq t', t' = t-1, Succ_{i,j} = 1} \varphi_{i,a_i,j,a_j,p,t} = 0 \qquad (4.72)$$

$$\sum_{j \in S_1, (i,j) \in A_1, a_i, a_j \in Ar, t \in T \mid t \leq t', t' = t-2, Succ_{i,j} = 1} \varphi_{i,a_i,j,a_j,p,t} \leq \sum_{q \in S_5, t \in T} D_{p,q,t} \qquad \forall p \in P \qquad (4.73)$$

5.3.8. Contraintes d'intégrité et de non-négativité des variables

Les contraintes (4.74 - 4.78) définissent le domaine de définition des variables de décision.

$$\varphi_{i,a_i,j,a_j,p,t} \geq 0 \qquad \forall i, j \in S, (i,j) \in A, a_j, a_i \in Ar, p \in P, t \in T \quad (4.74)$$

$$I_{j,a_j,p,t} \geq 0 \qquad \forall j \in S_3, a_j \in Ar, p \in P, t \in T \qquad (4.75)$$

$$\omega_{p,q,t} \in (0..1) \qquad \forall p \in P, q \in S_5, t \in T \qquad (4.76)$$

$$K_{p,q,s,t} \geq 0 \qquad \forall p \in P, q \in S_5, s \in T, t \in T \qquad (4.77)$$

$$Q_{j,a_j,p,t} \in \{0,1\} \qquad \forall j \in S_3, a_j \in Ar, p \in P, t \in T \tag{4.78}$$

5.4. Fonction objectif

Comme indiqué précédemment, l'objectif de ce modèle de planification à court terme est d'obtenir un plan de production, de stockage et d'expédition permettant de satisfaire la plus grande part possible de la demande journalière. Cet aspect est introduit par l'intermédiaire de la fonction objectif (4.79), maximisant le taux de satisfaction de la demande sur l'ensemble des périodes tout en minimisant le stock.

$$MAX \sum_{p \in P, q \in S_5, t \in T} M^2 \times \omega_{p,q,t} - \sum_{i \in S_3, a_i \in Ar, p \in P, t \in T | j \geq 1, j \leq |S|, a_i \leq NAr_i} I_{i,a_i,p,t} \tag{4.79}$$

5.5. Applications numériques

5.5.1. Présentation

L'introduction de cette application numérique, du MILP précédemment défini, revêt deux objectifs à savoir l'apport d'une aide à la décision au niveau opérationnel et la conception d'un plan détaillé pour des périodes plus fines et qui tient compte des contraintes opérationnelles. C'est pour cela que celui-ci est représenté par un modèle visant à ordonnancer la production et dont l'objectif est de maximiser le taux de satisfaction de la demande tout en minimisant le stock. Ainsi, une instance réelle industrielle a été mise en place afin de faciliter l'exploitation et l'explication des résultats obtenus. Notons qu'afin de construire cette application numérique, la demande des différents produits finis, une maille journalière a été générée. Le but étant de présenter une situation pouvant se produire dans un contexte industriel réel.

Comme le montre le graphique sur la Figure 4.40, on représente l'évolution journalière de la demande des 33 produits finis sur un horizon d'une semaine. On remarque que le volume demandé varie fortement d'un quai de chargement à un autre, mais faiblement d'un jour à un autre au niveau de chaque quai de chargement.

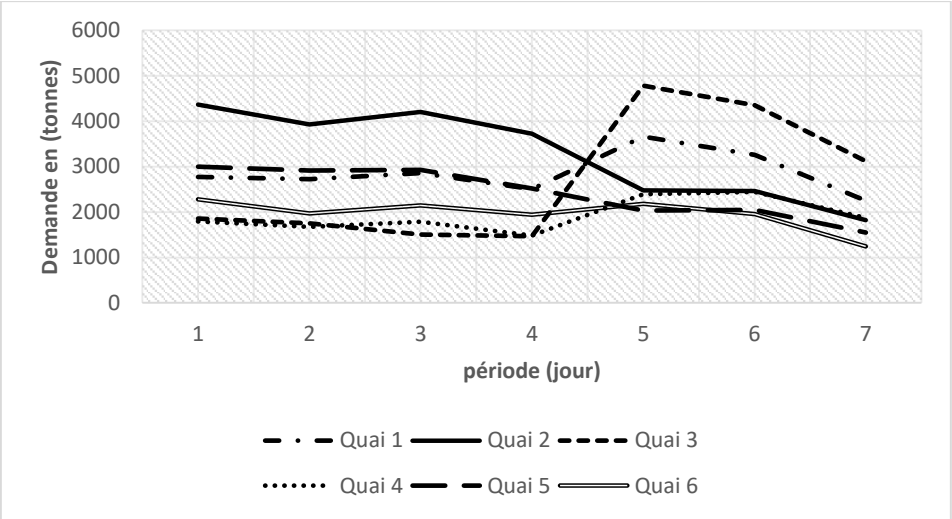


Figure 4. 40- Profil de la demande journalière par quai de chargement

Les décisions opérationnelles concernent pour leur part l'allocation des flux (produits finis) tout au long du réseau multi-flots, de sorte que les demandes des clients soient satisfaites dans les conditions de diversité, de délais, de qualité et de coûts objectifs contractés. Il s'agit donc de déterminer l'allocation des volumes demandés de chaque produit finis (qualité d'engrais) aux différentes ressources du réseau. Ainsi, la Figure 4.41 présente plus en détails les quantités demandées pour chaque produit fini appartenant à une famille de produits donnée sur l'ensemble des périodes de l'horizon de planification.

Afin de faciliter l'explication des résultats provenant du modèle linéaire, le cas du système de production de stockage et de distribution est pris en compte, il a été décrit précédemment, constitué de 6 lignes de productions réparties au sein de deux usines de production d'engrais capables de produire 33 produits finis différents, 9 hangars de stockage et un ensemble de 22 convoyeurs ayant des fonctions de transport et de transfert entre les différentes entités du système, ainsi que 6 quais de chargement des produits finis destinés au client final.

Initialement, le modèle opérationnel étudié, tenant compte en entrée des demandes, des capacités offertes, fournit comme première sortie la configuration initiale des hangars de stockage. Ainsi, pour chaque produit fini, une quantité initiale est allouée à un hangar de stockage donné et l'arche associée. Nous adoptons l'hypothèse d'une production et d'une mise en stock nulles dans les deux premières périodes de l'horizon de planification pour les différents produits finis. Il est important de noter que la planification opérationnelle se fait sur un horizon glissant.

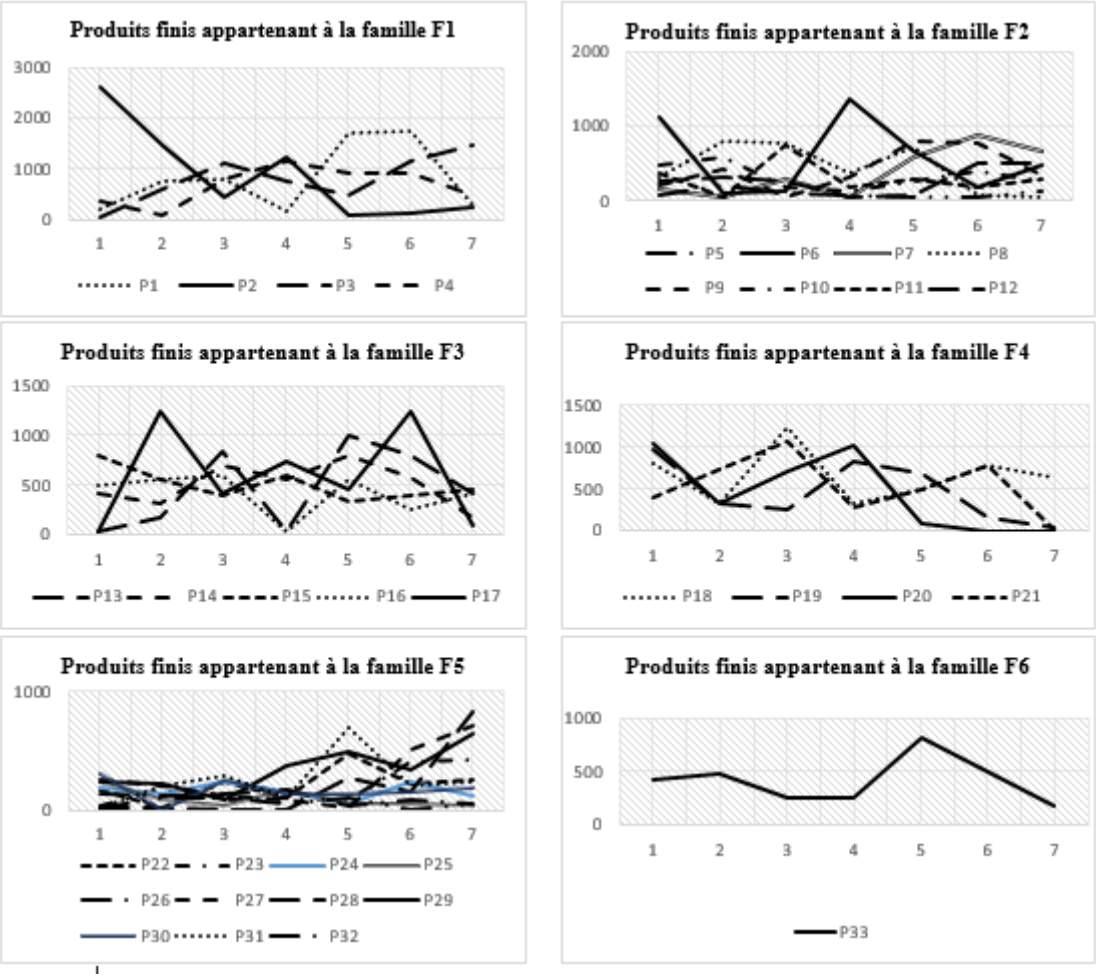


Figure 4. 41- Quantités demandées des produits finis par famille de produits sur l'ensemble de l'horizon de la planification

Un hangar de stockage (ou arche de stockage) est caractérisé par son niveau en début d'horizon (le stock initial), le Tableau 4.13 nous donne, pour chaque produit *p*, le stock initial ($I_{j,a_j,p,t=0}$), au niveau de chaque hangar de stockage et arche de stockage associé, les valeurs nulles du stock initial ne sont pas représentées dans le tableau. Cette répartition du stock initial n'est pas aléatoire. En effet, elle est basée sur une répartition préalable des types de produits finis qui devraient être stockés initialement dans les hangars et les arches associés de stockage en entrée du modèle. Cette quantité, déterminée par les contraintes du modèle est définie par le minimum entre la capacité offerte de l'arche et la demande des deux premières périodes de l'horizon de planification.

Hangar de stockage	Arche de stockage	Produit fini	Stock initial (en tonnes)
H_1	1	P_1	951
	2	P_2	4070
	3	P_3	642
	4	P_4	438
H_2	1	P_5	295
	2	P_6	1215
	3	P_7	215
	4	P_8	1124
H_3	1	P_9	632
	2	P_{10}	1059
	3	P_{11}	438
	4	P_{12}	569
H_4	1	P_{13}	197
	2	P_{14}	733
	3	P_{15}	1351
	4	P_{16}	1040
H_5	1	P_{17}	1261
	2	P_{18}	1126
	3	P_{19}	1304
	4	P_{20}	1387
H_6	1	P_{21}	1141
	2	P_{22}	179
	3	P_{23}	208
	4	P_{24}	318
H_7	1	P_{25}	335
	2	P_{26}	250
	3	P_{27}	456
	4	P_{28}	25
H_8	1	P_{29}	464
	2	P_{30}	301
	3	P_{31}	220
	4	P_{32}	123
H_9	1	P_{33}	4166

Tableau 4. 13- Configuration initiale des hangars/arches de stockage

5.5.2. Analyse de la résolution du MILP

De manière similaire au MILP tactique, nous avons analysé le temps de résolution. L'instance du modèle linéaire ainsi définie a été résolue à l'aide du solveur ILOG CPLEX Optimization Studio V12.7.0, pour un horizon de 7 jours. Le temps n'étant pas limité, le solveur

a trouvé la solution optimale après 25 heures de calcul. Comme attendu, la résolution ne s'est pas effectuée d'une manière linéaire. La Figure 4.42 montre la convergence vers la solution optimale.

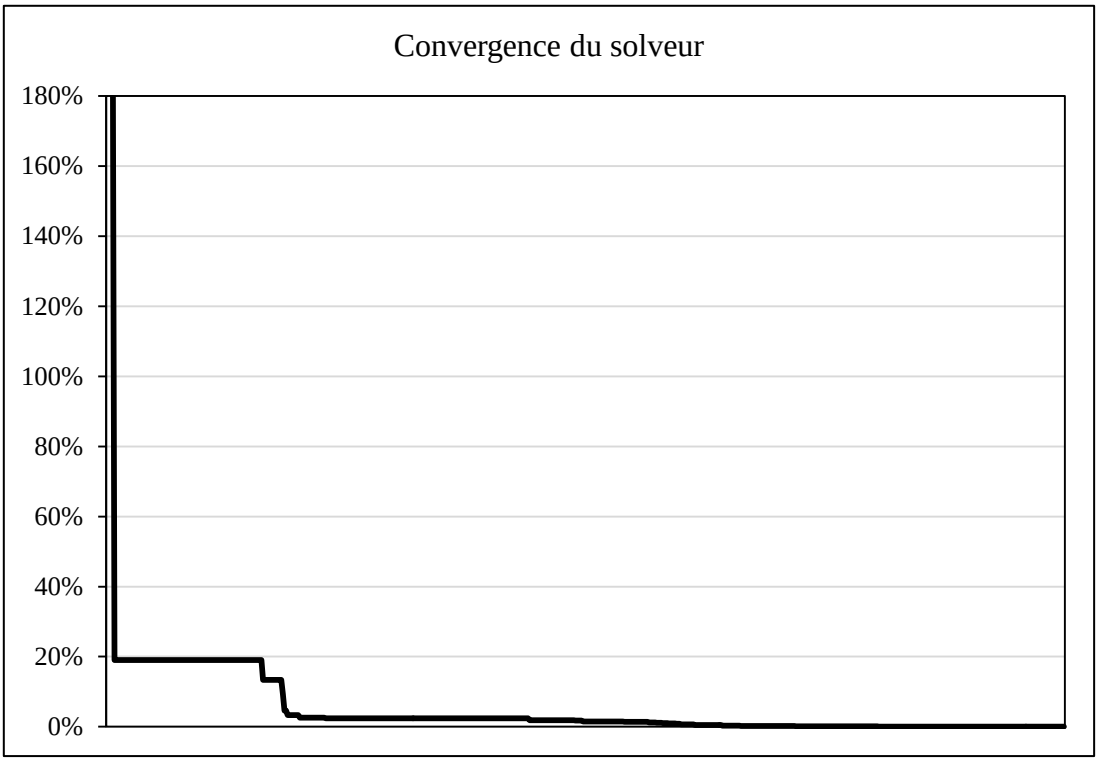


Figure 4. 42- Comportement du solveur lors de la résolution du MILP

Ainsi, lors de la résolution, comme indiqué sur le Tableau 4.14, la première solution réalisable a été obtenue au bout de 95s. Celle-ci, se situant à environ 183,69% de la solution optimale a été améliorée à 4,61% après 1230s (environ 20 minutes) avant de stagner (gain de seulement 4.61% en 89886 secondes soit en 24 heures et 58 minutes et 6 secondes). Ces temps d'exécution et la qualité des résultats montrent que le modèle proposé peut être utilisé dans un contexte industriel lors du processus décisionnel dans le cadre de la planification opérationnelle comme une méthode d'ordonnancement prédictif (off-line). En effet, il peut être exécuté avec temps de résolution de 20 minutes pour tester différents scénarii et hypothèses et cherche ensuite la meilleure solution possible avec un temps de résolution plus important.

Temps d'exécution (s)	Ecart estimé avec la solution optimale (%)
95	183,69%
368	19,01%
894	13,40%
1235	4,61%
3950	2,85%
4349	2,56%
7782	2,40%
7962	1,90%
8494	1,76%
9216	1,36%
9548	1,02%
11122	0,08%
15041	0,04%
…..	……
91116*	0,04%

*arrêt du solveur

Tableau 4. 14- Temps associés à la résolution du modèle linéaire

5.5.3. Exploitation des résultats

L'analyse des résultats de la planification opérationnelle montre que la demande des différents produits finis est satisfaite avec un taux moyen de 95,59%. Ce résultat corrobore avec les résultats du PDP pour l'horizon de planification (cf. &4.4.3, Figure 4.27). Les résultats de la planification opérationnelle à maille journalière sont de nature similaire aux ceux de la planification tactique. Ainsi, à la fin du processus décisionnel les résultats obtenus sur l'horizon de planification sont les suivants :

- *l'ordonnancement de la production par produit* : à titre d'exemple la Figure 4.43 illustre l'ordonnancement de la production du produit 1 par ligne sur l'horizon de planification ;
- *l'ordonnancement de la production par ligne* : à titre d'exemple l'ordonnancement peut être consultés pour la ligne 1 sur la Figure 4.44;
- *le plan de stock par produit et pour chaque arche des hangars* : compte tenu de la fonction objectif, le stock et très faible. A titre d'exemple ces plans peuvent être consultés pour le produit 1 et le hangar H1 sur la Figure 4.45 et la Figure 4.46.

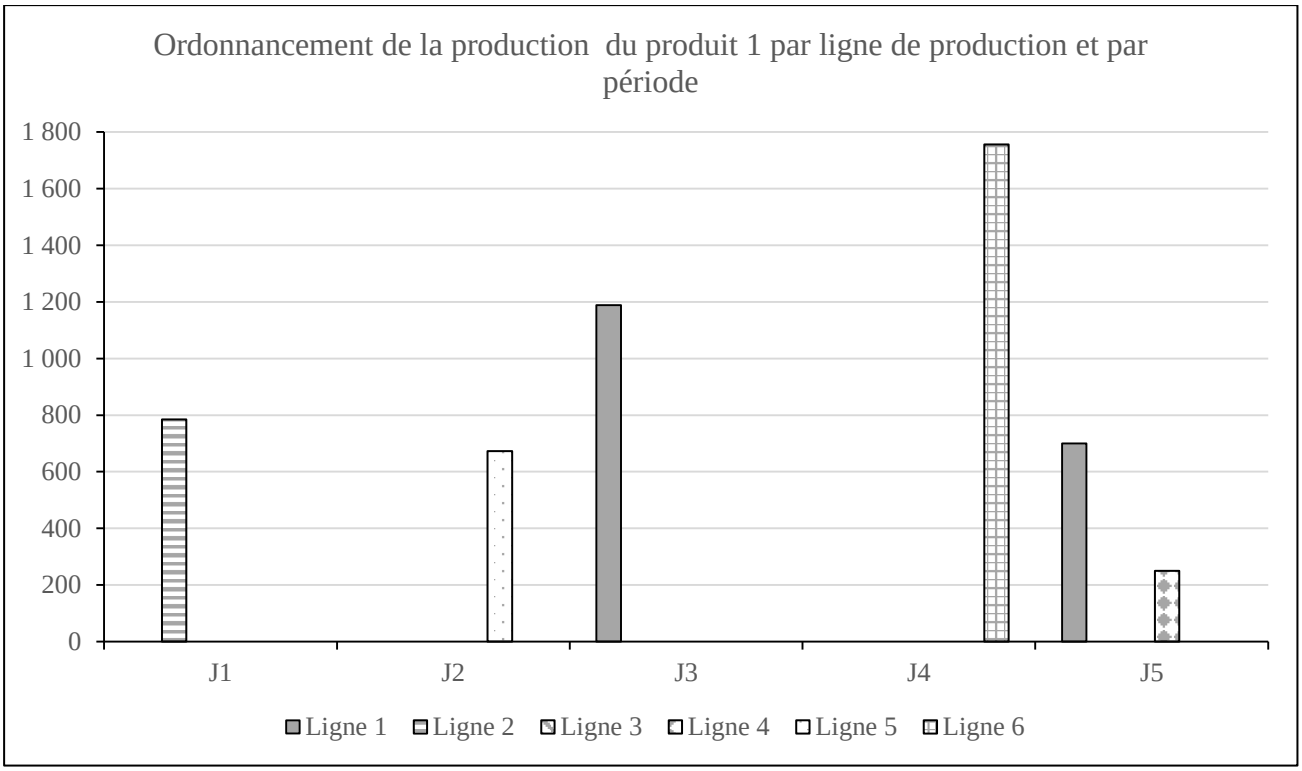


Figure 4. 43- Ordonnancement de la production du produit 1 par ligne de production et par période

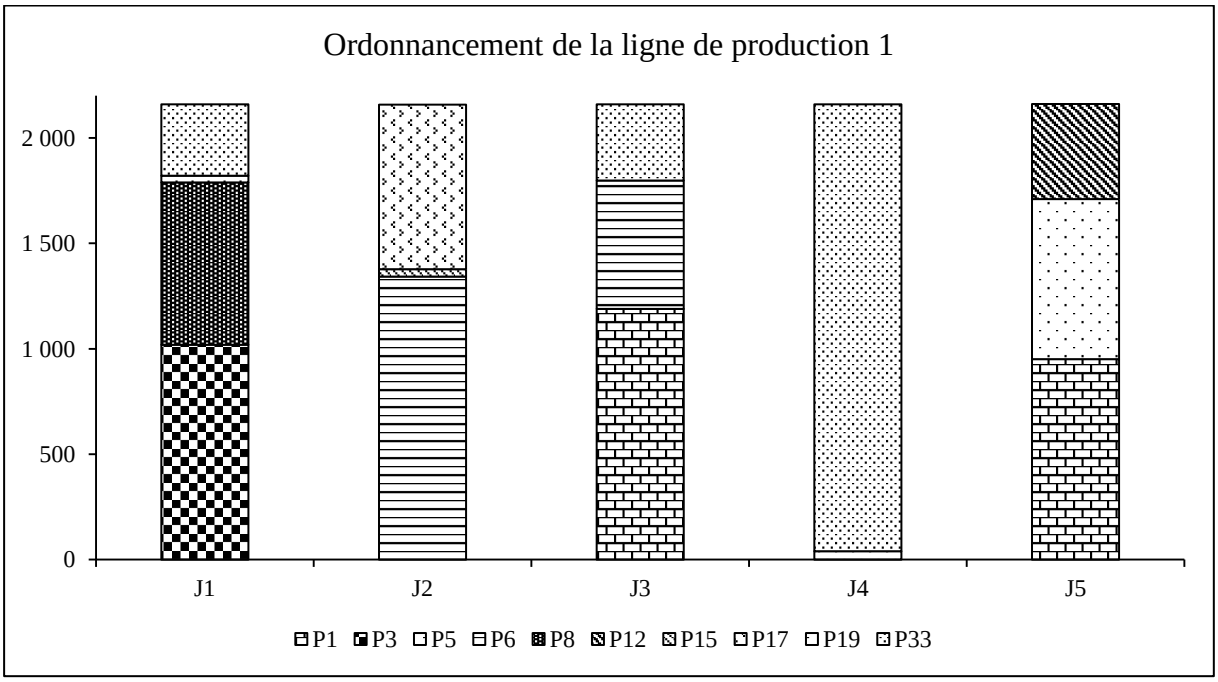


Figure 4. 44- Ordonnancement de la ligne de production 1 sur l'horizon de planification

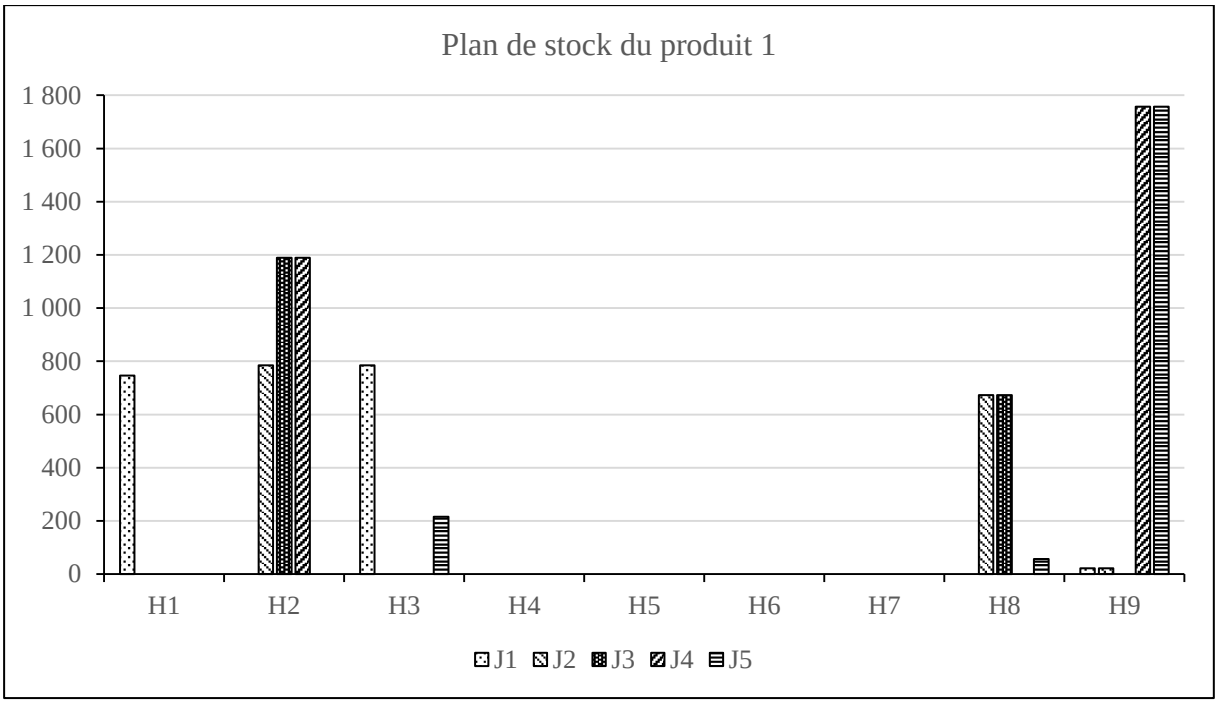


Figure 4. 45- Plan de stock du produit 1sur l'horizon de planification

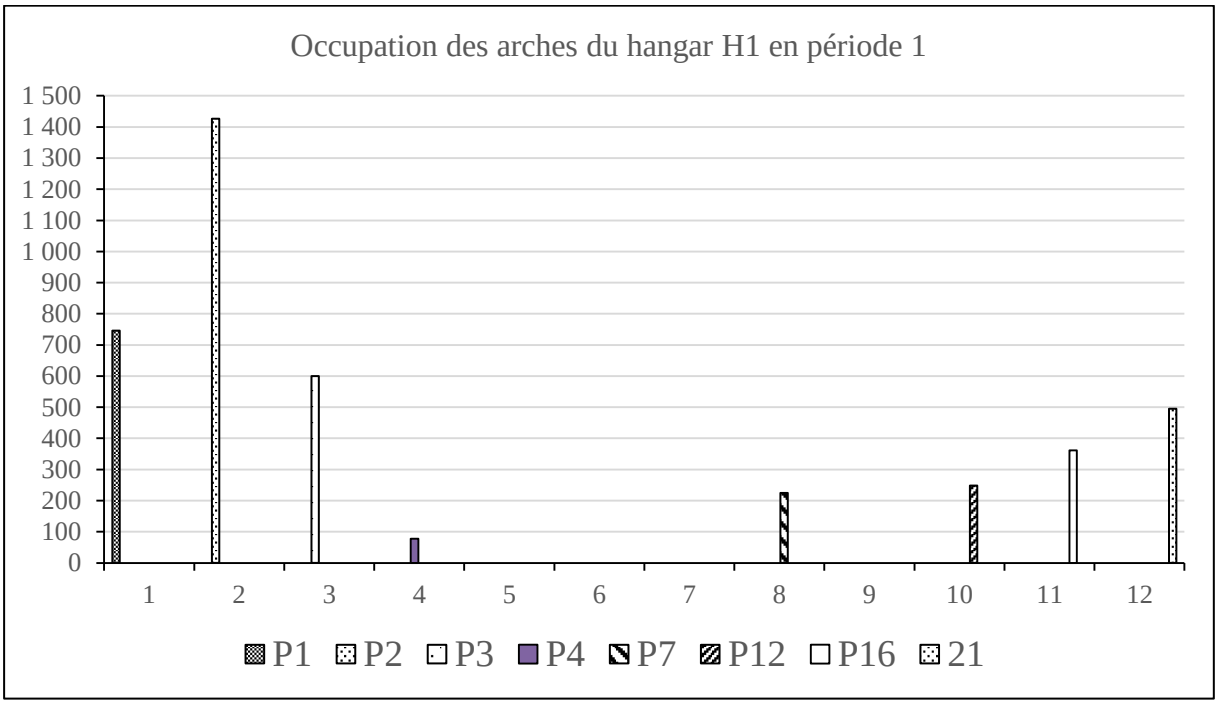


Figure 4. 46- Occupation des arches du hangar H1 en période 1

À travers sa description réalisée dans cette partie, nous pouvons noter que le modèle linéaire, correspond davantage à une boucle de faisabilité tactique – opérationnelle qu'à un réel plan de production court terme. En effet, il consiste uniquement à décliner les décisions tactiques de la maille ligne de production à la maille machine, puis à établir un plan de charge

de ces dernières afin, notamment, de mettre en évidence d'éventuels déséquilibres charge-capacité nécessitant la remise en cause du PDP. Ce constat définit une perspective d'évolution immédiate, à savoir la réalisation d'un véritable processus d'ordonnancement permettant la réalisation d'un réel plan de production très court terme à la maille heure. Cependant, compte tenu de la nature de l'industrie process, à savoir des procédés continus dont la durée est importante (plusieurs heures), les résultats obtenus sont satisfaisantes pour le pilotage opérationnel du système étudié.

6. Conclusion

La modélisation et la résolution des cas réels pour la planification nécessitent une phase préalable de simplification des différents paramètres associés dans le but de permettre leurs prises en compte. Ainsi, ce chapitre a pour objet d'introduire la formalisation mathématique de trois modèles de la problématique de planification de la production, de stockage et de distribution du système industriel de production de fertilisants dans un contexte déterministe et ceci selon les trois niveaux traités par les problèmes de planification : stratégique, tactique et opérationnel. Cette formalisation s'est accompagnée d'une explication de la façon dont les différentes contraintes ont été considérées, elle s'exprime par l'intermédiaire de modèles linéaires mixtes en nombres entiers (MILP), dans le but de les utiliser pour la résolution des instances industrielles réelles à l'aide du solveur Cplex.

Par la suite différentes applications numériques ont été présentées pour mettre en évidence les différentes caractéristiques des MILP ainsi obtenus. La première a constitué une illustration d'un ensemble de scénarios d'aide à la décision en se basant sur une pondération des différents coûts utilisés dans la fonction objectif qui maximise le profit. La deuxième a eu pour principal objectif de mettre en évidence l'intégration des contraintes du niveau supérieur et s'assurer de leur réalisabilité dans la résolution d'un cas réel. Tandis que la dernière a illustré la résolution d'un cas réel au niveau opérationnel en tenant en compte des contraintes à un niveau de détail plus fin. Ces différents exemples numériques ont mis en évidence le recours à la programmation linéaire pour résoudre des instances réelles et permettre une aide à la décision.
Ces solutions seront évaluées dans le chapitre suivant comme complément à notre approche globale d'optimisation/d'évaluation des performances détaillée précédemment.

Chapitre V : Amélioration des performances : simulation du système logistique industriel

Ce chapitre est entièrement consacré à discuter les potentiels leviers d'amélioration de performance de la chaîne logistique par la simulation. Nous commençons par une courte présentation des concepts de simulation et des techniques de combinaison de la simulation et l'optimisation. Ensuite une revue de la littérature qui porte sur l'utilisation de la simulation à évènements discrets pour les problèmes de la planification est présentée. Une mise en œuvre de la méthodologie de modélisation est introduite, dont l'objectif est de présenter une traduction sémantique du modèle de connaissance en un language de simulation. Le passage à ce modèle d'action pour l'évaluation des performances ainsi que son exploitation ont été illustrés par une appplication réelle du cas de Maroc Phosphore.

Sommaire

1. Introduction 257
1.1. La simulation 257
1.2. Utilisation conjointe des modèles de simulation et des modèles analytiques 263
1.2.1. Chaînage Optimisation/Simulation 264
1.2.2. Chaînage Simulation/Optimisation 265
1.2.3. Couplage Simulation/Optimisation 266
1.2.4. Couplage Optimisation/Simulation 267
2. Revue de la littérature sur la simulation à événements discrets pour la planification 268
2.1. Approches basées sur la simulation 268
2.2. Approches basées sur la simulation et l'optimisation 272
3. Mise en œuvre de la méthodologie de modélisation 275
3.1. Contexte et objectifs de modélisation 275
3.2. Passage au modèle d'action pour l'évaluation des performances : application au MAROC-Phosphore 276
3.2.1. Passage d'un flux continu à un flux discret 276
3.2.2. Traduction des sous-systèmes physique, logique et décisionnel 277
3.2.2.1. Primitives de base utilisées par le simulateur à évènements discrets SIMUL8 277
3.2.2.2. Le sous-système physique 280
3.2.2.3. Le sous-système logique 281
3.2.2.4. Le sous-système décisionnel 281
3.2.3. Elaboration du modèle de simulation 282
4. Exploitation du modèle d'action pour l'évaluation des performances 288
4.1. Chaînage simulation et optimisation : évaluer une solution 288
4.2. Expériences numériques 293

5. Conclusion 298
Conclusion générale 300

Liste des figures

Figure 5. 1- Etapes de la simulation 258
Figure 5. 2- Chaînage entre la simulation et l'optimisation : évaluation des résultats de l'optimisation par la simulation [Shanthikumar et Sargent, 1983] 265
Figure 5. 3- Chaînage entre la simulation et l'optimisation : Le modèle de simulation est subordonné au modèle analytique et génère des données pour l'optimisation [Shanthikumar et Sargent, 1983] 266
Figure 5. 4- Couplage entre la simulation et l'optimisation : l'optimisation est intégrée lors de la simulation [Shanthikumar et Sargent, 1983] 267
Figure 5. 5- Couplage entre la simulation et l'optimisation : la simulation est intégrée lors de l'optimisation [Shanthikumar et Sargent, 1983] 268
Figure 5. 6- Approche de couplage [Byrne et Bakir, 1999] 274
Figure 5. 7- Discrétisation d'un processus continu 277
Figure 5. 8- Modélisation du processus de production, stockage et enlèvement des engrais implémentée dans Simul8 283
Figure 5. 9- Cycle de vie d'un item pendant la simulation 285
Figure 5. 10- Affectation des ressources 287
Figure 5. 11- Couplage des modules d'optimisation et de simulation 290
Figure 5. 12- Distribution de la demande trimestrielle des familles d'engrais 294
Figure 5. 13- Les types de flots par période 295
Figure 5. 14- Taux d'utilisation de chaque ligne de production à chaque période (mois) donné par la simulation 295
Figure 5. 15- Taux de satisfaction de la demande par quai en sortie de la simulation sur l'horizon de 3 mois 296
Figure 5. 16- Taux moyen de satisfaction de la demande sur la période 1 297
Figure 5. 17- Ecart du TSD par quai entre les deux scénarios 298
Figure 5. 18- Ecart du TSD par quai entre les deux scénarios 298

Liste des tableaux

Tableau 5. 1- Activités/processeurs/ressources du système étudié 291
Tableau 5. 2- Exemple d'initialialistion du modèle de simulation 292
Tableau 5. 3- Nombre de flots par période..... 294

1. Introduction

1.1. La simulation

Dans les modèles d'évaluation des performances, on retrouve : les modèles de simulation et les modèles issus de la théorie des files d'attente, tels que les modèles markoviens et les modèles analytiques. Ces dernières approches permettent de modéliser un nombre assez important de contraintes opérationnelles. Elles sont efficaces, mais leurs hypothèses d'application sont souvent trop restrictives. La simulation, et plus particulièrement la simulation aléatoire à événements discrets, permet d'appréhender à la fois le comportement lors des phases transitoires et stationnaires. Par contre, contrairement aux méthodes d'optimisation (exactes ou approchées) elles fournissent l'évaluation des performances d'une solution et non pas celle de la solution optimale. Ces méthodes d'évaluation des performances permettent de répondre à une question du type « Que se passe-t-il si… ? ». La simulation représente un outil d'analyse très puissant pour concevoir et mettre en œuvre des processus des systèmes complexes. Elle est considérée comme étant une approche qui permet de construire une abstraction de la réalité et de la faire évoluer en fonction du temps. L'objectif de la simulation est de reproduire les activités des différentes entités du système simulé, et de comprendre leurs comportements et leurs performances. Contrairement aux méthodes empiriques, la simulation fournit une réponse scientifique et étayée à des problèmes difficiles. "Simuler" consiste à expérimenter un modèle informatique pour étudier le comportement dynamique d'un système en fonction du temps et en fixant des objectifs. Les modèles de simulations peuvent être utilisés pour deux raisons, soit pour évaluer une situation donnée ou bien pour tester des hypothèses associées à un problème donné et de pouvoir les comparer. On dit également qu'on simule un scénario.

La simulation d'un système réel trouve son utilité lorsque la réalisation d'un modèle mathématique de ce système est onéreuse en termes de temps de conception ou de calcul, ou bien la modélisation donnée repose sur des hypothèses très simplificatrices, ce qui implique un modèle qui ne permet pas de donner des informations utiles sur le système à étudier. Adopter une approche par la simulation suppose que l'on ait identifié nettement les caractéristiques du système qui sont nécessaires à la détermination des performances recherchées.

La simulation permet d'appréhender le comportement des systèmes complexes en fonctionnement ou en projet, dont l'évolution serait difficile à prévoir et à évaluer par toute

autre méthode. Cette approche est largement utilisée en recherche opérationnelle, dont l'objectif est de proposer un modèle réel simplifié et d'extraire de celui-ci les informations utiles sur le système réel ou virtuel [Law, 2015]. [Gupta, 1997] a analysé 1294 articles de la revue Interfaces (l'une des principales revues traitant des applications de la recherche opérationnelle) de 1970 à 1992, et a constaté que la simulation venait juste après la "programmation mathématique" parmi 13 techniques considérées. Des perspectives sur l'évolution historique de la modélisation par simulation se trouvent dans [Nance et Sargent, 2002].

La simulation permet l'amélioration et l'évaluation des performances des chaînes logistiques, la représentation des systèmes réels étudiés à une granularité (temporelle, spatiale, …) pertinente, ainsi que l'expérimentation d'une ou plusieurs solutions envisagées sur ces systèmes pour retenir la meilleure des solutions testées. Classiquement, le processus de simulation d'un système passe par quatre grandes étapes, la première concerne la modélisation du système étudié, tandis que la deuxième consiste à programmer le modèle conçu via un logiciel de simulation, ensuite et après l'expérimentation et la mise en œuvre à l'aide de ce logiciel, les résultats simulés sont interprétés et accompagnés d'actions puis resimulés et ainsi de suite, jusqu'à avoir des résultats satisfaisants compte-tenu des objectifs et des critères visés. La Figure 5.1 montre ces quatre grandes étapes nécessaires pour mener une simulation dans le cadre du processus de modélisation préconisé. (cf. chapitre 3).

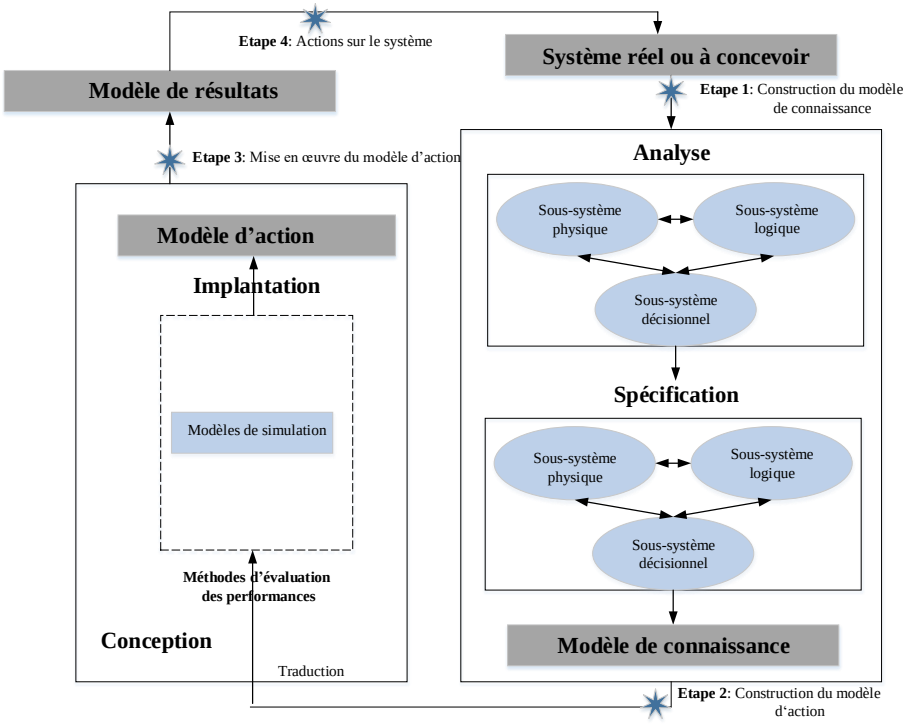


Figure 5. 1- Etapes de la simulation

Généralement les modèles de simulation sont adaptés aux systèmes complexes, vu qu'ils prennent en considération l'aspect dynamique, ainsi que les interactions entre les différents composants du système. Selon [Fleury et al., 2007] et [Law, 2015] la simulation s'avère très utile dans les cas suivants :

- *le système n'est pas décomposable* : la simulation s'impose si on ne peut pas adopter une approche systémique qui décompose le système en sous-systèmes simplifiés et indépendants les uns des autres. Au contraire, un système dissociable sera appréhendé après décomposition en ses éléments constitutifs.
- *le système n'existe pas* : si le système est à concevoir ou bien en étude préliminaire pour sa conception. Par exemple, pour déterminer le dimensionnement d'une unité de fabrication, il faut évaluer les performances des ressources de fabrication (ex : machines) utilisées, et déterminer leur nombre et leur emplacement…, puis vérifier le fonctionnement correct du système et son adéquation aux performances visées.
- *les expériences sur le système réel coûtent cher* : si les différentes expérimentations sur le système réel en fonctionnement coûtent cher ou sont impossibles à réaliser pendant son fonctionnement. À titre d'exemple : modifier le rythme cardiaque dans le système circulatoire pour en mesurer l'impact est une expérience peu recommandée.
- *le système est inaccessible* : le système circulatoire en est un excellent exemple.
- *les temps d'observation nécessaires* : si ces temps d'observation sur le système réel sont incompatibles avec les besoins : si l'évolution du système est très rapide, de sorte que les changements d'état du système semblent continus à l'échelle humain, ou si cette évolution est très lente, de sorte que le système n'évolue pas à l'échelle de temps dont on dispose pour mener l'étude.
- *faire des expériences sur le système réel est dangereux* : faire des expériences sur le système réel peut engendrer des conséquences graves : l'exemple de la catastrophe de Tchernobyl qui s'est produite au cours d'un entraînement de sécurité pendant lequel est survenu un véritable incident. Si cet entraînement avait été réalisé sur un modèle de simulation les conséquences auraient été moins dramatiques.

Dans cette optique, la simulation est indispensable quand le système est complexe et/ou l'expérimentation n'est pas possible. Elle permet d'une part d'évaluer la performance d'un système qui n'existe pas encore ou qui va être mis en place dans le futur, et d'autre part, d'évaluer les effets des décisions avant qu'elles ne soient prises. Elle permet ainsi d'éviter l'expérimentation sur un système réel pour ne pas perturber son fonctionnement et présenter

des situations dangereuses. De plus, la simulation permet de tester le plus facilement plusieurs scénarii afin de choisir le plus efficace et de prendre les décisions correctes.

Les modèles de simulation donnent un aperçu sur le fonctionnement d'un système et peuvent être utilisés en vue de prévoir les conséquences d'un changement de structure ou de stratégie. De plus, ils traitent en détail la complexité des systèmes en simulant la circulation de chaque entité dans le système. Chaque entité circulant dans le modèle est associée à un ensemble d'attributs, et à chaque point de décision, un ensemble de choix est disponible. Ainsi les résultats de la simulation dépendront des attributs des entités, des ressources, et des décisions et choix faits par les autres entités.

Cependant, les modèles de simulation présentent des difficultés. La première consiste à concevoir un modèle suffisamment détaillé qui prendrait en considération toutes les entités et les interactions entre elles, ainsi que toutes les spécificités du domaine du système étudié. La deuxième difficulté est liée à la proposition des outils d'aide à la décision ergonomiques pour les utilisateurs afin de faciliter pour eux le test de plusieurs scénarii (affectations, règles de gestion…) et la mesure de leur impact sur le système. Le plus important dans ce processus de simulation est de choisir le niveau de détail adéquat. Un niveau de détail élevé donne une représentation plus réaliste au système, et par conséquent, instaure une confiance chez les utilisateurs. En parallèle, ce niveau de détail exige une connaissance fine du système et des données vérifiées.

Cependant, les modèles de simulation présentent quelques inconvénients. En effet, ils exigent une quantité importante de données d'entrée, des détails sur les ressources et les produits, les règles et politiques de gestion. Ils nécessitent aussi un effort important pour la construction des modèles. Ainsi, pour faire une analyse statistique confiante, les modèles de simulation utilisent plusieurs réplications, ce qui entraine un temps d'exécution long.

En tenant compte de sa complexité, de son environnement, de sa composition, ou encore de l'objectif de sa modélisation et le niveau de détail souhaité, chaque système peut être modélisé de manières différentes. Le même système peut être modélisé de manière *statique* ou bien *dynamique* suivant la représentation que l'on veut en faire [Law, 2015]. Dans le modèle statique, le temps n'est pas pris en compte et l'état du système est donné à un instant. Tandis que dans le modèle dynamique, le temps est un facteur important et le modèle permet de simuler le comportement du système sur un horizon donné. Si le temps est représenté de manière

continue, on parle d'un modèle continu. À l'inverse, si le système change l'état de façon discrète, en l'occurrence d'évènements, on parle d'un modèle de simulation à évènements discrets. Un modèle peut être stochastique ou déterministe s'il tient compte ou non de phénomènes aléatoires. Dans les modèles stochastiques, la réalisation d'une seule simulation du système ne permettrait pas d'avoir une « bonne » connaissance des résultats, l'utilisation d'autres nombres aléatoires peuvent mener à des résultats de simulation différentes.

Afin de réaliser de « bonnes » précisons et une « bonne » estimation des valeurs des résultats de simulation, il est indispensable de répéter la simulation plusieurs fois. Chaque fois qu'une simulation est exécutée, une réplication est réalisée. Les résultats de chaque réplication permettent de calculer la moyenne et l'intervalle de confiance associés destinés à donner une estimation des résultats pour le système réel [Ingalls, 2001].

- *Modèles statiques*

Les modèles statiques sont généralement utilisés pour représenter les systèmes qui ne tiennent pas en compte l'écoulement du temps. Les tableurs, par exemple le logiciel *MS Excel*, sont très utilisés pour représenter et simuler les systèmes. Ce logiciel est un outil simple qui permet de représenter les relations logiques et mathématiques entre les variables en indiquant une séquence de calcul [Terzi et Cavalieri, 2004]. La simulation Monte Carlo est une technique statique qui permet de faire des expérimentations en utilisant des nombres aléatoires générés par une loi standard [Law, 2007]. Dans ce contexte, la simulation de Monte Carlo, introduite dans [Metropolis and Ulam, 1949], consiste, pour une solution donnée, à approcher l'espérance d'une variable aléatoire, telle qu'une fonction objectif, par une moyenne calculée sur un ensemble de scénarios générés aléatoirement suivant une certaine loi de probabilité. Plus précisément, chaque scénario définit une instance d'un modèle déterministe, leur résolution permet d'obtenir un ensemble de valeurs pour les variables aléatoires à partir desquelles sont calculées des moyennes permettant d'approcher leurs espérances, et ceci, pour une solution donnée. Dans le cas où le système à modéliser est complexe ou que le nombre de simulation à réaliser est grand, il est recommandé de se tourner vers les outils de programmation classique.

- *Modèles dynamiques*

Dans les modèles dynamiques, nous distinguons les modèles dynamiques continus et discontinus (ou discrets). Les premiers utilisent des fonctions continues pour représenter un système qui change d'état en permanence. Ils peuvent être utilisés pour décrire des

comportements tels que l'écoulement d'un flux. Pour modéliser ces systèmes, on utilise généralement un ensemble d'équations différentielles. Cependant, les modèles continus ne sont généralement pas adaptés pour représenter des systèmes manufacturiers. Tandis que les deuxièmes, quant à eux, prennent en compte l'écoulement du temps et les évènements qui interviennent d'une manière discrète durant le temps. La simulation à évènements discrets est bien adaptée pour imiter la dynamique du système réel, ce qui n'est pas possible avec l'optimisation ou d'autres modèles de simulation [Ingalls, 2001]. Après la vérification et la validation du modèle d'un système, la simulation peut être utilisée afin d'analyser le système ou de comparer différentes stratégies, ainsi qu'également de réaliser des expérimentations qui permettront par exemple d'aider le décideur à faire le bon choix dans un contexte de planification.

La construction du modèle de simulation à évènements discrets nécessite le choix d'une approche de modélisation adéquate. Ainsi nous distinguons trois types d'approches pour modéliser un tel système [Banks, 1998] [Law, 2015] [Pritsker et al., 1997] :

- *l'approche par évènements* : cette approche consiste à définir tous les évènements pertinents ainsi que les actions qui doivent avoir lieu pour chacun.
- *l'approche par interaction de processus* : cette approche détermine les différents processus et les interactions entre eux. Chaque processus modélise le cycle de vie d'un objet du système. Chaque processus est composé d'un ensemble d'activités liées et ordonnées.
- *l'approche par activité* : cette approche définit toutes les activités réalisées par les objets du système et les actions à exécuter au début et à la fin de chaque activité, ainsi que la durée de chacune.

Pour effectuer des simulations, le recours à un environnement de simulation s'avère nécessaire, l'objectif étant d'aider à la mise en œuvre des modèles en utilisant :

- des langages qui donnent des primitives nécessaires à l'établissement du modèle de simulation.
- des composants réutilisables pour réduire le temps de développement.
- des outils statistiques qui génèrent automatiquement des résultats de type rapport de simulation.

La réalisation d'un modèle de simulation nécessite la réponse, avant toute chose, à un certain nombre de questions sur l'objectif de l'étude, les hypothèses simplificatrices à

considérer, le temps d'observation du modèle dans le but de tirer des conclusions satisfaisants pour le système, les critères à évaluer par le modèle et la forme de représentation des résultats, et enfin, la vérification du bon fonctionnement du modèle et sa capacité à fournir des estimations correctes pour les critères retenus.

L'évaluation des performances par la simulation donne une vision plus complète sur le fonctionnement des ILS et plus particulièrement les systèmes de production. Contrairement aux méthodes analytiques, la simulation prend en compte les événements aléatoires auxquels sont soumis ces systèmes. Cependant, la complexité de ces systèmes est telle qu'une étude de simulation seule ne peut prétendre aider à résoudre les problèmes qu'ils posent. De plus, il existe trop de configurations envisageables pour pouvoir les simuler en totalité. Si aucune pré-étude à la simulation n'est faite, l'exploitation d'un modèle de simulation d'un système s'avérera très coûteuse, car les temps de calcul requis seront prohibitifs. Les résultats ne seront pas garantis dans la mesure où on ne sera jamais sûr d'avoir testé suffisamment d'hypothèses pour trouver la meilleure solution ou même une solution satisfaisante. De notre point de vue, la meilleure approche consiste à utiliser des couplages (hybridations) de méthodes d'optimisation et des outils de simulation. Cette démarche permet tout d'abord de trouver des résultats dits « grossiers » à l'aide des méthodes mathématiques, et ensuite de tester le fonctionnement du système par simulation.

Dans la partie suivante (§ 1.2) les différents types d'utilisation conjointe des modèles de simulation et des modèles analytique sont présentés.

1.2. Utilisation conjointe des modèles de simulation et des modèles analytiques

L'utilisation conjointe de la simulation avec des modèles analytiques est une approche souvent mise en œuvre lors de la résolution des problèmes industriels. Dans ce cas on parle de modèles hybrides. [Shanthikumar et Sargent, 1983] donnent la définition suivante : « un modèle hybride de simulation/analyse est un modèle mathématique qui combine des modèles de simulation et d'analyse identifiables ».

Cette approche consiste à utiliser les points forts de chaque technique pour obtenir les meilleurs résultats. D'une part, les praticiens font généralement recours à l'optimisation pour configurer les systèmes logistiques industriels afin de rechercher les configurations efficaces

de ces derniers [Almeder et al., 2009]. D'autre part, la simulation est également utilisée dans le cadre de la programmation stochastique pour faire face à l'incertitude.

La simulation représente plusieurs objectifs dans les approches hybrides Simulation-Optimisation, ainsi nous distinguons différentes formes d'usage de la simulation dans ces approches. L'analyse de la littérature permet d'identifier quatre types d'utilisation conjointe de la simulation et de l'optimisation : *(i) optimisation/simulation* : l'évaluation des résultats de l'optimisation par la simulation ou optimisation via la simulation ; *(ii) simulation/optimisation* : génération et transmissions des donnés servant à l'optimisation par le modèle de simulation ou la simulation pour l'optimisation ; *(iii)* simulation/optimisation/simulation : le modèle d'optimisation est intégré au modèle de simulation ; *(iv)* optimisation/simulation/optimisation : le modèle de simulation est intégré dans le modèle d'optimisation. Les deux premiers types d'utilisation conjointe représentent, en effet, un chaînage de modèles qui peut être itératif ou non, et ils sont utilisés couramment pour les problèmes de planification. Tandis que les deux derniers sont des couplages [Shanthikumar et Sargent, 1983] [Fu, 1994] [Fu, 2002] [Figueira et Almada-Lobo, 2014].

1.2.1. Chaînage Optimisation/Simulation

Cette approche se base sur un modèle de simulation destiné à évaluer les solutions trouvées par un modèle ou un algorithme d'optimisation, dont le process est illustré dans la Figure 5.2, et ceci dans une démarche itérative afin de trouver les meilleures solutions. Les deux modèles sont indépendants et ne communiquent pas lors de leur exécution. Le modèle de simulation est initialement développé pour modéliser et représenter les détails du système étudié. Ce modèle est ensuite utilisé pour évaluer les performances des solutions résultantes de l'optimisation. Le modèle de simulation permet de générer des données qui peuvent être utilisées ensuite comme des intrants pour le modèle d'optimisation. Dans les problèmes de planification, la simulation permet de vérifier si le plan donné par le modèle d'optimisation est réaliste ou non. A titre d'exemple [Jerbi et al., 2012] définissent un modèle d'optimisation pour la planification tactique dans le contexte d'une chaîne logistique forestière, puis réalisent un modèle de simulation pour vérifier l'impact des plans tactiques au niveau opérationnel. Dans [Marques et al., 2013] traitent le problème de planification opérationnelle de la récolte forestière, ils développent un modèle d'optimisation qui génère des plans optimisés, qu'ils simulent par la suite à l'aide d'un simulateur à évènements discrets, et ce pour évaluer les performances des plans et les comparer à l'aide des indicateurs de performance.

[Genin et al., 2007] évaluent la robustesse de plusieurs politiques de planification tactique par rapport à la demande. Pour chaque politique un plan est réalisé puis simulé (avec une composante stochastique de la demande), puis un nouveau plan est généré, basé sur la simulation. Il est ensuite simulé. Cette démarche est répétée plusieurs fois pour chaque politique.

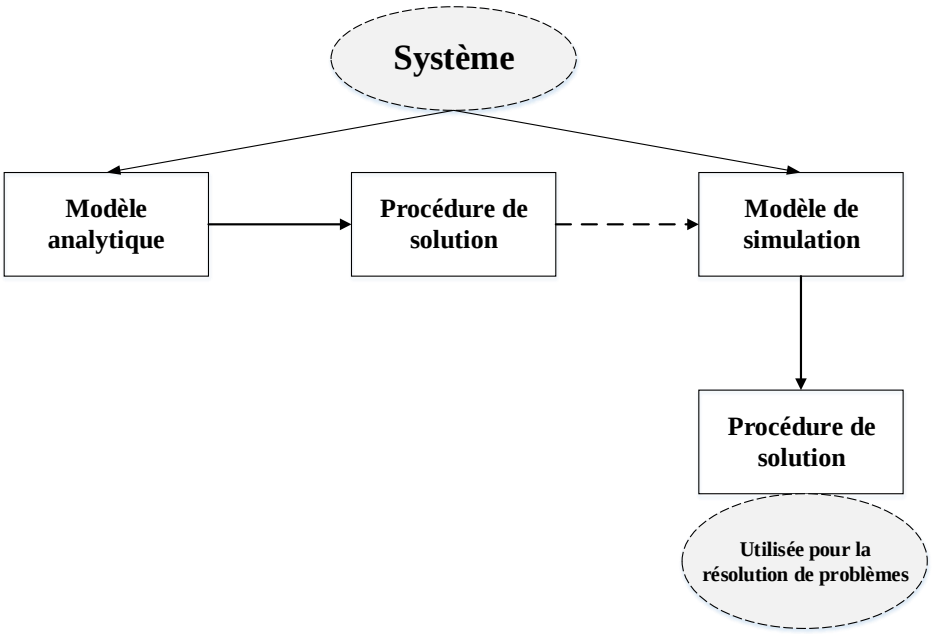


Figure 5. 2- Chaînage entre la simulation et l'optimisation : évaluation des résultats de l'optimisation par la simulation [Shanthikumar et Sargent, 1983]

1.2.2. Chaînage Simulation/Optimisation

L'utilisation de la simulation pour évaluer les différentes solutions d'optimisation peut être très exigeante en terme de temps de calcul. Pour certains problèmes particuliers, le retour à la simulation pour générer des informations pour l'optimisation s'avère important. Dans ce type d'approche de chaînage, le modèle de simulation peut être utilisé pour générer des données et donc de faire partie du processus de génération d'une solution (Figure 5.3). Par la suite, un modèle de programmation mathématique peut être utilisé pour réaliser l'optimisation. Par exemple, [Sinclair et Erasmus, 1992] ont utilisé cette approche dans un problème de planification opérationnelle, ils utilisent dans un premier temps un modèle de simulation en utilisant le logiciel SIMSAW pour obtenir des données des différents plans. Par la suite, un modèle de programmation linéaire qui utilise ces données comme intrants est réalisé pour établir la planification. Dans le même sens, [Liu et Takakuwa, 2009] utilisent cette approche

pour définir un horaire de travail des opérateurs d'une plateforme de transbordement *(cross-docking)*. Ils utilisent un modèle de simulation pour calculer le nombre de personnes et d'heures nécessaires pour les activités. Ensuite, un modèle mathématique permet de définir un horaire de travail pour chaque opérateur. Dans [Amodeo et al., 2008], les auteurs développent cette approche pour l'optimisation des politiques de planification, cette méthode utilise la technique de couplage d'un logiciel de simulation industrielle avec un optimiseur multi-objectifs basé sur les algorithmes génétiques afin d'optimiser les performances d'une installation de maintenance ferroviaire en choisissant la meilleure politique d'ordonnancement.

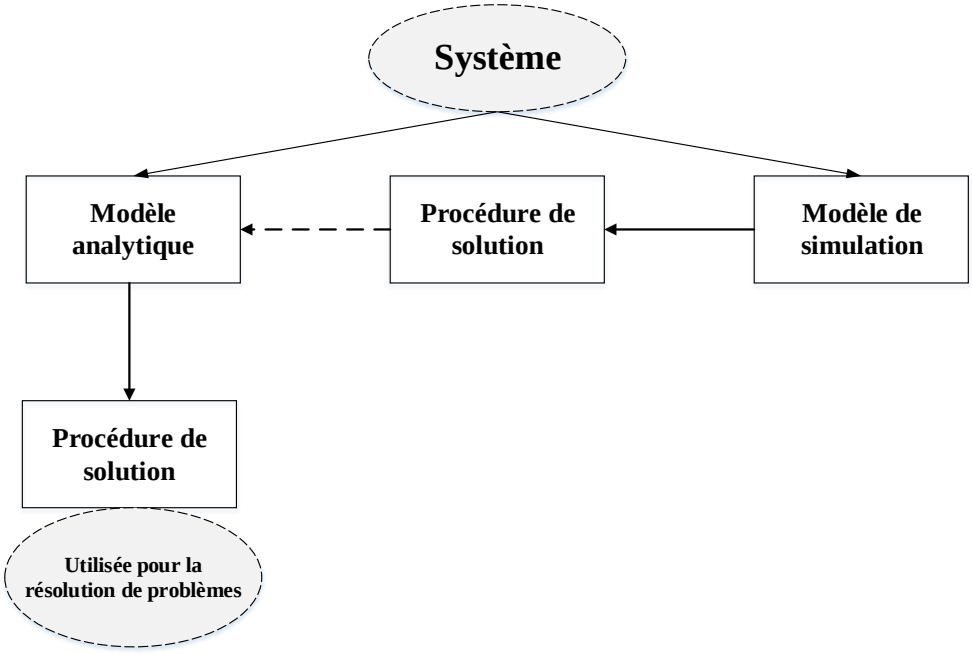


Figure 5. 3- Chaînage entre la simulation et l'optimisation : Le modèle de simulation est subordonné au modèle analytique et génère des données pour l'optimisation [Shanthikumar et Sargent, 1983]

1.2.3. Couplage Simulation/Optimisation

Dans cette approche, la simulation fait appel à un module (modèle) d'optimisation lors des événements de prise de décision. L'intégration d'un module d'optimisation au sein d'un modèle de simulation vise à écarter les règles de gestion qui peuvent être appliquées dans le but de définir l'ordre et/ou l'affectation des traitements des opérations dans le système de production. (Figure 5.4). [Lamy, 2017] a utilisé ce couplage pour le Job-shop Flexible réactif. Dans ce type d'approche, le module d'optimisation est appelé en support lors de l'apparition d'événements qui nécessitent une prise de décision, plutôt que de laisser les règles de gestion

définir l'ordre de traitement des opérations de manière dynamique. Par exemple, dans [Dumetz et al., 2016], les auteurs utilisent cette approche afin d'évaluer l'impact d'acceptation de commandes dans une scierie. Ils utilisent un modèle de simulation à évènements discrets pour générer les différentes commandes et simuler le processus d'acceptation de ces commandes. Le modèle de simulation fait appel à un système spécifiquement développé pour gérer le stockage et la planification de la production en utilisant un modèle de programmation mixte en nombres entiers. Dans ce sens, il convient de citer [Vamanan et al., 2004], qui proposent d'intégrer l'approche d'optimisation dans le cadre d'un système simulé pour guider la prise de décisions lors de son pilotage. Les auteurs ont couplé le logiciel de simulation ARENA avec CPLEX pour simuler d'une part le fonctionnement d'une chaîne d'approvisionnement et optimiser d'autre part le problème de stockage.

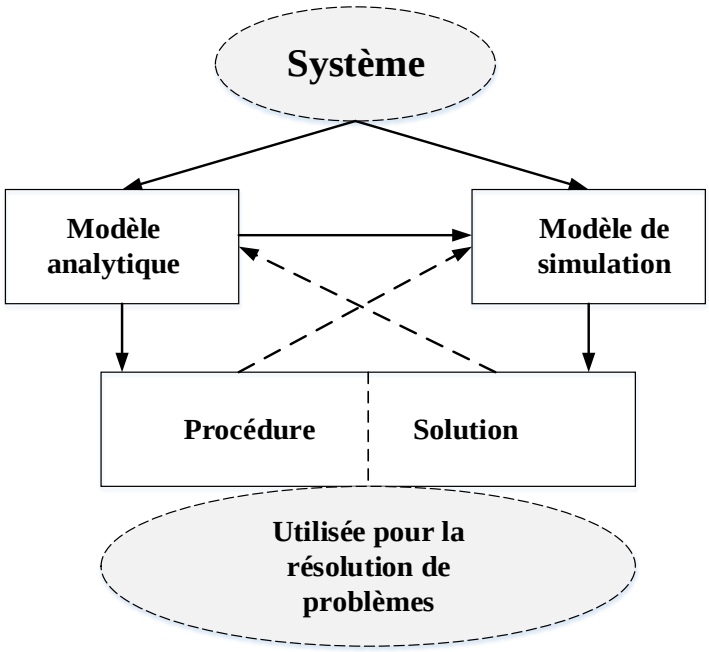


Figure 5. 4- Couplage entre la simulation et l'optimisation : l'optimisation est intégrée lors de la simulation [Shanthikumar et Sargent, 1983]

1.2.4. Couplage Optimisation/Simulation

Cette approche appelée aussi, *simulation-optimisation* (Figure 5.5), consiste à intégrer la simulation au modèle d'optimisation, elle désigne la résolution d'un problème d'optimisation dans un contexte où l'évaluation de la fonction objectif nécessite l'exécution d'un modèle de simulation. Or, parce que le nombre total de simulations à réaliser est trop élevé pour évaluer toutes les alternatives possibles, une procédure de recherche (globale ou locale) doit être utilisée

pour décider quels scénarios seront évalués et ce, dans quel ordre. À titre d'exemple [Kemmoé-Tchomté et al., 2015] proposent ce type de couplage pour le Job-shop stochastique. Dans l'approche proposée, l'algorithme d'optimisation est conçu pour explorer l'espace des solutions déterministes, alors qu'un modèle de simulation fournit des informations sur la robustesse des ordonnancements explorés. Plusieurs auteurs ont eu recours à ces techniques dans divers domaines [Fu et al., 2014] [Jalali et Van Nieuwenhuyse, 2015] [Pasupathy et Henderson, 2011].

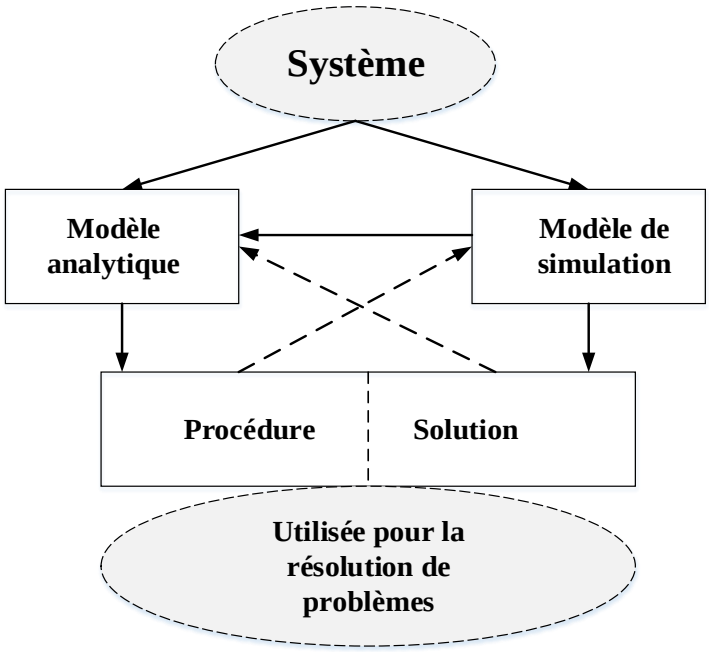


Figure 5. 5- Couplage entre la simulation et l'optimisation : la simulation est intégrée lors de l'optimisation [Shanthikumar et Sargent, 1983]

2. Revue de la littérature sur la simulation à événements discrets pour la planification

2.1. Approches basées sur la simulation

La simulation à évènements discrets, ainsi que les méthodes de types statiques sont généralement mises à profit pour résoudre des problèmes liés à la planification [Kleijnen, 2005].

Les tableurs électroniques peuvent être par exemple utilisés pour la planification des ressources de production. La simulation à évènements discrets est aussi souvent employée pour modéliser des systèmes manufacturiers. Il est possible de se servir de la simulation pour supporter des décisions stratégiques, tactiques ou opérationnelles [Terzi et Cavalieri, 2004]. Dans [Cardin et Castagna, 2011] la simulation a été utilisée pour anticiper le comportement d'un système de production en se basant sur les différents choix effectués par les opérateurs.

La simulation peut être utilisée aussi pour évaluer l'impact des changements imprévus lors de l'exécution de la fabrication sur le plan de production [André et Charpentier, 2005] [Pfeiffer et al., 2007], ou encore pour évaluer la pertinence d'une stratégie de production [Zülch et al., 2011]. Lors des études de simulation, il est également possible d'utiliser des plans d'expériences pour résoudre des problèmes industriels dans le monde réel [Kleijnen et al., 2005]. C'est une technique qui permet de concevoir des expériences offrant un grand nombre d'informations sans avoir simulé toutes les combinaisons possibles, mais tout en assurant une robustesse de la réponse (prise en considération des facteurs non contrôlables).

Plusieurs travaux d'amélioration des performances des chaînes logistiques se sont fondés sur l'approche de simulation. Elle est un outil d'aide à la décision permettant de vérifier la viabilité des décisions prises à un niveau fin et d'évaluer leurs performances. Les différentes techniques de simulation peuvent être présentées selon le type de problèmes modélisés et le niveau de décision utilisé (niveau stratégique, tactique, opérationnel). Ces niveaux de décisions se différencient en fonction de la fréquence à laquelle une décision est prise et du laps de temps pendant lequel elle a un impact [Anthony, 1965] [Chopra et Meindl, 2007]. Au niveau stratégique, la prise des décisions est difficile, car les prévisions sur les demandes des clients sont très incertaines. Par conséquent, la modélisation et la simulation stochastiques sont nécessaires pour élaborer un plan stratégique. Au niveau tactique, la prévision de la demande peut être simplement une estimation, si c'est avec des caractéristiques stochastiques, la simulation est le meilleur choix.

Ainsi, la simulation dépend de la nature des processus composant la chaîne logistique, la simulation à événements discrets (DES) et la dynamique des systèmes (SD) sont deux approches de modélisation / simulation pour les chaînes logistiques respectivement discrètes et continues. Ces deux approches sont largement utilisées comme des outils d'aide à la décision dans la gestion de la chaîne logistique. Selon [Tako et Robinson, 2012], il existe une conviction répandue selon laquelle la SD est principalement utilisée pour modéliser les problèmes à un niveau stratégique, tandis que la DES est utilisée à un niveau opérationnel / tactique. Ces deux techniques sont généralement conçues pour comprendre le comportement des systèmes au fil du temps et pour comparer leurs performances dans différentes conditions [Sweetser, 1999]. Les deux techniques présentent certaines différences techniques de modélisation, la DES modélise les systèmes sous la forme d'un réseau de files d'attente et d'activités où les changements d'état se produisent à des instants précis, tandis que les modèles SD représentent

un système sous la forme d'un ensemble de stocks et des flux où les changements d'état se produisent continuellement dans le temps [Brailsford et Hilton, 2001].

Dans la littérature, les deux techniques présentent certaines différences techniques de modélisation liées à leurs principes sous-jacents. Par exemple, compte-tenu de la nature des problèmes modélisés à l'aide de chaque technique de simulation, l'approche SD est jugée appropriée lorsqu'on adopte une perspective "distante" (au sens stratégique), où les événements et les décisions sont perçus sous la forme de modèles de comportement et de structures du système [Richardson, 1991] [Robinson, 2004]. La technique SD se concentre principalement sur les questions stratégiques à un niveau agrégé. Elle a été utilisée aussi pour étudier l'impact de l'effet coup de fouet [Rozman et al., 2014]. Quant à l'approche DES, elle est appropriée pour les niveaux décisionnels tactiques et opérationnels. En outre, la DES a tendance à être adaptée aux analyses de processus détaillés, à l'utilisation des ressources, à la mise en file d'attente et relativement aux analyses à court terme [Kellner et al., 1999]. Il est également démontré que la DES est également davantage utilisée pour l'analyse au niveau stratégique. Dans [Castagna et al., 2014] , les auteurs ont développé une approche de modélisation de réseau de valeur et un modèle de simulation à événements discrets comme support pour l'évaluation stratégique et la prise de décision.

Plusieurs approches sont utilisées pour la modélisation/simulation des chaînes logistiques hybrides. Ces approches font référence à une combinaison des aspects discrets et continus pour analyser un système complexe. Plusieurs conceptions ont été utilisées pour modéliser l'aspect hybride des chaînes logistiques. La première consiste à combiner les deux approches DES et SD. Elle est basée sur l'utilisation de deux modèles de simulation sur des niveaux de décisions différents. Généralement la SD est utilisée à un niveau stratégique pour modéliser le système global de l'entreprise, et la DES est dédiée à la modélisation des unités sélectionnées de l'entreprise, en particulier aux niveaux opérationnel et tactique de la prise de décision. Dans [Rabelo et al., 2005], qui étudie un système d'entreprise de fabrication intégrée, la DES a été utilisée pour modéliser les décisions de production locales de certaines parties de l'entreprise, tandis que le modèle de SD prenait en compte les effets à long terme de ces décisions sur l'ensemble de l'entreprise et les interactions entre les décisions prises à différents niveaux de gestion. Ainsi, plusieurs approches de simulation hybride ont été adoptées pour identifier les conceptions de méthodes mixant les deux méthodes SD et DES, et ceci dans le but de modéliser les processus respectivement continus et discrets [Morgan et al., 2016]. La première approche

consiste à utiliser les deux méthodes en parallèle. Dans cette approche, les méthodes sont appliquées de manière totalement indépendante pour permettre de mieux comprendre le même problème et de formuler des hypothèses sur les raisons du comportement observé. Les deux méthodes ont une vision identique sur la modélisation globale du problème, définissant le même niveau de détail du système dans le but de capturer la même limite du fonctionnement du système, et ainsi, d'obtenir les mêmes résultats. Les deux méthodes s'appliquent d'une manière équitable. [Morecroft et Robinson, 2006] présentent une étude qui applique la DES et la SD au même problème de modélisation d'une pêcherie à des fins de comparaison. L'objectif est d'examiner la manière dont les deux méthodes peuvent être considérées comme complémentaires lorsqu'elles sont utilisées en parallèle. La deuxième approche consiste en une combinaison séquentielle (chaînage) des deux méthodes dans les deux sens (SD puis DES ou DES puis SD) avec des dominances différentes. Dans cette approche, le premier modèle SD est utilisé et appliqué intégralement pour capturer l'ensemble du système de problème étudié, tandis que le deuxième modèle DES est mis au point pour modéliser une partie spécifique du système. La DES est donc utilisée en complément du premier modèle. [Brailsford et al., 2004] discutent une approche qui peut être décrite comme la combinaison séquentielle (chaînage) des deux méthodes : SD puis DES. Cette étude de cas a été lancée en tant que projet de développement durable. Il existe dans la littérature d'autres exemples qui utilisent la même approche [Chatha et Weston, 2006] [Su et Jin, 2008]. La troisième approche décrit l'interaction des deux méthodes. Dans cette approche hybride, le premier modèle SD est utilisé pour donner une vue d'ensemble du système et la DES représente une partie spécifique du système. Les deux méthodes ont la même dominance dans le développement d'une étude. Les deux modèles sont développés dans le but de créer un modèle final unique, dans lequel les deux méthodes interagissent en échangeant les données. [Venkateswaran et Son, 2005] présentent une étude destinée à développer un plan intégré de planification et d'ordonnancement de la production, un cas où un modèle SD interagirait avec un modèle DES sur des pas de temps fixes. Dans ce cas, les modèles s'exécutent pendant une période de temps définie et les données sont échangées avant que les modèles ne s'exécutent à nouveau pour la même période de temps définie. Le modèle DES capture un sous-système du modèle SD et de nouvelles valeurs optimales pour des variables spécifiques tirées du modèle DES sont introduites dans le modèle SD. La quatrième approche consiste à intégrer les deux méthodes et ainsi obtenir des modèles hybrides. Les modèles DES et SD modélisent le système le plus précisément possible en fonction du type de simulation. Les propriétés de la DES sont utilisées pour modéliser des éléments du système qui n'ont pas été capturés avec un niveau de granularité suffisant dans un modèle SD. En raison des

conceptions différentes du DES et du SD, il est donc nécessaire d'indiquer clairement le rôle que chaque méthode aura dans le modèle intégré. Dans [Rabelo et al. , 2007], la DES interagie avec le modèle de SD global dans une approche de rétroaction intégrative dont l'objectif est d'offrir un outil fiable de prise de décision et d'analyse des performances permettant de prendre en compte les interactions et les interdépendances au sein des systèmes d'entreprise intégrés. Dans le même sens [Helal et al., 2007] présentent une étude utilisant l'intégration complète de SD et DES qu'ils appellent « SDDES ». Le modèle hybride ainsi obtenu utilise la modélisation à temps continu avec l'inclusion d'événements discrets pour simuler une entreprise de fabrication. Ce modèle hybride préserve l'intégrité des deux paradigmes de simulation. Plusieurs auteurs ont développé la même approche [Reiner et Trcka, 2004] [Albrecht et al, 2014]. Une autre approche de modélisation des chaînes logistiques hybrides consiste à combiner des aspects déterministes et stochastiques (dynamiques) d'un système pour évaluer certains critères de performance. L'objectif n'est pas la recherche de la meilleure solution mais le test de stratégies. [Ingalls, 1998] souligne que seule une démarche de simulation permet de trouver des solutions robustes face aux systèmes complexes soumis à des variances importantes des variables de décisions. Car dans un modèle d'optimisation, face à de telles variations, la fonction objectif peut tout simplement changer d'une période à une autre. En effet, le facteur temps est important dans le pilotage de tels systèmes, et malheureusement les modèles d'optimisation ne permettent, de ce fait, pas l'intégration de façon systématique.

2.2. Approches basées sur la simulation et l'optimisation

Plusieurs approches hybrides d'optimisation-simulation émergent dans la littérature sur la conception et la planification de la chaîne logistique. Ainsi plusieurs motivations nous amènent à utiliser ces approches hybrides basées sur l'optimisation-simulation. La première consiste à tester la robustesse des solutions trouvées par l'optimisation qui génère une bonne solution à partir de données déterministes. Cependant, un certain nombre de paramètres aléatoires intervient dans le réel, et ces aléas peuvent dégrader une solution. La simulation vise donc dans un premier temps à tester la robustesse d'une solution trouvée par des algorithmes d'optimisation dans un environnement aléatoire. La deuxième motivation consiste à fournir un outil d'aide à la décision pour les gestionnaires dans le but d'orienter leurs choix en analysant les résultats. Ainsi, suite à une étude par simulation, des défauts de configuration peuvent être détectés, et par la suite, des conclusions et des corrections peuvent être réalisées. Suite à ces corrections, de nouvelles études par simulation peuvent être lancées jusqu'à l'obtention de la

bonne configuration. [Truong et Azadivar, 2003] ont développé une approche hybride d'optimisation pour résoudre le problème de conception de la chaîne logistique. Cette approche combine la simulation, la programmation mixte en nombres entiers, et un algorithme génétique. L'algorithme génétique fournit un mécanisme pour optimiser les variables qualitatives et politiques. Le modèle de programmation en nombres mixtes réduit les efforts de calcul en manipulant des variables quantitatives. Enfin, la simulation est utilisée pour évaluer les performances de chaque configuration de la chaîne logistique. Dans ce sens, les travaux de [Lee et Kim, 2002], montrent un chaînage de simulation et d'optimisation dans le cas d'un système de production et de distribution. La simulation est utilisée pour vérifier les hypothèses de capacité utilisée par un modèle linéaire dans un environnement plus réaliste avec des pannes de machines. Dans [Umeda et Lee, 2004] les auteurs décrivent une spécification de conception pour un système générique de simulation d'une chaîne logistique. Le système de simulation proposé est basé sur des méthodes de contrôle axées sur les calendriers et les stocks pour soutenir la gestion de la chaîne logistique. Ils décrivent la conception de chaque composant et membre de la chaîne logistique, ainsi que la planification, le contrôle et le fonctionnement de la chaîne. Les exigences en matière de données d'interface qui prennent en charge l'échange d'informations et le partage entre les membres de la chaîne sont ainsi identifiés.

Le couplage et/ou le chaînage de la simulation et de la programmation linéaire (mixte-entière) sont largement utilisés pour la planification de la chaîne logistique. Dans ce type d'approche, le modèle de simulation est utilisé pour évaluer la faisabilité opérationnelle, et pour ré-estimer la capacité du système de production au niveau de la planification. Le couplage programmation linéaire/simulation a été utilisé par [Byrne et Bakir, 1999] et [Byrne et al., 2005] qui se sont basés sur la démarche décrite sur la Figure 5.6. Cette approche combine deux modèles : un modèle mathématique pour élaborer un plan de production optimale en termes de coûts, et un modèle de simulation pour vérifier si ce plan est réalisable. Dans le cas contraire les capacités considérées dans le modèle mathématique sont réévaluées. Dans le même sens, [Kim et Kim., 2001] ont proposé une approche de couplage où les statistiques obtenues par le modèle de simulation permettent de réajuster la capacité de chaque ressource utilisée dans un modèle de planification multi-ressources.

Plus récemment, [Almeder et al., 2009] combinent un modèle d'optimisation et un modèle de simulation à événements discrets, destinés à faciliter les décisions opérationnelles. Ce couplage vise à déterminer les variables de décision de la simulation en utilisant l'optimisation.

L'objectif est la détermination des valeurs optimales des variables de décision de la simulation via l'optimisation. Sur la base des simulations initiales, les paramètres de coût, les temps de production et de transport sont estimés pour le modèle d'optimisation. Ensuite, la solution du modèle d'optimisation est traduite en règles de décision pour la simulation à événements discrets. Dans [Benghalia et al., 2014] les auteurs ont proposé une approche basée sur le chaînage d'un modèle d'optimisation et d'un modèle de simulation pour déterminer la stratégie la moins coûteuse pour le transfert ferroviaire massifié de conteneurs entre le terminal maritime Atlantique et le futur terminal multimodal du port du Havre. L'outil de simulation à événements discrets a été réalisé en utilisant le logiciel Flexsim CT. Les variables de décision de la simulation sont déterminées par l'optimisation grâce au logiciel Cplex.

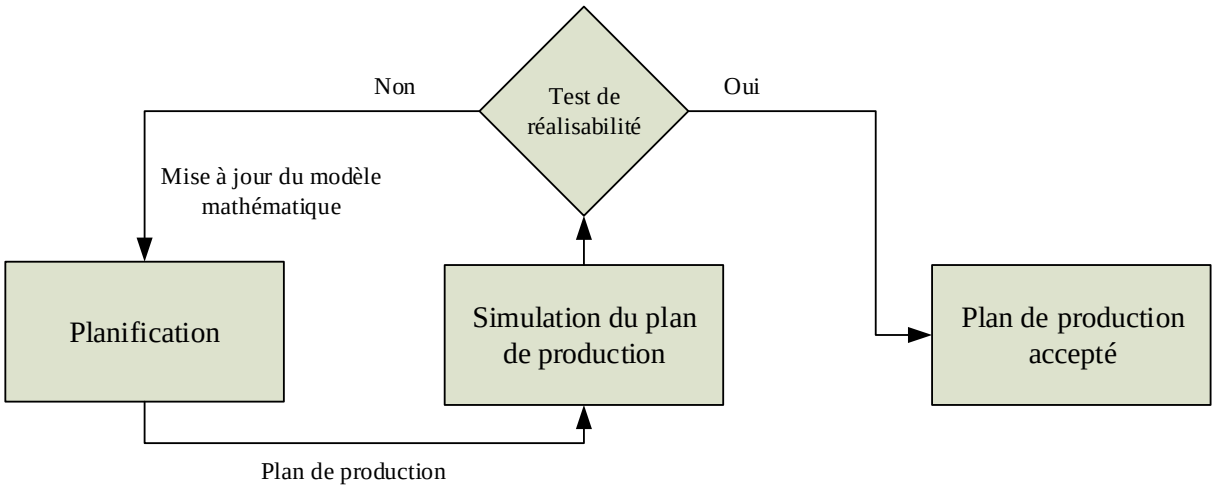


Figure 5. 6- Approche de couplage [Byrne et Bakir, 1999]

À partir de cette recherche bibliographique effectuée, nous pouvons constater que les articles analysés ne s'intéressent pas à une description explicite des principes et des fondements de la modélisation/simulation effectuée avant les différents couplages effectués avec l'optimisation, mais plutôt à une description juste du principe de couplage réalisé au sujet de l'évaluation des performances. Les modèles développés dans la littérature ne reproduisent pas tous les différents maillons constituant les différents processus de la chaîne logistique avec une granularité fine.

En effet, notre analyse bibliographique nous laisse penser que l'apport de ce travail consiste à présenter le processus de modélisation/simulation avec une granularité fine en représentant ainsi les différents éléments définis dans une simulation à évènements discrets, et aussi à présenter d'une manière claire le principe de couplage consistant à évaluer par la simulation à évènements discrets les performances des plans résultants de l'optimisation.

3. Mise en œuvre de la méthodologie de modélisation

3.1. Contexte et objectifs de modélisation

L'état de l'art présenté dans la section précédente a fait apparaître un ensemble de problèmes auxquels les industriels sont confrontés. En effet, il s'agit d'évaluer les performances des ILS (systèle logistique industriel) par la simulation, afin de donner une vue complète sur leur fonctionnement. En plus, dans un contexte d'adoption des approches hybrides, la simulation présente plusieurs objectifs et formes d'usage dans ces approches. Parmi ces usages, nous adoptons dans ce chapitre le chaînage des méthodes d'optimisation et des outils de simulation. Cette démarche permet tout d'abord de trouver des résultats à l'aide des méthodes mathématiques et ensuite de tester le fonctionnement du système par simulation.

Compte-tenu de la méthodologie de modélisation présentée dans le Chapitre 3, cette partie consiste mettre en œuvre cette méthodologie, ainsi que l'environnement de la modélisation pour l'évaluation des performances des ILS. L'objectif principal est de traduire le modèle de connaissance complet du système en vue d'évaluer les critères de performance au moyen de la simulation à événements discrets et ainsi, d'approuver la solution envisagée par les industriels.

Nous rappelons que la traduction du modèle de connaissance dans un langage général de simulation (modèle d'action) n'est pas une tâche aisée et demande une grande capacité d'abstraction. De plus, les langages généraux de simulation reposent sur un formalisme qui est souvent difficile à acquérir rapidement. Il est donc intéressant de proposer une traduction sémantique du modèle de connaissance en un modèle d'action à partir d'un langage général de simulation. Ainsi, nous nous assurons que si le modèle de connaissance est validé, le modèle d'action déduit le sera également.

La mise en œuvre de la modélisation doit permettre aux experts d'avoir un modèle fonctionnel dynamique du ILS, afin d'évaluer les critères de performances associés. Dans ce contexte, le choix d'un langage de simulation s'avère être d'une importance primordiale. Le choix qui a été fait porte sur le langage de simulation SIMUL8.

Dans ce qui suit, nous allons proposer des règles de traduction du modèle de connaissance, afin de pouvoir construire de manière cohérente le modèle fonctionnel dynamique du système étudié. Cette traduction est réalisée au moyen de règles strictes concernant les différentes activités (décisionnelles et de transformation) du processus logistique étudié.

3.2. Passage au modèle d'action pour l'évaluation des performances : application au MAROC-Phosphore

Dans cette partie, l'illustration de la méthodologie de modélisation est appliquée au système industriel de Maroc-Phosphore, et ceci en vue d'élaborer un modèle de simulation. Ainsi, à partir du modèle de connaissance complet, présenté dans le chapitre 3, et après une traduction dans un langage de simulation, un modèle d'action est obtenu. En effet, il s'agit de traduire le réseau d'écoulement des flux et plus particulièrement le graphe multi-flots en termes de primitives du langage de simulation choisi. La traduction du modèle de connaissance comprend les étapes suivantes :

- discrétisation des flots du graphe multi-flots au moyen du passage de flux continu au flux discret (§3.2.1) ;
- traduction des sous-systèmes phtisique, logique et décisionnel du modèle de connaissance et les liens entre eux.

La présentation détaillée des principes de modélisation et des conventions utilisées pour la construction du modèle de simulation seront donnés par la suite.

3.2.1. Passage d'un flux continu à un flux discret

A l'intérieur des modèles de simulation dynamiques, pour lesquels le comportement est une fonction du temps, nous distinguons :

- *les modèles continus,* qui sont plus adaptés aux flux continus, qui utilisent des équations mathématiques différentielles pour prendre en compte les changements d'état qui s'effectuent de façon continue au cours du temps (le débit, la densité, …). Les valeurs des variables d'état sont recalculées régulièrement selon un pas d'horloge d'après ces équations.
- *les modèles à événements discrets (ou discontinus),* dont le flux est discret (dont on peut compter les éléments), et dans lesquels les changements d'état se décrivent par les événements, tels le début ou la fin d'une opération, la mise en attente d'une pièce dans un stock, la libération d'une ressource,…etc. Dans une simulation à événements discrets, les flux essentiels que l'on examine sont composés d'éléments isolables que l'on peut dénombrer et identifier individuellement. Ces éléments sont couramment appelés "Entités" ou "Items".

- *les modèles combinés (ou mixtes)*, ce sont des modèles qui intègrent les deux aspects, en effet lorsque dans les flux continus se mêlent au discret.

En effet, le flux continu est caractérisé par le passage d'une quantité dq entrante ou sortante d'un processus continu au cours d'un laps de temps dt, ainsi la valeur dq/dt est définie comme un débit dans les ILS.

Le passage d'un flux continu à un flux discret consiste à segmenter le flux selon une maille temporelle, pour créer des entités qui entrent et sortent du processus continu à un intervalle de temps régulier t. Cette entité est caractérisée par un poids (valeur massique) qui correspond au produit de son débit (utilise la même unité de temps que t) par cet intervalle. La Figure 5.7 représente le passage d'un flux continu à un flux discret, chaque processus continu possède l'entrée de deux intrants et la sortie d'un extrant.

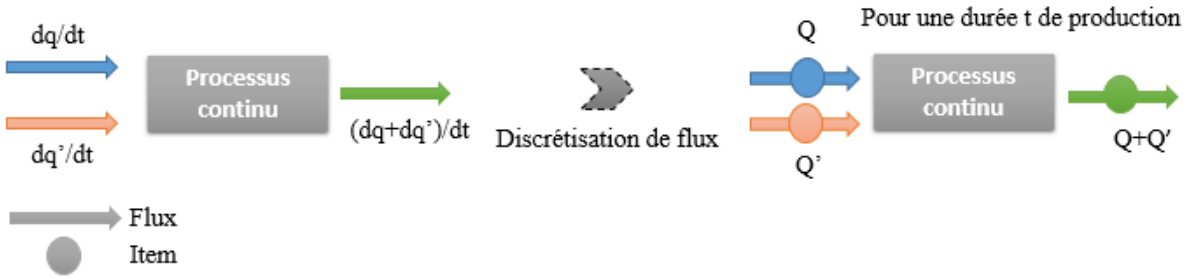


Figure 5. 7- Discrétisation d'un processus continu

3.2.2. Traduction des sous-systèmes physique, logique et décisionnel

Le modèle de simulation à événements discrets opère avec des entités physiques constituant les flux discrets, qui se déplacent individuellement à travers le modèle suivant les événements survenant dans le système. Les paragraphes suivants synthétisent la traduction du modèle de connaissance en vue d'obtenir le modèle d'action (le modèle de simulation).

3.2.2.1. Primitives de base utilisées par le simulateur à évènements discrets SIMUL8

La modélisation d'un système de production par la simulation à événements discrets utilise des progiciels de simulation qui nécessitent la manipulation d'un ensemble d'éléments appelés « primitives de base » ; des entités ou des items qui circulent dans le système et qui sont émis par des points d'entrée. Par la suite, elles sont traitées dans des processeurs pendant une durée donnée, et stockées dans des stocks qui peuvent être transitaires ou caractérisés par

un temps d'attente (durée minimale de séjour), ces entités quittent ensuite le système par des points de sortie. La liaison entre ces différentes primitives est assurée par des flèches. SIMUL8 est un environnement de simulation à événements discrets, il requiert dans un premier temps de modéliser le système à étudier. Il s'agit de déposer les différentes primitives (machines, des stocks, etc.) dans une interface graphique, puis de décrire leurs lois de fonctionnement et leurs interactions. C'est ainsi que nous détaillons dans ce qui suit les primitives de base utilisées par le simulateur à événements discrets utilisé SIMUL8.

- *Item ou entité* : c'est un élément isolable composant de flux discret. Il modélise les objets, les personnes dans un système productif, ou des informations (commandes …), qui arrivent dans un système pour subir un ensemble de traitements. Il se déplace individuellement à travers le modèle. L'objectif étant de contrôler le flux circulant dans le système. Chaque item est caractérisé par des attributs ou des valeurs spécifiques appelées labels. Chaque label est caractérisé par un cycle de vie, qui décrit la succession des points de passage entre son arrivé et son départ du système productif.

- *Point d'entrée :* Correspond à un élément qui génère les items dans un système productif. Il permet d'introduire l'item dans le système en lui affectant les valeurs initiales définis par les labels. Chaque item entrant correspond à une loi d'arrivée stochastique ou déterministe. Cette loi caractérise la distribution de probabilité de l'intervalle de temps séparant deux arrivées successives d'items au point d'entrée considéré.

- *Activité ou processeur* : c'est un élément qui prélève un item d'un autre élément (stock ou un autre processeur), il a pour fonction d'exécuter un traitement d'un ou plusieurs items. Une fois le traitement achevé, le produit résultant, qui peut correspondre à un ou plusieurs items, est envoyé dans un ou plusieurs stocks. Ce traitement a pour objet de modifier les caractéristiques de ces items par la transformation, l'analyse ou le transport. Il peut aussi modifier les valeurs des labels associés à ces items. Ce processeur traite les items pendant un temps de cycle qui correspond à un délai fixé dans une unité de temps appropriée. Ce temps opératoire peut être déterministe ou aléatoire. Ce processeur peut prélever plusieurs items d'un ou plusieurs stocks, ces items peuvent être de la même nature, par conséquent l'opération de prélèvement suit une logique de lotissement, dans le cas contraire, l'opération suit la logique d'assemblage. Ces processus mobilisent l'utilisation d'un ou plusieurs ressources (humaines ou matérielles). Lorsque le

processeur a un temps opératoire nul, il est qualifié d'un processeur fictif ou passif qui peut être utilisé dans le système productif pour décrire le routage en entrée ou en sortie de plusieurs items. Dans un processeur, il est également possible d'ajouter des labels supplémentaires en plus des labels déjà définis dans le point d'entrée, pour un meilleur pilotage du système productif.

- *File d'attente ou Stock* : C'est un élément qui permet d'accumuler des items entre deux processeurs. Il peut recevoir des items provenant d'un ou plusieurs points d'entrée ou processeurs. C'est un endroit où les items séjournent sans subir un traitement. Il est toujours passif, dans le sens où il n'envoie pas d'items vers les processeurs sans que ceux-ci n'en fassent explicitement la demande. Un stock possède plusieurs caractéristiques (capacité maximale, durée maximale de séjour d'un item…). Les stocks peuvent être gérés de différentes façons : FIFO, LIFO, avec critère de priorité, etc.

- *Point de sortie* : C'est un point de libération de l'item ayant circulé dans le système productif. À des fins de contrôle lors de la mise au point d'un modèle de simulation, un point de sortie peut être remplacé par un stock passif ou fictif.

- *Circuit ou Route* : Correspond à des flèches reliant les différentes primitives citées auparavant. Une route représente les déplacements des items dans le système productif. Un temps de déplacement est parfois associé à ces déplacements. Le chemin emprunté par les items est contrôlé par les valeurs des labels et les règles de pilotage associées.

- *Ressource* : C'est un facteur productif (matériel, opérateur…) indispensable à l'exécution d'une opération sur un item dans le processeur. Elle peut être partagée par plusieurs processeurs. Il est possible de définir un temps de transport d'une ressource pour chaque couple origine-destination créé dans le système productif. Plusieurs caractéristiques sont associées à une ressource, comme la disponibilité de la ressource qui peut être fixe ou variable au cours d'une période donnée.

- *Module :* C'est une primitive générique composée d'un ensemble d'éléments décrits précédemment, comportant un point d'entrée et un point de sortie. Un module permet de modéliser des sous-systèmes autonomes dans un modèle. Par exemple, un maillon opérationnel composé de plusieurs unités constituées par un grand nombre d'éléments.

Les entités, les processeurs et les stocks constituent des éléments physiques importants pour l'établissement d'un modèle de simulation à évènements discrets. Pour faire fonctionner le modèle, afin de prélever les informations nécessaires, nous avons aussi besoin d'éléments logiques, nous distinguons ainsi :

- *Les variables* : représentent les valeurs caractérisant les éléments du système global. Chaque variable est atteignable depuis n'importe quel élément physique (processeur, stock...) du modèle de simulation. Ces variables sont appelées aussi variables globales dans les langages de programmation. Aux moyens de ces variables, il possible de modéliser de décisions globales lors de la traduction du sous-système décisionnel.

- *Les Labels ou attributs* : représentent des variables spécifiques à un item donné qui sont associées à ce dernier pendant sa durée de vie dans le modèle. Elles représentent des caractérisâtes spécifiques aux items comme les heures d'arrivée et de sortie de l'item dans le système, le temps de cycle de cet item dans un processeur donnée, etc. Plusieurs items différents ou identiques peuvent porter le même attribut, mais celui-ci pourra avoir des valeurs différentes. Ils permettent par exemple de modéliser la gamme de fabrication d'un produit.

3.2.2.2. Le sous-système physique

Pour traduire le modèle de connaissance du sous-système physique de manière exhaustive dans un langage de simulation, il faut modéliser avec les primitives du langage les entités suivantes :

- les entités de production ;
- les entités de stockage ;
- les entités de transport ;
- les entités de distribution ;
- les liens entre ces moyens (les chemins) ;

Il faut ensuite, les décomposer en entités élémentaires d'après le modèle de connaissance. A l'issue de cette décomposition, il est possible de recueillir les attributs et les méthodes de tous les objets identifiés.

La finalité de cette étape est la spécification de l'ensemble de toutes les entités physiques capables de réaliser les opérations de transformation fonctionnelle et les opérations de transfert

composant le système modélisé.

En effet, il s'agit de traduire le graphe multi-flots du modèle de connaissance (cf. chapitre 3 Figure 3.41) aux moyens des primitives dans l'environnement de SIMUL8, et de compléter cette traduction avec les propriétés et les attributs propres à chaque classe d'entités appartenant au modèle de connaissance. Les nœuds source et puits sont modélisés respectivement par les points d'entrée et de sortie. De manière générique, chaque entité élémentaire (ligne de production, convoyeur, hangar, ….) est modélisée par un couple processeur/ressource. L'utilisation de ce couple permet de spécifier d'une part les méthodes des entités (produire ou transporter) et leurs attributs.

3.2.2.3. Le sous-système logique

La spécification du sous-système logique est orientée produit, c'est-à-dire orientée élément de flux de matières. Ainsi, lors de la traduction dans le modèle de simulation, à chaque produit est affecté un type d'« item ». Chaque type d'item définit alors un circuit effectivement parcouru par un flux de matières au cours de son élaboration, les éléments de ce flux étant les produits eux-mêmes. Ce circuit est déterminé à partir de la gamme logique dans laquelle seules les opérations types sont décrites (production, stockage...). Les attributs de chaque item permettent d'exprimer les données techniques nécessaires à la simulation. De cette façon, chaque item traverse un ensemble d'opérations définies dans le modèle de connaissance. Pour chaque opération le type d'opération et le type de ressources utilisées sont connus.

3.2.2.4. Le sous-système décisionnel

La structuration du sous-système décisionnel nous permet de réaliser l'intégration des différentes activités de production (ou fonctions), afin de pouvoir modéliser la gestion du processus industriel et la prise de décision. Intégrer les activités (ou fonctions) techniques et organisationnelles de production dans le modèle de simulation signifie réaliser l'inclusion (au sens prise en compte explicite) et la coordination de ces fonctions, mises en œuvre aux différents niveaux d'un système, en vue de permettre, par le principe d'émergence, un fonctionnement harmonieux et efficace du modèle de simulation.

Pour élaborer la structure du sous-système décisionnel dans le modèle de simulation, nous proposons une démarche qui permet d'obtenir de manière systématique la structure hiérarchique du sous-système décisionnel lors de la construction du modèle de simulation du

système étudié : la structure du sous-système décisionnel est modélisée en exploitant l'arborescence qui modélise la décomposition hiérarchique du sous-système physique. L'hypothèse suivante est adoptée : toute entité complexe ne peut exister sans une structure décisionnelle minimale qui permet, au moins, la prise en charge des interactions de cette entité avec son environnement. En conséquence, à toute entité complexe α (i.e. décomposable - unité de production, par exemple) du sous-système physique, est associé un et un seul centre de décision δ nommé coordonnateur. D'autre part, à toute entité non décomposable (ligne de production, convoyeur, …) du sous-système physique est associé un centre de décisions local. Le rôle d'un coordonnateur δ associé à α est de gérer les conflits et les communications entre les règles dites locales à α, c'est-à-dire qui concernent les entités qui composent α (entité de production, de stockage…, par exemple). Un coordonnateur δ associé à α a donc un échelon de valeur égale à la valeur de la strate de α. L'ensemble des coordonnateurs est noté D. Une structuration hiérarchique de D est ensuite établie en introduisant une relation binaire nommée « coordonne » et sa duale nommée « est rattaché à ». Le graphe de la relation binaire « coordonne » est une arborescence déduite de l'arborescence de la décomposition hiérarchique du sous-système physique et isomorphe à cette arborescence. Chaque coordonnateur δ est représenté dans le modèle de simulation au moyen d'un ensemble « stock amont - processeur fictif – stock aval ». Le rôle de cet ensemble est de vérifier que les ressources nécessaires pour le traitement d'un flux (produit) dans un procédé continu sont disponibles et les contraintes de capacité sont respectées.

Les règles de gestion/pilotage exprimées dans le modèle de connaissance sont implantées dans l'ensemble des centres de décision noté Dc. Les associations du modèle UML du sous-système décisionnel (« renseigne/est renseigné », …) sont exploitées pour définir des relations entre les centres de décision et les sous-systèmes logiques et physiques, et entre les centres de décisions eux-mêmes. Chaque centre de décisions est traduit dans le modèle de simulation au moyen d'un processeur qui représente l'entité concernée.

3.2.3. Elaboration du modèle de simulation

L'élaboration du modèle de simulation (Annexe 3) repose sur la traduction des modèles de connaissance des trois sous-systèmes et leurs relations. On ajoute également les instructions propres à la simulation et les structures de données utilisées pour la modélisation des données

techniques du système. En effet, il s'agit de traduire dans le formalisme de l'environnement de simulation le modèle de connaissance complet qui fournit :

- la description détaillée des différents objets des trois sous-systèmes et leurs relations ;
- la topologie et la structure du réseau d'écoulement des flux ;
- le graphe multi-flots.

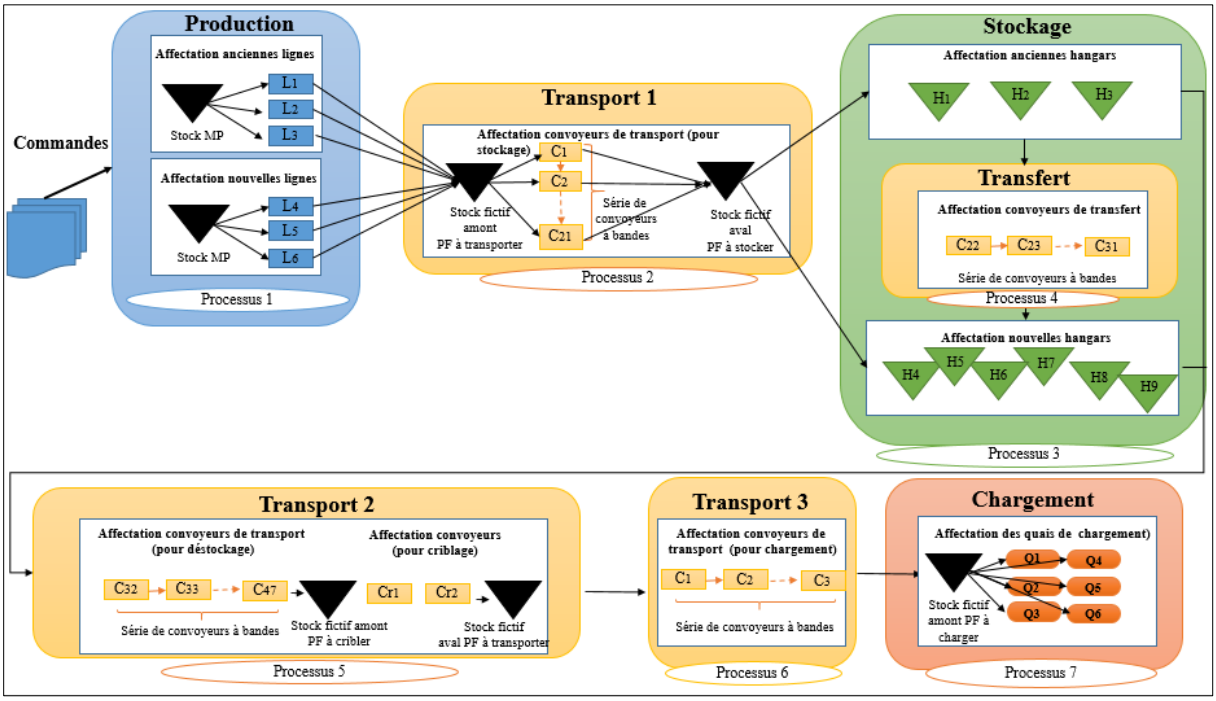


Figure 5. 8- Modélisation du processus de production, stockage et enlèvement des engrais implémentée dans Simul8

La Figure 5.8 schématise de manière synthétique la modélisation des différents processus de production, de stockage, d'extraction et de chargement implémentés dans l'environnement de simulation SIMUL8. Chaque Item (famille de produits ou produit en fonction de l'horizon de planification) passe de manière successive suivant la gamme et la faisabilité sur les différents processus de fabrication, de transport, de stockage, de transport et de chargement. Tous ces processus utilisent des ressources dont l'affectation se fait lors d'un processus décisionnel réalisé par les primitives modélisant le sous-système décisionnel en fonction de l'état du système.

Les différents processus sont modélisés par des processeurs munis de stocks amont et des ressources modélisant les différents objets du sous-système physique. L'ensemble « stock-processeur » permet de modéliser d'une part l'opération de traitement, et d'autre part, le processus décisionnel d'affectation de la ressource nécessaire, et ainsi de modéliser le centre de décision concerné. Les attributs des différents items sont introduits dans le modèle de simulation par le « Point d'entrée » qui représente en effet, l'interface d'entrée du réseau d'écoulement des flux (le nœud source du graphe multi-flots). Les différentes interfaces de sortie du réseau d'écoulement des flux (les quais de chargement) sont représentées par les « Points de sortie ». Toutes les primitives utilisées sont reliées par des « Routes » qui représentent les différentes relations entre les objets des trois sous-systèmes d'une part, et les chemins du réseau d'écoulement des flux (les arcs du graphe multi-flots) d'autre part.

Compte-tenu du fait qu'il s'agit de modéliser des procédés continus qui sont discrétisés, les durées des différents processus sont dépendantes de la quantité de produit contenu dans chaque item. Ainsi sont définis :

- Le poids de l'entité qui représente la quantité de l'engrais qui circule dans un intervalle de temps. Il faut garder en tête que les débits des convoyeurs qui transportent les différents items dépendent des débits des lignes de production. En réalité, leur vitesse est supérieure pour éviter les congestions.

- La capacité d'un stock se définit, dans un simulateur à évènements discrets, par le nombre maximal d'items que le stock peut contenir. Les items qui arrivent dans les hangars d'engrais ne peuvent pas avoir tous le même poids, en raison de l'hétérogénéité de la capacité des lignes de production. Dans ce cas, les stocks utilisés sont définis par un poids maximum : la capacité utilisée du stock est décrémentée du poids d'un item sortant, et incrémenté par celui d'un item entrant, lequel n'est accepté que s'il ne provoque pas un dépassement de la capacité. La Figure 5.9 présente le cycle de vie d'un item.

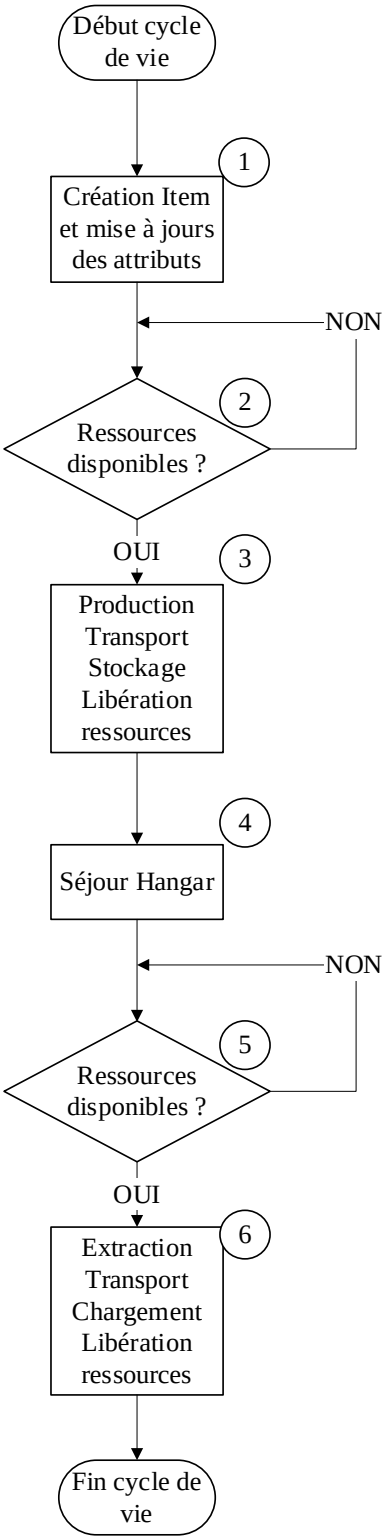


Figure 5. 9- Cycle de vie d'un item pendant la simulation

Comme le montre la Figure 5.9, le cycle de vie d'un item comprend les étapes suivantes :

- La création de l'item : le cycle de vie débute avec la création de l'item par le point d'entrée. Cette étape consiste à charger les données d'entrée depuis une structure de

donnée interne à SIMUL8. Ces données d'entrée représentent les caractéristiques de cet item. Chaque item est associé aux attributs dites « Labels » qui correspondent aux types de ressources utilisées, à la quantité produite (poids), aux types de produits, etc. Il s'agit des données techniques de la production.

- L'étape 2 contrôle la disponibilité simultanée des ressources de production, de transport et de stockage et l'affectation des différentes ressources. Cette étape est réalisée par le coordinateur de l'unité de production (centre de décision) implémenté par un processeur fictif. L'affectation des différentes ressources associées à chaque processsus aux différents items, ainsi que leur routage. La capacité du hangar associé est également vérifiée et mise à jour avec la nouvelle quantité de l'item considéré. Un extrait du programme de vérification est présenté dans l'Annexe 4. La modélisation du coordinateur mobilise l'utilisation d'une composante qui combine trois primitives de base de SIMUL8, deux stocks et un processeur fictif 1 (temps opératoire nul) :

  - En amont, le processeur fictif 1 est alimenté par un stock fictif « Stock amont » qui assure l'admission des items dans le processeur fictif 1. Cette admission ne se fait que si la ressource adéquate est disponible.

  - Le processeur fictif 1, a pour fonction du prélever du stock un item en faisant appel à la ressource adéquate associée à la valeur du label « type de ressource » affecté à cet item. À titre d'exemple, on a retenu dans la Figure 5.10 le type de ressource « ligne de production » et le Label « L ligne ». Ce prélèvement est vérifié par le programme (Figure 5.10) exécuté en admission de l'entité.

  - En aval, après l'affectation des ressources, le processeur fictif 1 fait sortir l'item dans le stock fictif « Stock aval ».

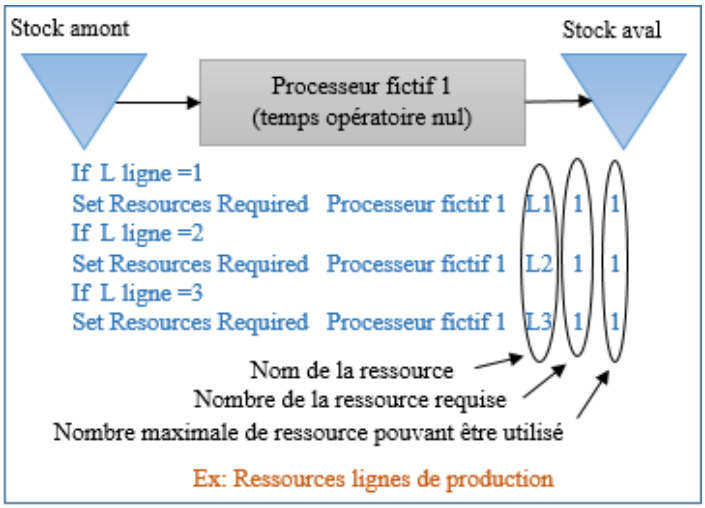


Figure 5. 10- Affectation des ressources

- La troisième étape comprend l'utilisation et la libération de ressources affectées précédemment.

- L'étape 4 modélise le séjour de l'item dans le hangar pour des raisons technologiques.

- La cinquième étape comprend le contrôle de la disponibilité simultanée des ressources de transport et de chargement aux quais et l'affectation des différentes ressources. Cette étape est réalisée par le coordinateur de l'unité de production (centre de décision). Cette deuxième partie décisionnelle du coordinateur est implémentée par un processeur fictif dont le rôle est similaire au précédent.

- L'étape 6 comprend l'utilisation et la libération de ressources affectées précédemment, la mise à jour du stock dans le hangar, et représente ainsi le point de destruction du flux. Ensuite le cycle de vie de l'item se termine.

Il est important de noter que l'évolution des quantités en stock dans les hangars est gérée aux moyens de l'utilisation des labels (ici variables globales) qui représentent, en effet, les attributs des hangars. Ainsi chaque stock (hangar) est caractérisé par les labels ($L_{Capacité\_courante}$ et $L_{Capacité\_maximale}$), dont les valeurs exprimées en quantité, sont initialisées au début de la simulation. Le premier label varie dynamiquement en fonction de l'utilisation instantanée du stock, tandis que le deuxième label est statique et garde sa valeur définie à l'initialisation. Le test de la capacité de stockage au niveau de chaque stock (S) se fait en amont au niveau du processeur fictif de l'affectation des ressources associées à cet item. Ce processeur n'accepte

l'item que si la capacité résiduelle est suffisante, ceci est réalisé par les instructions présentées ci-dessous exécutées avant le prélèvement de l'item.

Si $S\_L_{Capacité\_courante}$+ Item.Poids < $S\_L_{Capacité\_maximale}$;

Alors admettre l'item dans processeur ;

Sinon bloquer le prélèvement de l'item

À l'entrée de l'item dans le stock, la mise à jour de la capacité courante est effectuée par le programme suivant :

$S\_L_{Capacité\_courante}$ <= $S\_L_{Capacité\_courante}$ + Item.Poids

À la sortie de l'item du stock, la mise à jour de la capacité courant est effectuée par le programme suivant :

$S\_L_{Capacité\_courante}$ <= $S\_L_{Capacité\_courante}$ -Item.Poids

La libération des ressources se fait au moyen du processeur qui modélise l'utilisation des ressources affectées à l'item. Le temps opératoire Δ est composé d'un temps variable qui dépend de la quantité (Poids) associée à l'item qui circule, ainsi que le débit de circulation, exprimés respectivement par les labels : L_{Poids} et $L_{Débit}$, et d'un temps fixe μ (qui dépend de la longueur et la vitesse des ressources de transport) $\Delta = \mu + (L_{Poids} / L_{Débit})$.

4. Exploitation du modèle d'action pour l'évaluation des performances

4.1. Chaînage simulation et optimisation : évaluer une solution

Avec l'énorme développement de la performance des outils informatiques, les approches de couplage entre la simulation et l'optimisation offrent une manière intelligente d'explorer simultanément les grandes possibilités offertes par la simulation pour modéliser finement les systèmes et les problèmes étudiés et par la capacité de l'optimisation à trouver des solutions de bonne qualité. La finalité adoptée dans cette partie, et qui consiste à intégrer les deux modèles d'optimisation et de simulation, est d'évaluer les solutions trouvées par l'optimisation qui génèrent une bonne solution en se basant sur un ensemble de données d'entrée statiques. Cependant, l'existence des paramètres aléatoires dans le réel peut dégrader une solution. Par

conséquent l'objectif du modèle de simulation est de tester la robustesse de la solution proposée par le modèle d'optimisation en prenant en considération l'environnement aléatoire. Le modèle de simulation présenté auparavant est développé pour représenter tous les détails du système étudié. Ce modèle est ensuite exploité pour évaluer la performance des solutions proposées par l'optimisation.

Cette approche permet de proposer un outil d'aide à la décision qui consiste à mettre en œuvre les résultats du processus d'optimisation par les planificateurs. Ainsi, à l'aide de la simulation, de possibles erreurs de configuration sont détectées, puis des corrections sur certains choix sont déduites, et par conséquent, de nouvelles simulations sont lancées afin d'obtenir la bonne configuration. Dans cette approche, nous décrivons deux modules en interaction permanente : un module d'optimisation capable de fournir une bonne solution de planification de la production, du stockage et de la distribution des produits en vrac, et un module de simulation capable de tester cette planification. Les résultats obtenus peuvent être analysés et interprétés de manière à apporter des améliorations. Comme la montre la Figure 5.11, l'approche présentée commence par générer un fichier d'instance, ce fichier est le résultat du plan optimal réalisé par le modèle d'optimisation. L'élaboration de ce fichier d'instance permet de charger les données d'entrée du modèle de simulation. Ces données d'entrée représentent le nombre de flots par période. Ainsi, pour chaque flot, nous définissons le nombre et le type de ressources affectées, la quantité de flot qui circule dans le graphe, et le type de produit associé. L'affectation des ressources se fait par type de ressources (de production, de stockage, de transport, et de distribution). Ensuite, ce modèle de simulation vérifie si le planning proposé est réalisable, tout en respectant les contraintes de précédence des affectations des ressources.

Le couplage de l'optimisation et la simulation vise à déterminer les variables de décision de la simulation en utilisant l'optimisation. Autrement dit, ceci consiste à déterminer des valeurs optimales des variables de décision de la simulation via l'optimisation.

Afin de procéder à ce chaînage des deux modèles d'optimisation et de simulation, une première étape qui consiste à définir les données requises et la manière dont elles doivent être échangées est souhaitable. Une démarche de structuration des données consiste à définir :

Structure générale du réseau d'écoulement de flux : comprend les éléments utilisés dans le modèle statique de simulation, ceci est défini par le type et le nombre de ressources dans le système industriel étudié et les liens correspondants entre eux.

Paramètres généraux : utilisés dans les deux modèles d'optimisation et de simulation. Ces ensembles de paramètres incluent toutes les limitations de capacité, les paramètres de coûts, et la demande des produits.

Sorties du modèle d'optimisation : ces résultats de l'optimisation définissent les inputs du modèle de simulation : les résultats de l'optimisation sont utilisés comme des variables de décision dans le modèle de simulation (Ex : quantités produites, stockées et acheminées pour chaque produit, le routage des ressources, les disponibilités des ressources...)

Sorties du modèle de simulation : les résultats de simulation sont principalement les indicateurs de performance (Ex : le taux d'utilisation des ressources, temps moyen d'occupation des ressources de stockage, le nombre de produits livrés…).

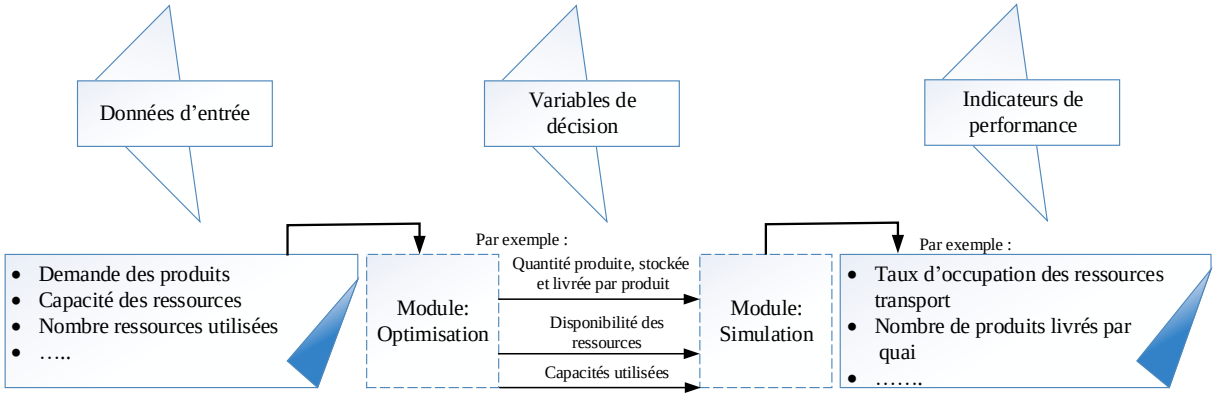


Figure 5. 11- Couplage des modules d'optimisation et de simulation

Comme illustré auparavant dans la modélisation du système de production, de stockage et de distribution des engrais (Figure 5. 8), pour chaque processus (production, stockage, …), nous représentons un ensemble de *k* processeurs parallèles et identique, ces processeurs représentent des processus élémentaires du processus principal et mobilisent un ensemble de ressources *R* du même type, ainsi nous détaillons dans le Tableau 5.1 le nombre des différents processeurs *k* au niveau de chaque processus, ainsi que le nombre de ressources *R* au niveau de chaque processeur. Par exemple, le processus 1 de production est constitué de deux processeurs k_1 pour la production au niveau des anciennes lignes de production et k_2 pour la production au niveau des nouvelles lignes de production. Le processeur k_1 se compose d'un ensemble de trois ressources identiques et parallèles, représentant les lignes de production L_1, L_2, et L_3,. Tandis que le processeur k_2 se compose d'un ensemble de trois ressources identiques et parallèles représentant les lignes de production L_4, L_5, et L_6. Ainsi, nous distinguons trois types de

procesus de transport : le transport 1 composé d'un ensemble de convoyeurs en sortie des lignes de production et des convoyeurs de stockage (en entrée des hangars de stockage). Le transport 2 est constitué d'un ensemble de convoyeurs de déstockage, ainsi que des convoyeurs de transport en entrée des stations de criblage (cribleurs). Pour finir, le transport 3 est dédié aux convoyeurs de chargement en entrée des quais de chargement. L'activité de transfert se fait via des convoyeurs de transport et permet le transfert des produits entre les différents hangars de stockage.

Activités	Processeurs	Ressources
Processus 1 (Production)	K_1 *(anciennes lignes AL)*	$R_{1...3}$ (Lignes de production L_1, L_2, L_3)
	K_2 *(nouvelles lignes NL)*	$R_{1...3}$ (Lignes de production L_4, L_5, L_6)
Processus 2 (Transport 1)	K_1 *(convoyeurs_lignes_AL)*	$R_{1...3}$ (Convoyeurs de transport C_1, C_2, C_3)
	K_2 *(convoyeurs_routage_AL)*	$R_{1...3}$ (Convoyeurs de transport C_4, C_5, C_6)
	K_3 *(convoyeurs_stockage1_AL)*	$R_{1...3}$ (Convoyeurs de transport C_7, C_8, C_9)
	K_4 *(convoyeurs_stockage2_AL)*	$R_{1...3}$ (Convoyeurs de transport C_{10}, C_{11}, C_{12})
	K_5 *(convoyeurs_lignes_NL)*	$R_{1...3}$ (Convoyeurs de transport C_{13}, C_{14}, C_{15})
	K_6 *(convoyeurs_stockage_NL)*	$R_{1...6}$ (Convoyeurs de transport C_{16}, C_{17}, C_{18}, C_{19}, C_{20}, C_{21})
Processus 3 (Stockage)	K_1 *(anciens hangars)*	$R_{1...3}$ (hangars de stockage H_1, H_2, H_3)
	K_2 *(nouveaux hangars)*	$R_{1...6}$ (hangars de stockage H_4, H_5, H_6, H_4, H_5, H_6)
Processus 4 (Transfert)	K_1 *(convoyeurs de transfert)*	$R_{1...10}$ (Convoyeurs de transfert C_{22}, C_{23}, C_{24}, C_{25}, C_{26}, C_{27}, C_{28}, C_{29}, C30, C_{31})
Processus 5 (Transport 2)	K_1 *(convoyeurs_déstockage_AL)*	$R_{1...3}$ (Convoyeurs de transport C_{32}, C_{33}, C_{34})
	K_2 *(convoyeurs_déstockage_NL)*	$R_{1...6}$ (Convoyeurs de transport C_{35}, C_{36}, C_{37}, C38, C_{39}, C_{40})
	K_3 *(convoyeurs_transport1_AL_NL)*	$R_{1...2}$ (Convoyeurs de transport C_{41}, C_{42})
	K_4 *(convoyeurs_transport2_AL_NL)*	$R_{1...2}$ (Convoyeurs de transport C_{43}, C_{44})
	K_5 *(convoyeurs_transport3_AL_NL)*	$R_{1...3}$ (Convoyeurs de transport C_{45}, C_{46}, C_{47})
	K_6 *(convoyeurs pour criblage)*	$R_{1...2}$ (convoyeurs entrée cribleur Cr_1, Cr_2)
Processus 6 (Transport 3)	K_1 *(convoyeurs_transport_chargement)*	$R_{1...3}$ (Convoyeurs de transport C_{48}, C_{49}, C_{50})
Processus 7 (Chargement)	K_1 *(quais_chargement)*	$R_{1...6}$ (Quais de chargement Q_1, Q_2, Q_3, Q4, Q_5, Q_6)

Tableau 5. 1- Activités/processeurs/ressources du système étudié

Après la présentation des différentes composantes des processus du modèle de simulation, nous passons maintenant à la description de l'état du système de production à l'initialisation. Le Tableau 5.2 décrit un exemple de l'état du système à l'initialisation. Ce tableau est généré à partir des résultats du modèle d'optimisation par une Macro VBA. Cette macro permet d'organiser les résultats de la planification sous la forme de flots, chaque flot est représenté par une affectation des ressources associées à chaque processus pour un produit donné, une quantité

donnée, sur une période donnée de l'horizon de planification. L'ordre indiqué dans le tableau est celui de la succession des opérations associées à chaque processus.

Ainsi, nous distinguons trois types de flots : le premier type est associé aux produits fabriqués, stockés et distribués sur la même période de temps de l'horizon de planification, le deuxième concerne les produits fabriqués et stockés sur une période déterminée et pouvant être déstockés dans une période postérieure, tandis que le troisième type est lié aux produits déstockés et distribués sur une période donnée (stockés dans une période antérieure).

N° Flot	**Type Flot**	**N° produit**	**Quantité**	**Processus 1**		**Processus 2**						**Processus 3**		**Processus 4**	**Processus 5**						**Processus 6**	**Processus 7**
				$R_i(K_1)$	$R_i(K_2)$	$R_i(K_1)$	$R_i(K_2)$	$R_i(K_3)$	$R_i(K_4)$	$R_i(K_5)$	$R_i(K_6)$	$R_i(K_1)$	$R_i(K_2)$	$R_i(K_2)$	$R_i(K_1)$	$R_i(K_2)$	$R_i(K_3)$	$R_i(K_4)$	$R_i(K_5)$	$R_i(K_6)$	$R_i(K_1)$	$R_i(K_1)$
1	2	P_1	403	L_2		C_1	C_4	C_7	C_{10}			H_1			C_{32}		C_{41}	C_{43}	C_{45}	Cr_1	C_{49}	Q_3
2	1	P_2	1235		L_4					C_{13}	C_{16}	H_4										
3	3	P_3	780										H_6		C_{37}		C_{42}	C_{44}	C_{46}	Cr_2	C_{50}	Q_6

Tableau 5. 2- Exemple d'initialisation du modèle de simulation

À l'initialisation, les trois types de flots sont représentés par trois types d'items différents :

- *Item 1* : Dans la gestion de la capacité du stock, l'item 1 entrant est caractérisé par le débit de la ligne de production associée, un test de capacité est réalisé, avant l'affectation des ressources associées à cet item, par un processeur fictif, qui n'accepte l'item que si la capacité résiduelle est suffisante. Ce test est réalisé avant le prélèvement de l'item. À l'entrée et à la sortie de cet item dans le stock, une mise à jour de la capacité courante est effectuée.
- *Item 2* : Cet item en entrée du stock est caractérisé par une quantité qui représente le poids de l'item qui va être séjourné dans le stock pendant une durée exprimée en label (*L_Temps*). Les mêmes tests de l'item 1 sont opérés. Le premier test est effectué, par le même processeur fictif, avec un temps opératoire nul, qui n'accepte l'item que si la capacité résiduelle du stock est suffisante. À l'entrée et à la sortie de cet item dans le stock, une mise à jour de la capacité courante est effectuée.
- *Item 3* : cet item en sortie du stock est caractérisé par une quantité qui définit la quantité sortante. Un processeur fictif à temps opératoire nul est utilisé, pour prélever du stock cette quantité. À la sortie du stock, la valeur de cette quantité est mise à jour dynamiquement en fonction de l'évolution des prélèvements.

Après avoir conçu et décrit le modèle de simulation, ainsi que le principe de chaînage avec le modèle d'optimisation, nous avons testé le modèle sur une petite instance de données cohérentes, ainsi dans ce qui suit nous allons procéder à une validation basée sur des données réelles tirées du terrain pour pouvoir valider l'applicabilité du modèle et repérer ses limites.

4.2. Expériences numériques

La validation de l'applicabilité du modèle de simulation est basée sur l'étude de cas de Maroc – Phosphore. Cette validation vise à évaluer le modèle mathématique de planification stratégique présenté dans le chapitre précédent en prenant en considération des contraintes opérationnelles.

Plus précisément, nous effectuons une évaluation des résultats de planification au niveau stratégique, tout en intégrant dans le modèle de simulation les contraintes prises en compte au niveau opérationnel. Notons que l'objectif est de donner un apport d'explications quant à l'applicabilité et au fonctionnement du plan stratégique avec les contraintes opérationnelles et finalement de réaliser une comparaison entre la prise ou non de ces contraintes en se basant sur des indicateurs de performance.

Afin de présenter les résultats provenant du modèle de simulation, le cas du système industriel de production, de stockage et de distribution des engrais en vrac de Maroc-Phosphore, qui représente une instance réelle, a été considéré. Nous avons cherché dans cette phase de validation à modéliser le système d'une façon plus précise pour pouvoir reproduire d'une façon plus concise la réalité. Notons que le modèle de simulation a été exécuté sur trois mois avec l'unité de temps "l'heure" (au total 2160 heures). Ainsi la Figure 5. 12 reproduit la distribution saisonnière de la demande trimestrielle agrégée de l'ensemble des six familles d'engrais pour l'ensemble des quais de chargement. Cette demande a été considérée à l'entrée du modèle de planification au niveau stratégique traité dans le chapitre précédent, et ceci à chaque période de l'horizon de planification considéré (mois).

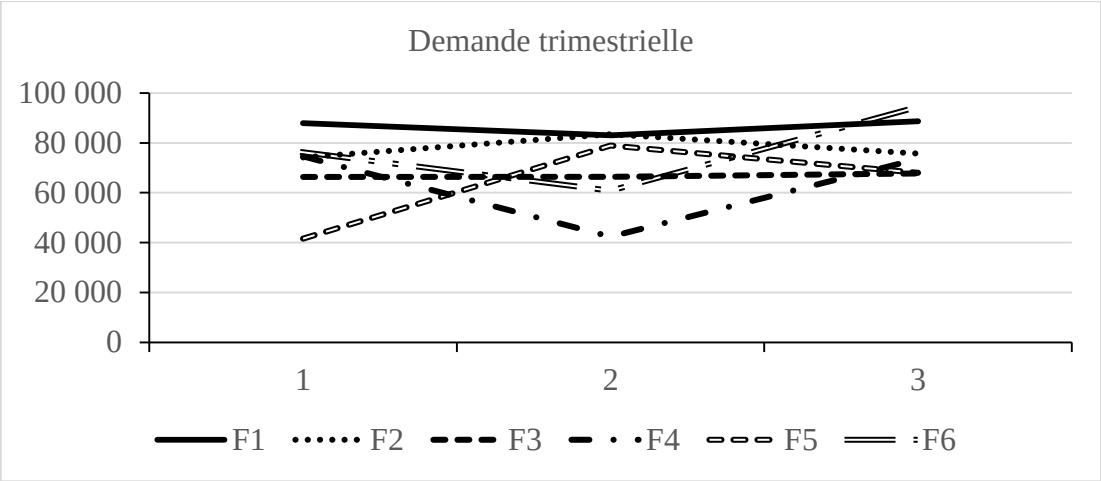


Figure 5. 12- Distribution de la demande trimestrielle des familles d'engrais

A l'issue de l'optimisation, nous avons obtenu un plan trimestriel de production, de stockage et de distribution des familles d'engrais. Ce plan permet de définir un ensemble de flots, chaque flot est défini par la quantité produite de chaque famille d'engrais, ainsi que l'affectation des ressources associées à chaque processus (selon le Tableau 5.1). Le nombre de flots défini à chaque période de l'horizon est fourni dans le Tableau 5.3.

Période	Nombre de flots Demande
P1	41
P2	44
P3	42

Tableau 5. 3- Nombre de flots par période

Nous distinguons trois types de flots comme expliqué auparavant : le premier type concerne un flot produit, stocké puis repris et chargé au niveau des quais de chargement, le deuxième type concerne un flot produit puis stocké (peut être chargé dans une période ultérieure), et finalement le troisième type caractérise un flot (stocké dans une période antérieure) repris depuis les hangars de stockage puis chargé dans les quais de chargement. La Figure 5.13 illustre le nombre de flots associés à chaque type et ceci sur les trois périodes de l'horizon.

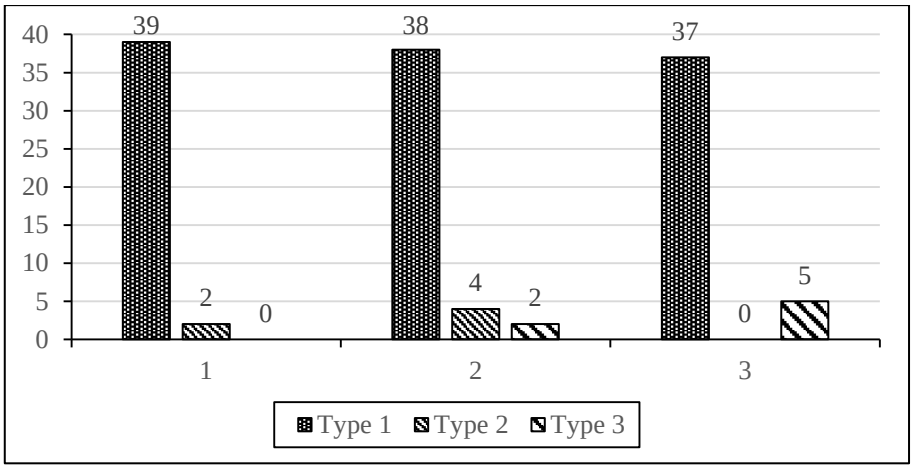


Figure 5. 13- Les types de flots par période

Suite à l'exécution du modèle de simulation sur trois périodes, un indicateur de performance qui réfère au taux d'utilisation des ressources du processus 1 est illustré sur la Figure 5.14, il correspond au taux d'utilisation des différentes lignes de production. Ainsi, on peut constater que le taux moyen d'utilisation est de 100% pour les lignes L_1 et L_4 sur l'horizon de 3 mois, il est de 99% pour les lignes L_2, L_5 et L_6, et pour la ligne L_3 est de 98%. Ainsi, le taux moyen d'utilisation de la capacité est de 99,33%. Le taux moyen d'utilisation de la capacité founi par le MILP était de 97, 89% (cf. chapitre 4, §4.4.3). Ces résultats démontrent que du point de vue utilisation de la capacité, le MILP fournit un plan de capacité réalisable.

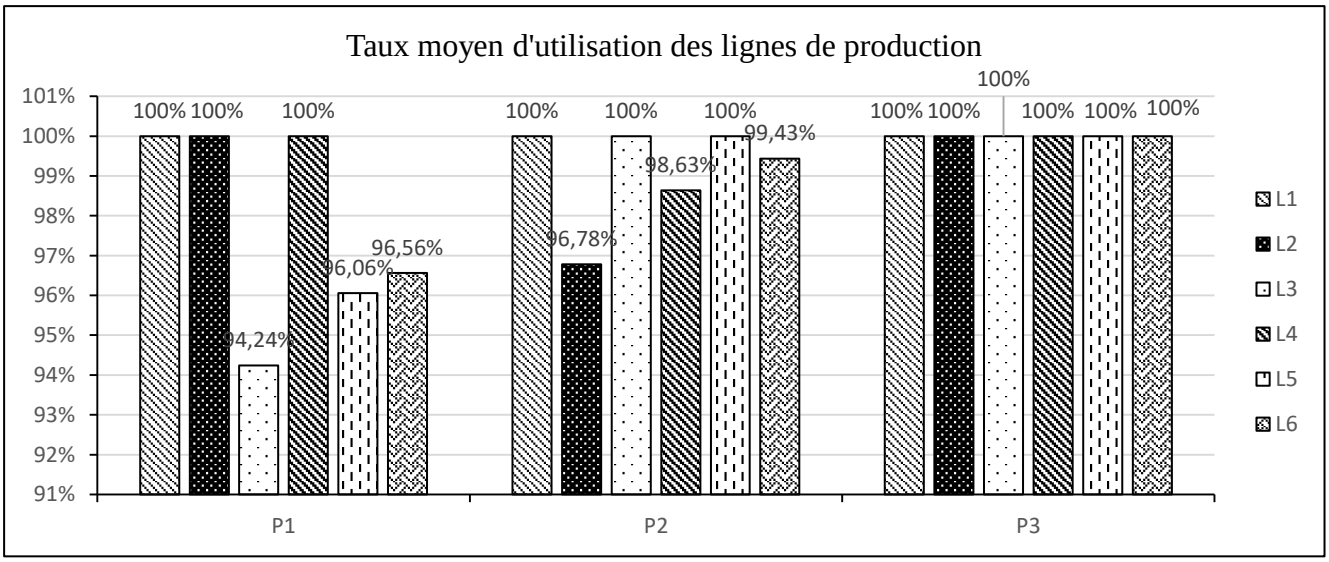


Figure 5. 14- Taux d'utilisation de chaque ligne de production à chaque période (mois) donné par la simulation

Par la suite, il a été décidé d'exécuter le modèle pour deux scénarios qui étudient le cas de prise ou non de la contrainte opérationnelle de durée minimale de séjour dans les espaces de

stockage. Ces scénarios permettent d'analyser l'impact de la prise en compte des contraintes opérationnelles au niveau stratégique. Les deux scénarios sont exécutés sur un horizon de planification de 3 mois. La simulation s'exécute rapidement sur plusieurs mois, mais pour une meilleure visibilité des résultats, nous nous limitons à la présentation des résultats des trois premiers mois. Dans la Figure 5.14, on peut observer les taux de satisfaction de la demande par quai de chargement pour le scénario 1, qui ne prend pas en compte le temps de séjour dans les stocks, et ceci sur les 3 premiers mois.

Les résultats présentés dans la Figure 5.15 montrent que suite à l'évaluation du plan stratégique de planification par la simulation, la demande des différentes familles d'engrais est satisfaite avec un taux moyen de 90,57% sur l'ensemble des trois périodes. L'obtention d'un taux moyen de satisfaction de la demande inférieur à celui trouvé par l'optimisation (99,99%) pour un horizon de 3 mois s'est traduite par les contraintes opérationnelles prises en compte à un niveau plus fin de simulation (par exemple la disponibilité de l'ensemble des ressources à transporter un flot de la ligne de production jusqu'au hangar de stockage, cette contrainte n'est pas prise en considération au niveau de l'optimisation).

Les quais 1, 2 ont un TSD moyen égal à 100%. Tandis que les quais 3, 4, 5 et 6 ont un TSD moyen respectivement égal à 98,89%, 78,33%, 88,75, et 77,43%.

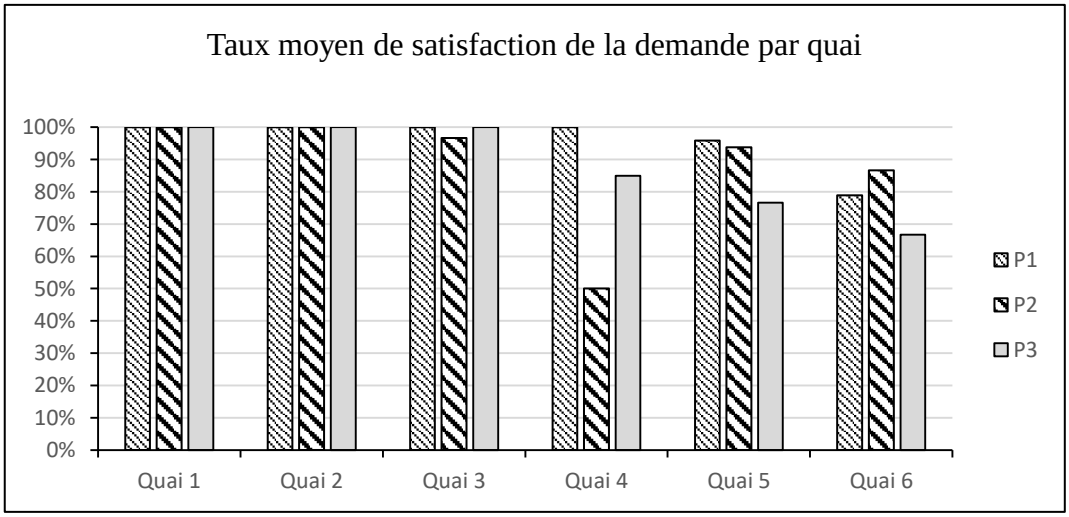


Figure 5. 15- Taux de satisfaction de la demande par quai en sortie de la simulation sur l'horizon de 3 mois

Dans ce qui suit, nous allons analyser l'impact de la prise en compte de la contrainte de durée minimale de séjour dans les hangars de stockage sur le taux de satisfaction de la demande. Ainsi, dans le modèle de simulation nous avons tourné le modèle avec une durée minimale de

séjour de 2 jours (48 heures) dans les 9 hangars de stockage. La Figure 5.16 offre une comparaison du taux de satisfaction de la demande entre les deux scénarios de prise ou non de cette contrainte, et ceci au niveau de chaque quai de chargement pour la période 1 de l'horizon. Nous constatons que la prise en compte de cette contrainte de durée minimale de séjour a diminué le taux de satisfaction de la demande pour les quais 4, 5 et 6. En plus la Figure 5.17 donne en détails la valeur de la différence entre les deux taux pour les différents quais de chargement sur les 3 périodes de l'horizon. Pour les deux quais 1 et 2, la valeur du TSD est constante sur les 3 périodes. Pour le quai 3 cette valeur a diminué de 1.33% à la période 2 et 4% à la période 3. Pour le quai 4, le taux de satisfaction de la demande a présenté aussi une diminution de 3%, 4%, et 2 % respectivement sur les périodes 1, 2 et 3. La demande au niveau de quai 5 a été moins satisfaisante sur les périodes 1 et 3. Et finalement, le quai 6 aussi a présenté une diminution du TSD sur les 3 périodes. La Figure 5.18 détaille le TSD moyen pour chaque scénario au niveau de chaque période de l'horizon de 3 mois.

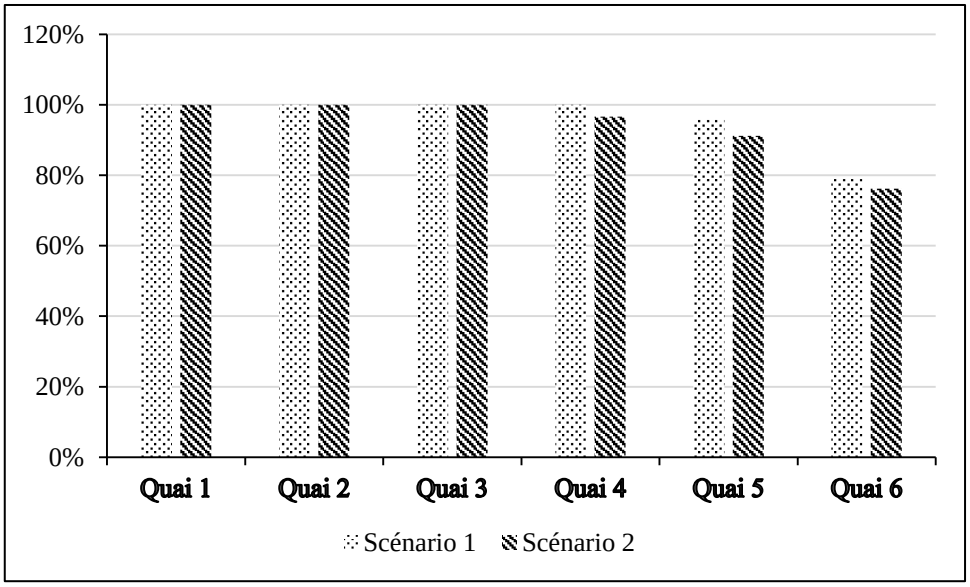


Figure 5. 16- Taux moyen de satisfaction de la demande sur la période 1

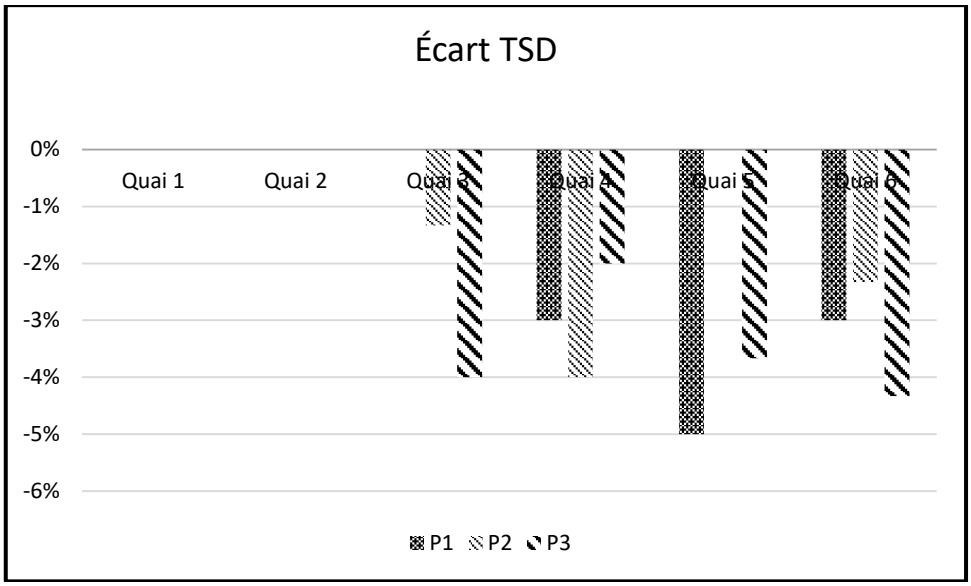


Figure 5. 17- Ecart du TSD par quai entre les deux scénarios

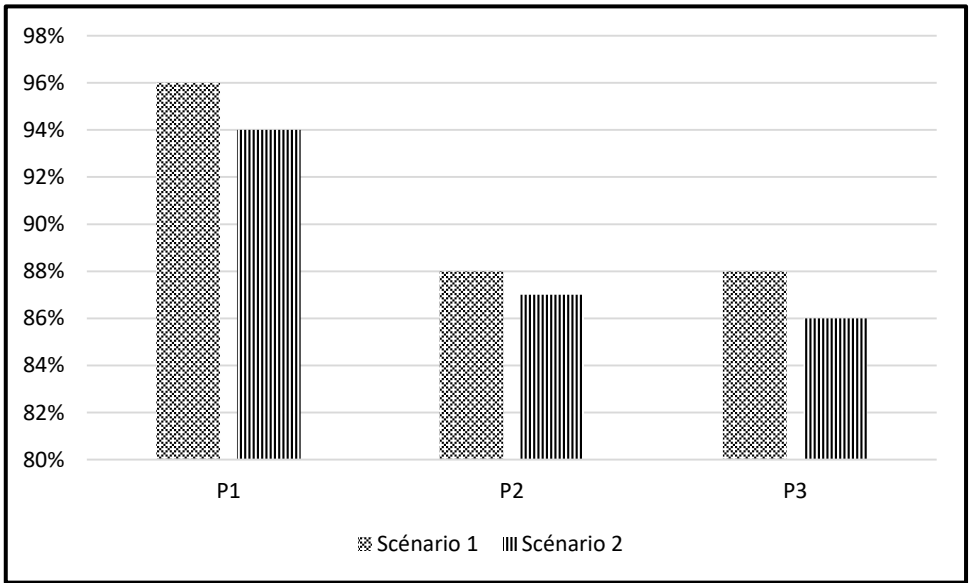


Figure 5. 18- TSD moyen par période pour les deux scénarios

5. Conclusion

La modélisation et la simulation du cas réel de Maroc-Phosphore traité dans ce chapitre nécessitent une phase préalable de présentation détaillée des différents éléments et paramètres associés dans le but de permettre leurs prises en compte. Ainsi, au cours de ce chapitre une traduction sémantique du modèle de connaissance en un langage de simulation en utilisant SIMUL8 a été introduite. Ce modèle fonctionnel et dynamique du système industriel de production, de stockage et de distribution des fertilisants étudié permet d'évaluer les solutions proposées par les modèles de planification. Cette modélisation/simulation s'est accompagnée

d'une explication de la manière avec laquelle a été considéré le chaînage avec les modèles traités au niveau de l'optimisation, dans le but de les utiliser pour l'évaluation des solutions des instances industrielles réelles.

Par la suite, une application numérique de l'évaluation du modèle de planification au niveau stratégique avec la prise en compte des contraintes opérationelles est présentée. Les différentes applications numériques présentées ont pour but de mettre en évidence d'une part l'applicabilité du modèle de simulation, et d'autre part l'impact des contraintes opérationnelles prises en compte sur quelques indicateurs de performance, par exemple le taux de satisfaction de la demande. Cette partie traitée dans ce chapitre s'inscrit dans notre approche globale d'optimisation/d'évaluation des performances.

Conclusion générale

Dans ces travaux de recherche, nous nous sommes intéressés aux problèmes qui s'inscrivent dans la thématique de la planification de la chaîne logistique. Nous avons développé des modèles permettant de déterminer des plans faisables de production, de stockage et de distribution des produits en vrac de la chaîne logistique du Groupe OCP SA.

Dans ce contexte, nous avons mené une étude bibliographique sur les problèmes de planification de la production rencontrés dans l'industrie, où nous avons décrit les différentes modélisations et méthodes de résolution issues de la littérature et les solutions logicielles pour formuler et résoudre ces problèmes, ainsi que leurs applications dans les deux contextes certain et incertain. Nous avons accordé une attention particulière aux modèles et méthodes d'optimisation dédiées à la planification stratégique ; à la planification tactique ; à la planification opérationnelle, ainsi qu'à l'approche intégrée de la planification, qui met en évidence le manque de cohérence entre les décisions des trois niveaux de planification.

Le problème de planification du système de production étudié, consiste à déterminer les affectations des lieux de production de stockage et de distribution des différentes familles de produits (ou produits) sur un horizon de planification défini, tout en considérant différents paramètres, à savoir :

(*i) des contraintes de capacités ;*
(ii) des contraintes de capabilité technique des lignes de production ;
(iii) la prise en compte des contraintes opérationnelles de stockage (durée minimale de séjour dans le stock, contamination des produits en stock) ;
(iv) des paramètres liés à la variation de la consommation de la capacité de chacune des lignes de production en fonction de la famille de produits (produits) fabriqués lors de chaque période de l'horizon de planification considéré ;
(v) le dimensionnement des ressources spécifiques à chaque produit ;

L'étude de la littérature présentée au chapitre 2, propose une classification des modèles dédiés à la planification dans les trois niveaux. Elle soumet également une analyse détaillée des méthodes employées et des instances résolues sur ces modèles. Cette étude conclut sur le fait qu'il n'existe pas pour cette problématique de modèle de référence permettant de traiter à la fois tous les paramètres cités ci-dessus.

Partant de ce constat, le chapitre 3 s'attache à proposer un modèle de connaissance pour la planification de la chaîne logistique du groupe OCP sous la forme d'un réseau d'écoulement de flux. Sa construction s'est basée sur une méthodologie de modélisation des systèmes logistiques industriels qui constitue en elle-même un guide méthodologique permettant une recherche action dans le contexte de l'industrie de process. Ce guide méthodologique explique comment formaliser les modèles de connaissance (cartographie des flux) et comment imbriquer les modèles informatiques permettant de résoudre les problèmes industriels dédiés. Cette partie de nos travaux a été réalisée en étroite collaboration avec les équipes de gestion de flux au niveau du groupe OCP.

Désireux de proposer des modèles mathématiques pour la planification de la production, à partir du modèle de connaissance complet, un modèle de connaissance dérivé est obtenu (chapitre 4). À partir de ce celui-ci, nous avons proposé trois modèles mathématiques de planification : le premier au niveau stratégique à la maille famille de produits, le deuxième au niveau tactique à la maille produit, et le dernier au niveau opérationnel avec un horizon plus court et des contraintes additionnelles. L'objectif consiste à proposer pour chaque niveau, un planning qui déterminera pour chaque période de l'horizon de planification les quantités à produire sur les différentes lignes de production, les quantités à stocker et celles à distribuer en tenant compte des différentes capacités de production, de stockage et de transport, de manière à maximiser le chiffre d'affaire et à minimiser les coûts logistiques engendrés pour satisfaire la demande prévisionnelle. Ces modèles ont été appliquées à un cas d'étude du système industriel de Maroc-Phosphore. La résolution sur des instances de taille industrielle montre la pertinence de notre approche et la performance de ces modèles.

La performance d'une solution de planification est renseignée par l'ensemble des mesures de la stabilité et de la robustesse. Pour cela, nous avons développé un modèle de simulation, construit à partir de la traduction du modèle de connaissance complet. Suite à un chaînage de ce modèle de simulation avec les modèles d'optimisation, les différentes solutions de planification ont été évaluées. Notre contribution dans ce dernier chapitre a porté sur les points suivants :

- Proposition d'un modèle de simulation pour le système logistique industriel de Maroc-Phosphore. Ce modèle décrit d'une manière plus fine les différentes entités du système et les interactions entre eux.

- Proposition d'une approche de chaînage Simulation-Optimisation pour l'évaluation des solutions de l'optimisation. Nous avons détaillé l'évaluation de la solution du modèle de planification stratégique en prenant en considération des contraintes opérationnelles, et ceci via un ensemble d'indicateurs quantitatifs.

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.

- Développer une interface informatisée, permettant la communication entre les outils de décision vus au cours de cette thèse. Elle doit également aider les responsables de l'OCP à paramétrer, manipuler et afficher les résultats pour les modèles de planification au regard du système logistique industriel tel qu'il a été présenté.
- 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.
- Réfléchir aux nouveaux modes de couplage/chaînage simulation optimisation dans un environnement incertain et dynamique en developpant des méthodes itératives (heuristiques & méta heuristiques).
- Passer à la phase de validation du modèle avec les instances mises à jour pour passer à l'industrialisation des modèles.

Nous envisageons également de travailler sur le couplage de nos modèles de planification de la production, du stockage et la distribution des engrais avec l'aval (la partie gestion portuaire) qui consiste en la réalisation d'un modèle de l'allocation des postes à quai (BAP : Berth Allocation Problem). Ce problème, traité dans le cadre d'un projet de thèse, permet de générer un programme d'accostage (Gantt d'ordonnancement) qui détermine où et quand un navire doit accoster tout au long du quai, dans le but de réduire les départs tardifs des navires tout en maximisant la différence entre les despatch money (primes de célérité) et les surestaries (pénalités de retard). Ce couplage s'inscrit dans une perspective de pilotage coopératif des maillons de la chaîne logistique de l'OCP.

Bibliographie

[Ackoff, 1971] R.L. Ackoff. 1971. "Towards a System of System Concepts". Management Science, 17 (11).

[Aghezzaf et al., 2010] Aghezzaf, E.H., Sitompul, C., Najid, M. (2010). "Models for robust tactical planning in multi-stage production systems with uncertain demands," *Computers & Operations Research* 37, 880—889.

[Ahuja et al., 1993] Ahuja, R.K., Magnanli, T.L and Orlin, J.R. (1993). Network Flows: Theory. Algorithms and Applications. Prentice Hall, New Jersey.

[Akhil et Udatta, 2005] Akhil, J., Udatta, S. P. (2005). "Aggregate production planning for a continuous reconfigurable manufacturing process". *Computers & Operations Research*, 32, 1213–1236.

[Albrecht et al, 2014] Albrecht, F., Kleine, O., Abele, E. (2014). "Planning and Optimization of Changeable Production Systems by Applying an Integrated System Dynamic and Discrete Event Simulation Approach." Procedia CIRP, 17, 386-391.

[Al-e-hashem et al., 2011] Al-e-hashem, S.M.J., Malekly, H., Aryanezhad, M.B. (2011). "A multi-objective robust optimization model for multi-product multi-site aggregate production planning in a supply chain under uncertainty." *Int. J. Prod. Econ.* 134, 28–42.

[Almeder et al., 2009] Almeder, C., Preusser, M., and Hartl, R. F. (2009). "Simulation and optimization of supply chains: alternative or complementary approaches?." OR spectrum, 31(1), 95-119.

[Altendorfer et al., 2016] Altendorfer, K., Felberbauer, T., Jodlbauer, H. (2016) "Effects of forecast errors on optimal utilisation in aggregate production planning with stochastic customer demand." *Int J Prod Res* 54(12), 3718–3735.

[Amodeo et al., 2008] Hani, Y., Amodeo, L., Yalaoui, F., Chen, H. (2008). "Simulation based optimization of a train maintenance facility." Journal of Intelligent Manufacturing, 19:293–300.

[André et Charpentier, 2005] André, T., Charpentier, P. (2005). "Reducing simulation models for scheduling manufacturing facilities." European Journal of Operational Research, 161(1), 111-125.

[Anthony, 1965] Anthony R.N. 1965. "Planning and Control Systems, A Framework of Analysis". Boston.

[Arthur et al., 1986] Arthur, J. D., Nance, R. E., and Henry, S. M. (1986). "A Procedural Approach to Evaluating Software Development Methodologies: The Foundation, Technical Report", SRC-86-008, Systems Research Center, Virginia Tech, Blacksburg, Va., Sept.

[Balci, 1994] Balci, O. (1994). "Validation, Verification and testing Techniques Throughout the Life Cycle of a Simulation Study." Annals of Operations Research, Dec.

[Balci et Nance, 1987] Balci, O. et Nance, R. E. (1987). "Simulation model environments: a research prototype." Journal of the Operational Research Society, 38 (8), 753-763.

[Banks, 1998] Banks, J. (1998). Editor. "Handbook of Simulation. Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice." Wiley-Interscience.

[Baptiste et al., 2008] Baptiste, P., Alsene, E., Gaudimier, R. (2008). "Integration of Production and Shipping Planning: A Co-operative Approach." Production Planning & Control 19, 645–654.

[Barbarasoglu et Özgür, 1999] Barbarasoglu, G., Özgür, D. (1999). "Hierarchical design of an integrated production and 2-echelon distribution system." *European Journal of Operational Research*, 118(3), 464-484.

[Baykasoglu, 2001] Baykasoglu. (2001). MOAPPS 1.0: "Aggregate production planning using the multiple-objective tabu search". *International Journal of Production Research*, 39:16, 3685-3702.

[Baykasoglu et al., 1999] Baykasoglu, A., Owen, S., Gindy, N. (1999) "Solution of goal programming models using a basic taboo search algorithm." *Journal of the Operations Research Socie*ty 50(9), 960–973.

[Baykasoglu et Gocken, 2010] Baykasoglu, A., Gocken, T. (2010) "Multi-objective aggregate production planning with fuzzy parameters. Adv Eng Softw 41(9), 1124–1131.

[Benghalia et al., 2014] Benghalia, A., Oudani, M., Boukachour, J., Boudebous, D., Alaoui, A. (2014). "Proposition d'une approche de couplage optimisation simulation pour le transfert de conteneurs maritimes." 10ème Conférence Francophone de Modélisation, Optimisation et Simulation- MOSIM'14–5 au 7 novembre 2014 - Nancy –France« de l'économie linéaire à l'économie circulaire».

[Bertrand, 2003] Bertrand J.W.M. 2003. "Supply Chain Design: Flexibility Considerations". De Kok A.G., Graves, S.C., (Eds). Handbooks in OR & MS, 11, chapter 4.

[Birge et Louveaux, 1997] Birge, J. R., Louveaux, F. V. (1997). Introduction to stochastic programming. New York, NY: Springer.

[Blazewicz et al., 2019] Blazewicz J., Ecker K.H., Pesch E., Schmidt G., Sterna M., Weglarz J. (2019) Scheduling on One Processor. In: Handbook on Scheduling. International Handbooks on Information Systems. Springer, Cham, doi.org/10.1007/978-3-319-99849-7_4.

[Boon-itt et Wong, 2011] Boon-itt, S., Wong, C. Y. (2011). "The Moderating Effects of Technological and Demand Uncertainties on the Relationship Between Supply Chain Integration and Customer Delivery Performance." *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 41 (3), 253–276.

[Boutevin, 2003] Boutevin, C. (2003). "Problèmes d'ordonnancement et d'affectation avec contraintes de ressources de type RCPSP et line balancing." Thèse de doctorat, Université de Blaise Pascal, Clermont -Ferrand, France.

[Bowman, 1956] Bowman, E.H. (1956). "Production scheduling by the transportation method of linear programming", *Operations Research*, 4(1), 100-103.

[Brah, and Hunsucker, 1991] Brah, S.A., Hunsucker, J.L. (1991). Branch and bound algorithm for the flow shop with multiple processors. European Journal of Operational Research, 51, pp. 88–99.

[Brailsford et al., 2004] Brailsford, S. C., Lattimer, V. A., Taranas, P., & Turnbull, J. C. (2004). "Emergency and On-Demand Health Care: Modelling a Large Complex System." *Journal of the Operational Research Society*, 55(1), 34-42.

[Brailsford et Hilton, 2001] Brailsford, S., Hilton, N. (2001). "A Comparison of Discrete Event Simulation and System Dynamics for Modelling Healthcare Systems." in Proceedings of the 26th meeting of the ORAHS Working Group 2000, Glasgow, Scotland, 18-39.

[Brauner et al., 2005] Brauner, N., Castagna, P., Espinouse, M.L., Finke, G., Lacomme, Martineau, P., Moukrim, A., Soukhal, A., Tacquard, C., Tchernev, N. (2005). Ordonnancement dans les systèmes flexibles de production, Journal Européen des Systèmes Automatisés, 39(8), pp. 925-964.

[Brucker and Schlie, 1990] Brucker, P., Schlie, R. (1990). Job-shop scheduling with multi-purpose machines, Computing 45(4), pp. 369–375.

[Bruno et al., 2015] Calfa, B.A., Agarwal, A., Bury, S.J., Wassick, J.M., Grossmann, I.E. (2015). "Data-Driven Simulation and Optimization Approaches To Incorporate Production Variability in Sales and Operations Planning." *Ind. Eng. Chem. Res.* 54, 7261−7272.

[Buffa et al., 1972] Buffa, E.S., Taubert, W.H. (1972). "Production-Inventory Systems: Planning and Control." Irwin, Homewood, IL.

[Bushuev, 2014] Bushuev, M. (2014). "Convex optimisation for aggregate production planning." *International Journal of Production Research*, 52(4), 1050-1058.

[Byrne et al., 2005] Byrne, M.D., Hossain, M. (2005). "Production planning: An improved hybrid approach." *International Journal of Production Economics*, 93-94, 225-229.

[Byrne et Bakir, 1999] Byrne, M.D., Bakir, M.A. (1999). "Production planning using a hybrid simulation- analytical approach, *International Journal of production economics*, 59(3), 305-311.

[Byrne et al., 2005] Byrne, M. et Hossain, M. (2005). "Production planning: An improved hybrid approach." *International Journal of Production Economic* 94, 225–229.

[Cansheng et al., 2011] Cansheng, W., Li, Y., Cai, X. (2011). "Robust optimal policies of production and inventory with uncertain returns and demand." *Int. J. Production Economics* 134, 357–367.

[Cardin et Castagna, 2011] Cardin, O., Castagna, P. (2011). "Proactive production activity control by online simulation." International Journal of Simulation and Process Modelling, 6(3), 177-186.

[Caridi et Cigolini, 2000] Caridi, M., Cigolini, R. (2000). "Buffering against lumpy demand in MRP environments: a theoretical approach and a case study." Manufacturing Information Systems, Proceedings of the fourth SMESME International Conference.

[Carlier et Chrétienne, 1988] J. CARLIER, P. CHRETIENNE, Problèmes d'ordonnancement : modélisation / complexité / algorithmes, Masson Edition, 1988.

[Castagna et al., 2014] Daaboul, J., Castagna, P., Da Cunha, C., & Bernard, A. (2014). "Value network modelling and simulation for strategic analysis: a discrete event simulation approach." *International Journal of Production Research*, 52:17, 5002-5020.

[Cebral-Fernández et al., 2017] Cebral-Fernández, M., Rouco-Couzo, M., Pazos, M.Q., Crespo-Pereira, D., García del Valle, A., & Morgade Abeal, R. (2017). "Application of a multi-level simulation model for aggregate and detailed planning in shipbuilding."

Proceedings of the Winter Simulation Conference, Las Vegas, NV, USA. 3–6 December 2017, 3864–3875.

[Chabrol et al., 2006] Chabrol, M., Féniès, P., Gourgand, M., Tchernev, N. (2006). "Un environnement de modélisation pour le système d'information de la Supply Chain : application au Nouvel Hôpital Estaing." Ingénierie des Systèmes d'Information, 11, 137-162.

[Chatha et Weston, 2006] Chatha, K. A., & Weston, R. H. (2006). "Combined discrete event simulation and systems thinking-based framework for management decision support." *Journal of Engineering Manufacture*, 220(B), 1969-1981.

[Chaturvedi et Bandyopadhyay, 2015] Chaturvedi, N.D., Bandyopadhyay, S. (2015). "Targeting Aggregate Production Planning for an Energy Supply Chain." Ind. Eng. Chem. Res. 54, 6941−6949.

[Chen et al., 2010] Chen, J. C., Su, L.H., Sun, C.J., Hsu, M.F. (2010). "Infinite capacity planning for IC packaging plants." *International Journal of Production Research*, 48(19), 5729–5748, 29, 44, 49.

[Chen et Liao, 2003] Chen, Y.K., Liao, H.C. (2003). "An investigation on selection of simplified aggregate production planning strategies using MADM approaches." *International Journal of Production Research*, 41:14, 3359-3374.

[Cheng et al., 2016] Cheng, T. C. E., B. Peng, and Z. Lu. (2016). A Hybrid Evolutionary Algorithm to Solve the Job Shop Scheduling Problem, Annals of Operations Research, 242, pp. 223 – 237.

[Cheng et Sin, 1990] Cheng, T.C.E..Sin C.C.S. (1990). A state-of-the-art review of parallel-machine scheduling research, European Journal of Operational Research 47(3), pp. 271-292.

[Cheraghalikhania et al., 2019] Cheraghalikhania, A., Khoshalhana, F., Mokhtarib, H. (2019). "Aggregate production planning: A literature review and future research directions," *International Journal of Industrial Engineering Computations* 10, 309–330.

[Chien et Cunningham, 2000] Chien, Y.I., Cunningham, W.J. (2000). "Incorporating production planning in business planning: A linked spreadsheet approach." Prod. Plan. Control, 11, 299–307.

[Childerhouse et Towill, 2002] Childerhous, P., Towill, DR. (2002) "Analysis of the factors affecting real-world value stream performance." *Int J Prod Res* 40(15), 3499–3518.

[Chopra et Meindl, 2007] Chopra, S., Meindl, P. (2007). "Supply Chain Management: Strategy, Planning and Operation." 3rd ed. New Jersey: Prentice Hall.

[Collette et Siarry, 2002] Collette, Y., Siarry, P. (2002). Optimisation multiobjectif, Eyrolles, Paris.

[Comelli et al., 2005] Comelli, M., Féniès, P., Gourgand, M., Tchernev, N. (2005). "An operational integration for cash management and activity based costing evaluation in supply chain software." 4th IFIP WG International Workshop on Performance Measurement, June 2005, Bordeaux, France, Actes sur CD ROM (10 pages).

[Cossard, 2004] Cossar, N. (2004). "Un environnement logiciel de modélisation et d'optimisation pour la planification de la production dans la chaîne logistique." Thèse de Doctorat en informatique de l'Université Blaise Pascal, Clermont Ferrand, France.

[Cristobal et al., 2009] Cristobal, M.P., Escudero, L.F., Monge, J.F. (2009). "On Stochastic Dynamic Programming for Solving Large-scale Planning Problems under Uncertainty." *Computers & Operations Research*, 36, 2418–2428.

[Da Silva et al. 2006] Da Silva, C.G., Figueira, J., Lisboa, J., Barman, S. (2006). "An interactive decision support system for an aggregate production planning model based on multiple criteria mixed integer linear programming". *Omega*, 34, 167–177.

[D'Amours et al., 2008] Feng, Y., D'Amours, S., Beauregard. R. (2008). "The Value of Sales and Operations Planning in Oriented Strand Board Industry with Make-to-order Manufacturing System: Cross Functional Integration under Deterministic Demand and Spot Market Recourse." *International Journal of Production Economics,* 115, 189 – 209.

[Dantzig, 1955] Dantzig, G.B. (1955). "Linear programming under uncertainty." Management Science 1, 197–206.

[Dauzère et al., 2002] Dauzère-Pérès, S., Lasserre, J.-B. (2002). "On the importance of sequencing decisions in production planning and scheduling." I*nternational Transactions in Operational Research*, 9, 779–793.

[Dauzère-Pérès, 1992] Dauzère-Pérès S. (1992). Planification et ordonnancement de la production: une approche intégrée cohérente. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, France, 1992.

[Dauzère-Pérès et Lasserre, 1994] Dauzère-Pérès, S., Lasserre, J.B. (1994). "An Integrated Approach in Production Planning and Scheduling." *Operations management* 411.

[Dauzère-Pérès et Lasserre, 2002] Dauzère-Pérès, S., Lasserre, J.B. (2002). "On the Importance of Sequencing Decisions in Production Planning and Scheduling" *International Transactions in Operational Research*, 9(6), 779–793.

[Davis, 1993] Davis, T. (1993) "Effective supply chain management." Sloan Manage Rev 34(4), 35–46.

[Deb, 2001] Deb, K. (2001). Multi-objective optimization using evolutionary algorithms. Wiley.

[Demirel et al., 2018] Demirel, E., Ozelkan, EC., Lim, C. (2018) "Aggregate planning with flexibility requirements profile." *Int J Prod Econ,* 202, 45–58.

[Denton et al., 2006] Denton, B. T., Forrest, J., Milne, R. J. (2006). "IBM Solves a Mixed-integer Program to Optimize Its Semiconductor Supply Chain." Interfaces 36, 386–399.

[Díaz-Madroñero et al., 2014] Díaz-Madroñero, M., Mula, J. and Peidro, D. (2014). A review of discrete-time optimization models for tactical production planning. International Journal of Production Research, Vol. 52(17), pp. 5171-5205.

[Dietrich, 1991] Dietrich, B. L. (1991). A Taxonomy of Discrete Manufacturing Systems. Operations Research 39(6), pp. 886-902.

[Disney et al., 2004] Disney, SM., Naim, MM., Potter, A. (2004) "Assesing the impact of e-business on supply chain dynamics." *Int J Prod Econ* 89 (2), 109–118.

[Dolgui et Prodhon, 2007] Dolgui, A., Prodhon, C. (2007). "Supply planning under uncertainties in MRP environments: A state of the art. Annual Reviews." in Control, 31(2), 269–279.

[Drouin, 1988] Drouin, A. M. (1988). Le modèle en question. Aster, 7, pp-1-20.

[Du et Wolfe, 2000] Du, T.C., Wolfe, P. (2000). "Building an active material requirements planning." *International Journal of Production Research* 38, 241–252.

[Dumetz et al., 2016] Dumetz, L., Gaudreault, J., Thomas, A., Lehoux, N., Marier, P., El-Haouzi, H. (2016). "Evaluating order acceptance policies for divergent production systems with co-production." International Journal of Production Research, 55(13), 3631-3643.

[Durieux et al., 2008] Durieux, S., Genin, P., Thierry, C. (2008). " Prise de décision dans la chaîne logistique en monde incertain. " Document de synthèse, Projet GDR-MACS.

[Edgeworth, 1881] Edgeworth, F. Y. (1881). Mathematical physics. P. Keagan, London, 1881.

[Elmaghraby, 1978] Elmaghraby, S. (1978). "The economic lot scheduling problem (elsp): review and extension."Management Science 24, 587–597.

[Emmons and Vairaktarakis, 2013] Emmons, H. and Vairaktarakis, G. (2013). FlowShop Scheduling. Business & Management Operations Research & Decision Theory, International Series in Operations Research & Management Science, volume 182. Springer US.

[Erdirik-Dogan et Grossmann, 2006] Erdirik-Dogan, M., & Grossmann, I. E. (2006). "A decomposition method for the simultaneous planning and scheduling of single-stage continuous multiproduct plants." Industrial and Engineering Chemistry Research, 45, 299.

[Essaadi et al., 2018] Essaadi, I., Fenies, P., Grabot, B. (2018). "Conception de réseaux de distribution pour une personnalisation produit : Une contextualisation à l'échelle du continent Africain." Thèse de Doctorat en sciences de gestion de l'Université Paris Nanterre.

[Fahimnia et al., 2012] Fahimnia, B., Luong, L., Marian, R. (2012). "Genetic algorithm optimization of an integrated aggregate production-distribution plan in supply chains." *Int. J. Prod. Res.* 50, 81–96.

[Fahmnia et al., 2008] Fahimnia, B., Luong, L.H.S., Marian, R. M. (2008). "Modeling and Optimization of Aggregate Production Planning - A Genetic Algorithm Approach." *International Journal of Applied Mathematics and Computer Sciences*, 1(1).

[Fang et Qi, 2003] Fang, S.C. et Qi, L. (2003). Manufacturing network ows: A generalized network ow model for manufacturing process modeling. Optimization Methods and Software, 18:143-165.

[Feng et al., 2008] Feng, Y., D'Amours, S., Beauregard. R. (2008). The Value of Sales and Operations Planning in Oriented Strand Board Industry with Make-to-order Manufacturing System: Cross Functional Integration under Deterministic Demand and Spot Market Recourse, International Journal of Production Economics, 115, pp. 189 – 209.

[Feng et al., 2010] Feng, Y., D'Amours, S., Beauregard, R. (2010). "Simulation and performance evaluation of partially and fully integrated

sales and operations planning." *International Journal of Production Research*, 48(19):5859–5883.

[Féniès, 2006] Féniès, P. (2006). "Une méthodologie de modélisation par processus multiples et incrémentiels : application pour l'évaluation des performances de la Supply Chain.", thèse de Doctorat en Informatique, Université Blaise Pascal, Clermont Ferrand.

[Ferland et al., 2004] Ferland, J., Pradenas, L., Penailillo, F. (2004). "Aggregate production planning problem: A new algorithm."Electronic Notes in Discrete Mathematics 18, 193–199.

[Fichera et al., 1999] Fichera, S., La Spada, A., Perrone, G., Grasso,V., & La Commare, U. (1999). "Possibilistic programming and gas for aggregate production planning under vague information." In E. Kuljanic (Eds.), advanced manufacturing systems and technology, 485–492. Wien New York: Springer Verlag.

[Figueira et Almada-Lobo, 2014] Figueira, G., Almada-Lobo, B. (2014). "Hybrid simulation–optimization methods: A taxonomy and discussion". Simulation Modelling Practice and Theory, 46, 118–134.

[Fleischmann et al., 2002] Fleischmann, B., Meyr, H., Wagner, M. 2002. "Advanced Planning", in Supply chain management and advanced planning, Stadtler, H., Kilger, C., (Eds), chapter 4, Berlin, Springer Verlag.

[Fleury et al., 2007] Fleury, G., Lacomme, P., Tanguy, A. (2007). "Simulation à événements discrets." Collection Algorithmes dirigée par Gérard Dreyfus, Groupe Eyrolles, ISBN 13, 5-20.

[Florian et Klein, 1971] Florian, Klein, M. (1971). "Deterministic production planning with concave costs and capacity constraints." Management science, 18(1), September.

[Floudas and Lin, 2004] Floudas, C.A., Lin, X. (2004). Continuous-time versus discrete-time approaches for scheduling of chemical processes: a review, Computers and Chemical Engineering, 28, pp. 2109–2129.

[Fowler, 2004] Fowler, M. (2004). "UML distilled: a brief guide to the standard object modeling language." Addison-Wesley Professional.

[Fu, 1994] Fu, M.C. (1994). "Optimization via simulation: a review". Ann. Oper. Res. 53, 199–247.

[Fu, 2002] Fu, M.C. (2002). "Optimization for Simulation: Theory vs. Practice". INFORMS Journal on Computing, 14(3), 192-215.

[Fu et al., 2014] Fu, M.C., Bayraksan, G., Henderson, S.G., Nelson, B.L., Powell, W.B., Ryzhov, I.O., Thengvall, B. (2014). "Simulation optimization: A panel on the state of the art in research and practice." The 2014 Winter Simulation Conference.

[Fung et al., 2003] Fung, R.Y.K., Tang, J., Wang, D. (2003). "Multiproduct aggregate production planning with fuzzy demands and fuzzy capacities." IEEE Trans. Syst. Man, and Cybernet. Part A: Syst. Humans, 33, 302–313.

[Gaalman et Disney, 2006] Gaalman, G., Disney, SM. (2006) "State space investigation of the bullwhip problem with ARMA (1,1) demand processes." *Int J Prod Econ* 104(2), 327–339.

[Galbraith, 1973] Galbraith, J., 1973. "Designing Complex Organizations." Addison- Wesley, Reading, MA.

[Gansterer, 2015] Gansterer, M. (2015). "Aggregate planning and forecasting in make-to-order production systems". *Int. J. Prod. Econ.* 170, 521–528.

[Garavelli et al., 1996] Garavelli, A., Okogbaa, O., Violante, N. (1996). "Global manufacturing systems: a model supported by genetic algorithms to optimize production planning." *Computers & Industrial Engineering*, 31(1-2), 193-196.

[García et al., 2009] García, J.P., Maheut, J., García, J. (2009). "A decision support system for aggregate production planning based on MILP: A case study from the automotive industry." In Proceedings of the International Conference on Computers & Industrial Engineering (CIE), Troyes, France, 6–9 July, 366–371.

[Garey et Johnson, 1979] Gary, M.R., Johnson, D.S., 1979. Computers and intractability: a guide to the theory of NP-completeness, Aseries of books in the mathematical sciences. W.H. Freeman & Co, New York, NY, USA.

[Genin et al., 2001] Génin P., Lamouri S., Thomas A., 2001. "Utilisation de la programmation linéaire dans l'optimisation du plan industriel et commercial". Revue française de gestion industrielle, vol. 20, n°4, pp 83-98.

[Genin et al., 2005] Genin, P., Lamouri, S., Thomas, A., 2005. "Sales and operations planning optimization: Contribution and limits of linear programming". In: Dolgui, A., Soldek, J., Zaikin, O. (Eds.), Supply Chain Optimization-Product/Process

Design, Facility Location and Flow Control. Springer, USA, pp. 191–204 (Chapter 14).

[Genin et al., 2007] Genin, P., Thomas, A., Lamouri, S. (2007). "How to manage robust tactical planning with an APS (Advanced Planning Systems)." Journal of Intelligent Manufacturing, 18(2), 209-221.

[Gholamian et al., 2015] Gholamian, N., Mahdavi, I., Tavakkoli-Moghaddam, R., Mahdavi-Amiri, N. (2015). "Comprehensive fuzzy multi-objective multi-product multi-site aggregate production planning decisions in a supply chain under uncertainty." Applied Soft Computing 37, 585–607.

[Gholamian et al., 2016] Gholamian, N., Mahdavi, I., Tavakkoli-Moghaddam, R. (2016). "Multiobjective multi-product multi-site aggregate production planning in a supply chain under uncertainty: fuzzy multiobjective optimisation." *Int J Comput IntegrManuf,* 29(2), 149–165.

[Giard, 2003] Giard V. (2003). Gestion de la production et des flux, Economica.

[Goldberg and Tarjan, 1989] Goldberg, A., Tarjan, R. (1989). "Finding minimum cost circulations by cancelling negative cycles." Journal of the ACM 36 (4), 873–886.

[Goujon, 1997] Goujon, J.-Y. (1997). "Un environnement de modélisation multi -agents pour la spécification et l'évaluation des performances des systèmes industriels de production." Thèse de doctorat, Université Blaise-Pascal, Clermont-Ferrand, France.

[Gourgand, 1984] Gourgand, M. (1984). "Outils logiciels pour l'évaluation des performances des systèmes informatiques." Thèse d'Etat, Université Clermont Ferrand II, France.

[Gourgand et Kellert, 1992] Gourgand, M., Kellert, P. (1992). "An Object - Oriented Methodology for Manufacturing System Modelling." In Proceedings of the 1992 Summer Computer Simulation Conference (SCSC), (eds.)P. Luker, 1(1), 1123 - 1128, Reno, Nevada, USA ,SCS.

[Gourgand et Tchernev, 1998] Gourgand, M., Tchernev, N. (1998). "Un environnement de modélisation du processus logistique industriel." RIRL 1998, Deuxièmes Rencontres Internationales de la Recherche en Logistique, 27-28 Janvier 1998, Marseille – France, 539-557.

[Gnoni et al., 2003] Gnoni, M.G., Iavagnilio R., Mossa G., Mummolo G., Di Leva, A. (2003). "Production planning of a multi-site manufacturing system by hybrid modelling: A case study

from the automotive industry", *International Journal of Production Economics,* 85, 251-262.

[Gourgand et al., 2007] Gourgand, M., Grangeon, N., Lemoine D., Norre S. (2007). "Couplage de modèles pour une planification robuste. " Conférence CPI 07, Rabat.

[Graham et al., 1979] Graham, R.L., Lawler, E.L., Lenstra, J.K., Rinnooy Kan, A.H. (1979). Optimization and approximation in deterministic sequencing and scheduling: a survey. Annals of Discrete Mathematics, 5, pp. 287-326.

[Grimson and Pyke, 2007] Grimson, J.A., Pyke, D.F. (2007). Sales and operations planning: an exploratory study and framework, The International Journal of Logistics Management, 18(3), pp. 322-346.

[Gruat La Forme-Chretien, 2007] Gruat La Forme-Chretien F.A. (2007). Référenciel d'évaluation de la performance d'une chaîne logistique – Application à une entreprise de l'ameublement, Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.

[Gulsun et al., 2009] Gulsun, B., Gulfem, T., Umut, R.T., Onut, S. (2009). "An Aggregate Production Planning Strategy Selection Methodology based on Linear Physical Programming". *International Journal of Industrial Engineering*, 16(2), 135-146.

[Gupta, 1997] Gupta, U.G. (1997). "Using Citation Analysis to Explore the Intellectual Base, Knowledge Dissemination, and Research Impact of Interfaces" (1970–1992), Interfaces, 27, 85–101.

[Gupta et Maranas, 2003] Gupta, A., Maranas, C.D. (2003). "Managing demand uncertainty in supply chain planning." *Computers and Chemical Engineering* 27, 1216–1227.

[Haq et Kanda, 1991] Haq, A.N., Kanda, P.V.A. (1991). "An integrated production-inventory-distribution model for manufacture of urea: a case". *International Journal of Production Economics*, 25(1-3), 39-49.

[Harjunkoski et al., 2014] Harjunkoski, I., Maravelias, C., Bongers, P., Castro, P., Engelle, S., Grossmann, I., Hooker, J., Méndez, C., Sand, G. Wassick, J, (2014). Scope for industrial applications of production scheduling models and solution methods, Computers & Chemical Engineering, 62 (5), pp. 161-193.

[Hax, 1975] Hax, A. (1975). "Aggregate Production Planning." Operations Research 23, B368–B368.

[Hax, 1978] Hax, A.C. (1978). "Aggregate Production Planning." in: J. Models and S. Elmaghraby (eds.), Handbook of Operation Research, Van Nostrand Reinhokl, New York.

[Hax et Candea, 1984] Hax, A.C., Candea, D. (1984). "Production and inventory Management." Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.

[Hax et Meal, 1975] Hax, A.C., Meal, H.C. (1975). "Hierarchical Integration of Production Planning and Scheduling." In: Geisler (Ed.), Logistics: Studies in the Management Science, vol. 1. Elsevier, North Holland.

[Helal et al., 2007] Helal, M., Rabelo, L., Sepulveda, J., Jones, A. (2007). "A methodology for Integrating and Synchronizing the System Dynamics and Discrete Event Simulation Paradigms." in Proceedings of the 25th International Conference and 50th Anniversary Celebration, July 29 – August 2, 2007, Boston, Massachusetts, USA.

[Ho, 1989] Ho, C. (1989). "Evaluating the impact of operating environments on MRP system nervousness." *International Journal of Production Research*, 27, 1115–1135.

[Ho et al., 2005] Ho, C.F., Chi, Y.P., Tai, Y.M. (2005) "A structural approach to measuring uncertainty in supply chains." *Int J Electron Commer* 9(3), 91–114.

[Holt, 1983] Holt, J.A. (1983). "PDF versus LP: An empirical aggregate planning comparison." *J. Oper. Manag.* 3, 141 147.

[Holt, Modigliani et Simon, 1955] Holt, C.C., Modigliani, F., Simon, H.A. (1955). "Linear decision rule for production and employment scheduling", *Management Science*, 2(1), 1-30.

[Holt, Modigliani et Muth, 1956] Holt, C.C., Modigliani, F., Muth, J.F. (1956). "Derivation of a linear decision rule for production and employment". *Management Science*, 2(2), 159-177.

[Hood et al., 2003] Hood, S. J., Bermon, S., Barahona, F. (2003). "Capacity planning under demand uncertainty for semiconductor manufacturing." IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 16(2), 273–280.

[Hung et Chang, 1999] Hung, Y.F., Chang, C.B. (1999) "Determining safety stocks for production planning in uncertain manufacturing." Int J Prod Econ 58(2):199–208.

[Ingalls, 1998] Ingalls, R. G. (1998). "The value of simulation in modelling supply chains." In Proceedings of the 1998 Winter Simulation Conference, 1371-1375.

[Ingalls, 2001] Ingalls, R.G. (2001). "Introduction to simulation." The 2001 Winter Simulation Conference.

[Jain and Meeran, 1999] Jain, A.S., Meeran, S. (1999). Deterministic job-shop scheduling: Past, present and future. European Journal of Operational Research, 113, 390–434.

[Jalali et Van Nieuwenhuyse, 2015] Jalali, H., Van Nieuwenhuyse, I. (2015). "Simulation optimization in inventory replenishment: a classification." IIE Transactions, 47(11): p. 1217-1235.

[Jamalnia, 2017] Jamalnia, A. (2017) "Evaluating the performance of aggregate production planning strategies under uncertainty." PhD. The University of Manchester.

[Jamalnia et al., 2017] Jamalnia, A., Yang, J.B., Xu, D.L., Feili, A. (2017). "Novel decision model based on mixed chase and level strategy for aggregate production planning under uncertainty: case study in beverage industry." *Comput Ind Eng* 114, 54–68.

[Jamalnia et Soukhakian, 2009] Jamalnia, A., Soukhakian, M. A. (2009). "A Hybrid Fuzzy Goal Programming Approach with Different Goal Priorities to Aggregate Production Planning." *Computers & Industrial Engineering* 56: 1474–1486.

[Jan Olhager, 2013] Olhager, J. (2013). "Evolution of operations planning and control: from production to supply chains". *International Journal of Production Research*, 51(23-24):6836-6843.

[Jerbi et al., 2012] Jerbi, W., Gaudreault, J., D'Amours, S., Nourelfath,M., Lemieux, S., Marier, P., Bouchard, M. (2012). "Optimization/simulation-based framework for the evaluation of supply chain management policies in the forest product industry." IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Seoul, Korea.

[Joly et al., 2002] Joly, M., Moro, L. F. L., & Pinto, J. M. (2002). "Planning and scheduling for petroleum refineries using mathematical programming." *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 19, 207.

[Kadipasaoglu et Sridharan, 1997] Kadipasaoglu, S.N., Sridharan, V. (1997). "Measurement of instability in multi-level MRP systems." *International Journal of Production Research* 35, 713–737.

[Kallrath, 2002] Kallrath, J. (2002). Planning and scheduling in the process industry. OR Spectrum, 24, pp. 219–250

[Kamien et Li, 1990] Kamien, M.I., Li, L. (1990). ”Subcontracting, Coordination, Flexibility, and Production Smoothing in Aggregate Planning” Management Science, 36(11), 1352-1363.

[Kantorovich, 1960] Kantorovich, L.V. (1960). Mathematical methods of organizing and planning production. Management Science, 6:366-422.

[Karimi et al., 2003] Karimi, B., Fatemi Ghomi, S. M. T., Wilson, J. M. (2003). “The Capacitated Lot Sizing Problem: A Review of Models and Algorithms.”Omega 31, 365–378.

[Kathuria et al., 2007] Kathuria, R., Joshi, M.P., Porth, S.J. (2007). “Organizational alignment and performance: past, present and future”. Management Decision 45 (3), 503–517.

[Kellert et al., 1997] Kellert, P., Tchernev, N., Force, C. (1997). “Object-oriented methodology for FMS modelling and simulation.” *International Journal of Computer Integrated Manufacturing,* 1997, 10(6), 405-434.

[Kellner et al., 1999] Kellner, M.I., Madachy, R.J., Raffo, D.M. (1999). “Software process simulation modeling: Why? what? how?.” *Journal of Systems and Software*, 46 (2), 91–105.

[Kemmoé-Tchomté et al., 2015] Kemmoé-Tchomté, S., Lamy, D., Tchernev, N. (2015). “A metaheuristic based on simulation for stochastic Job-shop optimization”. In: Industrial Engineering and Systems Management (IESM), 2015 International Conference on. IEEE, Seville, Spain, 108–116.

[Kemmoe et al., 2017] Kemmoe, S., Lamy, D., Tchernev, N. An effective multi-start multi-level evolutionary local search for the flexible job-shop problem, Engineering Applications of Artificial Intelligence, Vol. 62, pp. 80-95, 2017.

[Khouja, 1998] Khouja, M. (1998). “An aggregate production planning framework for the evaluation of volume flexibility.” Prod Plan Control 9(2), 127–137.

[Kim et Kim., 2001] Kim, B., Kim, S. (2001). “Extended model for a hybrid production planning approach.” *Int. J. Prod. Econ.* 73, 165–173.

[Kleijnen 1995] Kleijnen, J.P.C. (1995). “Verification and Validation of Simulation Models.” *European Journal of Operational Research*, 82, 145-162.

[Kleijnen, 2005] Kleijnen, J. P. C. (2005). “Supply chain simulation tools and techniques: a survey”. International Journal of Simulation and Process Modelling, 1(1-2): p. 82-89.

[Kleijnen et al., 2005] Kleijnen, J.P. C., Sanchez, S.M., Lucas, T.W., Cioppa, T.M. (2005). "State-of-the-Art Review: A User's Guide to the Brave New World of Designing Simulation Experiments." INFORMS Journal on Computing, 17(3), 263-289.

[Klose et Drexl, 2005] Klose, A., Drexl, A. (2005). "Facility location models for distribution system design". *European Journal of Operational Research*, 162, 4–29.

[Koh et al., 2002] Koh, S. C. L., Saad, S. M., Jones, M. H. (2002). Uncertainty under MRP-planned Manufacture: Review and Categorization."*International Journal of Production Research* 40 (10), 2399–2421.

[Kok et al., 2005] Kok, T., Janssen, F., Doremalen, J. V., Wachem, E. V., Clerkx, M., Peeters, W. (2005). "Philips Electronics synchronizes its supply chain to end the Bullwhip effect." Interfaces, 35 (1), 37–48.

[Kondili et al., 1993] Kondili, E., Pantelides, C. C., & Sargent, R. W. H. (1993). A general algorithm for short-term scheduling of batch operations. Part 1. MELP formulation. Computers and Chemical Engineering, 17, pp. 211–227.

[Koutsoukis et al., 2000] Koutsoukis, N.S., Dominguez-Ballesteros, B., Lucas, C.A., Mitra, G. (2000). "A prototype decision support system for strategic planning under uncertainty." *International Journal of Physical Distribution and Logistics Management* 30, 640–660.

[Kouvelis and Yu, 1997] Kouvelis P., Yu G. (1997). "Robust discrete optimization and its applications." Kluwer Academic Publishers.

[Krajewski et Ritzman, 1996] Krajewski, L.J., Ritzman, L.P., (1996). "Operations management Strategy and analysis". Fourth ed. Addison-Wesley, Reading, MA (In: Olhager, J., Rudberg, M., Wikner, J., 2001. Long-term capacity management: Linking the perspectives from manufacturing strategy and sales and operations planning. *International Journal of Production Economics*, 69, 215–225).

[Kruskal, 1956] Kruskal, J.B. (1956). On the shortest spanning subtree of a graph and the traveling salesman problem. Proc. Am. Math. Soc. 7, 48_50.

[Lacomme, 1998] Lacomme, P. (1998). "Optimisation des systèmes de production : méthodes stochastiques et approche multi-agents." Thèse de doctorat, Université de Blaise Pascal, Clermont -Ferrand, France.

[Lamy, 2017] Lamy, D. (2017). Méthodes et outils pour l'ordonnancement d'ateliers avec prise en compte des contraintes additionnelles : énergétiques et environnementales. Thèse de doctorat. Université Blaise Pascal, Clermont Ferrand, France.

[Landry et al., 1983] Landry, M., Malouin, J.L., et Oral, M. (1983). "Model Validation in Operations Research." *European Journal of Operational Research*, 14, 207-220.

[Lang et al., 2011] Lang, J.C., Shen, Z.J.M. (2011). "Fix-and-optimize Heuristics for Capacitated Lot-sizing with Sequence-dependent Setups and Substitutions." *European Journal of Operational Research*, 214, 595–605.

[Larabi, 2010] M. Larabi, 2010. Le problème de job-shop avec transport : modélisation et optimisation, thèse de Doctorat en Informatique, Université Blaise Pascal, Clermont Ferrand, France, Décembre 2010.

[Lapide, 2005] Lapide, L. (2005). "Sales & Operations Planning Part III: A Diagnostic Model." *Journal of Business Forecasting*, 24 (1), 13–16.

[Lario et al., 2001] Lario, F.C., Rodrı´guez, A., Garcı´a, J.P., Escudero, L.F. (2001). "Analysis and definition of scenarios in stochastic programming for supply chain management in the automobile sector." IV Conference on Organization Engineering (CIO 2001), Sevilla (Spain).

[Law, 2007] Law, Averill M. (2007). "Simulation modeling and analysis." 4th ed. Boston: McGraw-Hill.

[Law, 2015] Law, A. M. (2015). "Simulation Modeling and Analysis". Fifth Edition, McGraw-Hill, New York.

[Lee et Kim, 2002] Lee, YH., Kim, SH., (2002). "Production-distribution in supply chain considering capacity constraints." *Computers & Industrial Engineering*, 43, 169–190.

[Lemoine et al., 2007] Comelli, M., Fenies, P., Lemoine, D., Tchernev, N. (2007). "Tactical planning for optimal cash flow and value sharing in Supply chain." *International Journal of Logistics Systems and Management*, In press.

[Leung et al., 2003] Leung, S.C.H., Wu, Y., Lai, K.K. (2003). "Multi-site aggregate production planning with multiple objectives: A goal programming approach." Prod. Plan. Control, 14, 425–436.

[Leung et al., 2006] Leung, SCH., Wu, Y., Lail, KK. (2006). "A stochastic programming approach for multi-site aggregate production

planning." *Journal of the Operational Research Society*, 57, 123-132.

[Leung et Chan, 2009] Leung, S.C.H., Chan, S.S.W. (2009). "A goal programming model for aggregate production planning with resource utilization constraint." *Comput. Ind. Eng.* 56, 1053–1064.

[Li et al., 2009] Li, C., Liu, F., Cao, H., Wang, Q. (2009). "A Stochastic Dynamic Programming Based Model for Uncertain Production Planning of Re-manufacturing System." *International Journal of Production Research*, 47, 3657–3668.

[Liang, 2007] Liang, T.-F. (2007). "Application of Interactive Possibilistic Linear Programming to Aggregate Production Planning with Multiple Imprecise Objectives." *Production Planning & Control*: The Management of Operations 18, 548–560.

[Linn and Zhang, 1999] Linn, R., Zhang, W. (1999). Hybrid flow shop scheduling: a survey. Computers & Industrial Engineering. 37, pp. 57–61.

[Liu et Takakuwa, 2009] Liu, Y., Takakuwa, S. (2009). "Simulation-based personnel planning for materials handling at a cross-docking center under retail distribution environment." The 2009 Winter Simulation Conference.

[Liu et Tu, 2008] Liu, X., Tu, Yl. (2008). "Production planning with limited inventory capacity and allowed stockout."*Int. J. Production Economics* 111,180–191.

[Lopez, 1991] Lopez P. (1991). Approche énergétique pour l'ordonnancement de tâches sous contraintes de temps et de ressources. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier de Toulouse, France, 1991.

[Lin et al., 2002] Lin, X., Floudas, C. A., Modi, S., & Juhasz, N. M. (2002). "Continuous-time optimization approach for medium-range production scheduling of a multiproduct batch plant." Industrial and Engineering Chemistry Research, 41, 3884.

[Luis et al., 2016] Luis, P., Catalá, M., Moreno, S., Aníbal, M., Blanco, J., Bandoni, A. (2016). "A bi-objective optimization model for tactical planning in the pome fruit industry supply chain." *Computers and Electronics in Agriculture* 130.

[Luss, 1982] H. Luss. 1982. "Operations Research and Capacity Expansion Problems: A Survey". Operations Research, vol. 30(5), p. 907-947.

[Manzani et Gamberini, 2008] Manzani, R., Gamberini, R. 2008. "Design, management and control of logistic distribution systems". In: Kordic, Vedran (Eds.), Supply Chains: Theory and Applications.

International Journal of Advanced Robotic Systems, (Chapter 15, Published by I-Tech Education and Publishing, Vienna, Austria. ISBN: 978-3-902613), pp. 263–290.

[Maravelias, 2012] Maravelias, C. T. (2012). General framework and modeling approach classification for chemical production scheduling. AIChE Journal, 58(6), pp.1812–1828.

[Maravelias et Sung, 2009] Maravelias, C. T., Sung, C. (2009). "Integration of production planning and scheduling Overview, challenges and opportunities." Computers & Chemical Engineering 33, 12, 1919–1930.

[Marques et al., 2013] Marques, A. F., de Sousa, J.P., Rönnqvist, M., Jafe, R. (2013). "Combining optimization and simulation tools for short-term planning of forest operations." Scandinavian Journal of Forest Research, 29(sup1), 166-177.

[Martínez-Costa et al., 2014] Martínez-Costa, C. Mas-Machuca, M., Ernest Benedito, E., Corominas, A. 2014. "A review of mathematical programming models for strategic capacity planning in manufacturing", International Journal of Production Economics, Vol. 153, pp 66–85.

[Marty, 1997] Marty C., (1997). Le juste à temps produire autrement. 2ème édition, Edition Hermes, p. 288.

[Masud et Hwang. 1980] Masud, ABU.S.M., Hwang, C. L. (1980). "An aggregate production planning model and application of three multiple objective decision methods". *International Journal of Production Research*, 18:6, 741-752.

[Mason-Jones et Towill, 1998] Mason-Jones, R., Towill, DR. (1998) "Shrinking the supply chain uncertainty circle." IOM Control, 24, 17–22.

[McDonald et Karimi, 1997] McDonald, C.M., Karimi, I.A. (1997) "Planning and scheduling of parallel semi-continuous processes." 1. Production planning. Ind Eng Chem Res 36(7), 2691–2700.

[McGarrah, 1983] McGarrah, R.E. (1983). "Production and Logistics Management." Wiley, New York.

[Mehdizadeha et al., 2018] E. Mehdizadeha, E., Akhavan Niaki, S.T., Hemati, M. (2018). "A bi-objective aggregate production planning problem with learning effect and machine deterioration: Modeling and solution", *Computers and Operations Research*, 91, 21–36.

[Melo et al., 2009] Melo, M.T., Nickel, S., Saldanha-da-gama, F. (2009). "Facility location and supply chain management – a review". *European Journal of Operational Research*, 401-412.

[Méndez et al., 2006] Méndez, C.A., Cerda, J., Grossmann, I.E., Harjunkoski, I., Fahl, M. (2006). State-of-the-art review of optimization methods for short-term scheduling of batch processes. Computers and Chemical Engineering, 30, pp. 913–946.

[Metropolis and Ulam, 1949] Metropolis N., Ulam S. (1949). "The Monte Carlo Method". Journal of the American statistical association.

[Meyr et al., 2002] Meyr, H., Wagner, M., & Rohde, J. (2002). Structure of advanced planning systems. In H. Stadtler, & C. Kilger (Eds.), Supply chain management and advanced planning: Concepts, models software and case studies (2nd ed., pp. 99–104). Berlin: Springer-Verlag.

[Mezghani et al., 2012] Mezghani, M., Loukil, T., Aouni, B. (2012). "Aggregate planning through the imprecise goal programming model: integration of the manager's preferences." *International Transactions in Operational Research,* 19 (4), 581-597.

[Min et Zhou, 2002] Min, H., Zhou, G. (2002). "Supply Chain Modeling: Past, Present and Future." *Computers & Industrial Engineering* 43 (1–2), 231–249.

[Mocquillon et al., 2011] Mocquillon, C., Lenté , C., T'Kindt, V. (2011). "An efficient heuristic for medium-term planning in shampoo production." *Int. J. Production Economics* 129, 178–185.

[Moghaddam et Safaei, 2006] Moghaddam, R.T., Safaei, N. (2006) "An Evolutionary Algorithm for a Single-Item Resource-Constrained Aggregate Production Planning Problem." IEEE Congress on Evolutionary Computation.

[Morecroft et Robinson, 2006] Morecroft, J. D. W., Robinson, S. (2006). "Comparing Discrete-Event Simulation and System Dynamics: Modelling a fishery." In: Robinson, S., Taylor, S., Brailsford, S. C. & Garnett, J., (eds.) Proceedings of the Operational Research Society Simulation Workshop, Royal Leamington Spa, UK.

[Morgan et al., 2016] Morgan, J.S., Howick, S., Belton, V. (2016). "A toolkit of designs for mixing Discrete Event Simulation and System Dynamics." *European Journal of Operational Research*, 16 March, 907-918.

[Mortezaei et al., 2013] Mortezaei, N., Zulkifli, N., Hong, T. S., Yusuff, R. M. (2013). "Multi-objective aggregate production planning model with fuzzy parameters and its solving methods." Life Science Journal, 10(4), 2406-2414.

[Mula, 2004] Mula, J. (2004). "Models for production planning under uncertainty. Application in a company of the automobile

sector". Ph.D (in Spanish), Polytechnic University of Valencia, Spain. ISBN: 84-688-6987-2.

[Mula et al., 2006] Mula, J., Poler, R., García-Sabater, J. P., Lario, F. C. (2006). "Models for Production Planning under Uncertainty: A Review." *International Journal of Production Economics*, 103, 271–285.

[Mula et al., 2014] Mula, J., Díaz-Madroñero, M., Peidro, D. (2014): "A review of discrete-time optimization models for tactical production planning." *International Journal of Production Research*, 5171-5205.

[Murthy et Ma, 1991] Murthy, D.N.P., Ma, L. (1991). "MRP with uncertainty: A review and some extensions." *International Journal of Production Economics*, 25, 51–64.

[Murty, 1992] Murty, K.G. (1992). Network Programming. Prentice Hall, New Jersey.

[Naeem et al., 2013] Naeem, M. A., Dias, D. J., Tibrewal, R., Chang, P. C., iwari, M. K.T. (2013). "Production Planning Optimization for Manufacturing and Remanufacturing System in Stochastic Environment." Journal of Intelligent Manufacturing 24 (4), 717–728.

[Nam et Logendran, 1992] Nam, S., Logendran, R. (1992). "Aggregate production planning - A survey of models and methodologies". *European Journal of Operational Research*, 61, 255-272.

[Nam et Logendram, 1995] Nam, S., Logendram, R. (1995). "Modified production switching heuristics for aggregate production planning." Comput. Oper. Res. 22, 531–541.

[Nance, 1981] Nance, R.E. (1981). "Model representation in discrete event simulation: the conical methodology, Technical Report." CS-81003-R, Department of Computer Science, Virginia Tech, Blacksburg, Va.

[Nance et Sargent, 2002] Nance, R.E., and Sargent, R.G. (2002). "Perspectives on the Evolution of Simulation". Operations Reseach. 50: 161–172 (2002).

[Neiro et Pinto, 2005] Neiro, S. M. S., &Pinto, J. M. (2005). "Multiperiod optimization for production planning of petroleum refineries." Chemical Engineering Communications, 192, 62.

[Nollet et al., 1994] Nollet, Kelada, Diorok. (1994). La gestion des opérations et de la production. Edition Morin Gaetan, Montréal, Canada.

[Noroozi et Wikner, 2017] Noroozi, S., Wikner, J. (2017). "Sales and operations planning in the process industry: A literature review." *International Journal of Production Economics* 188, 139–155.

[Nowak, 2013] Nowak. M. (2013). "An interactive procedure for aggregate production planning." Croatian Operational Research Review (CRORR), Vol. 4.

[O'Grady, 1982] O'Grady, P.J. (1982). "Determining the Master Production Schedule." *Journal of the Operational Research Society* 33, 658 – 658.

[Olhager et al., 2001] Olhager J., Rudberg M., Wikner J., 2001. "Long-Term capacity management: Linking the perspectives from manufacturing strategy and sales and operations planning". International Journal of Production Economics, 69, pp. 215-255.

[Olhager et Rudberg, 2002] Olhager, J., Rudberg, M. (2002). "Linking manufacturing strategy decisions on process choice with manufacturing planning and control systems". *International Journal of Production Research*, 40 (10), 2335–2351.

[Olhager et Selldin, 2007] Olhager, J., Selldin, E. (2007). "Manufacturing Planning and Control Approaches: Market Alignment and Performance." *International Journal of Production Research*, 45 (6), 1469–1484.

[Omar et al., 2012] Omar, M.K., Jusoh, M.M., Omar, M. (2012) "Investigating the benefits of fuzzy mathematical programming approach for solving aggregate production planning." WCCI 2012 IEEE World Congress on Computational Intelligence, Brisbane, Australia, 1–6.

[Orlicky, 1975] Orlicky, J. (1975). Material Requirements Planning , McGraw-Hill, London.

[Ovacik et Uzsoy, 2012] Ovacik, I. M., Uzsoy, R. (2012). "Decomposition methods for complex factory scheduling problems." Springer Science & Business Media.

[Palaniappan et al., 2011] Palaniappan, P. L. K., Jawahar, N. (2011). "A Genetic Algorithm for Simultaneous Optimisation of Lot Sizing and Scheduling in a Flow Line Assembly." *International Journal of Production Research* 49, 375–400.

[Papadimitriou et Steiglitz, 1998] Papadimitriou, C.H., Steiglitz, K. (1998). Combinatorial Optimization: Algorithms and Complexity. Courier Corporation.

[Pareto, 1896] Pareto, V. (1896). Cours d'économie politique. Rouge, Lausanne, Suisse.

[Pastor et al., 2009] Pastor, R., Altimiras, J., Mateo, M. (2009). "Planning production using mathematical programming: The case of a woodturning company." *Computers & Operations Research* 36, 2173 – 2178.

[Pasupathy et Henderson, 2011] Pasupathy, R., Henderson, S.G. (2011). "SimOpt: A library of simulation optimization problems." The 2011 Winter Simulation Conference.

[Peidro et al., 2009] Peidro, D., Mula, J., Poler, R., Lario, F.C. (2009). "Quantitative models for supply chain planning under uncertainty: a review." *Int J Adv Manuf Technol*, 43, 400–420.

[Pfeiffer et al., 2007] Pfeiffer, András., Kádár, B., et Monostori, L. (2007). "Stability-oriented evaluation of rescheduling strategies, by using simulation." Computers in Industry, 58(7), 630-643.

[Pinedo, 2012] Pinedo, M.L., 2012. Scheduling. (Fourth Edi), Springer US, Boston, MA. doi:10.1007/978-1-4614-2361-4

[Pochet, 2001] Pochet, Y. (2001). Mathematical Programming Models and Formulations for Deterministic Production Planning Problems. In Jünger, M., Naddef, D. (ed.), Computational Combinatorial Optimization, Lecture Notes in Computer Science, 57–111, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

[Popper, 1973] Popper, J. (1973). La dynamique des systèmes, principes et applications. Editions d'organisation, Paris.

[Pritsker, 1986] Pritsker, A. A. B. (1986). "Introduction to stimulation and Slam II." Third edition. United States, Web.

[Pritsker et al., 1997] Pritsker, A.A.B., O'Rielly, J.J., Laval, D.K. (1997). "Simulation with Visual SLAM and AweSim." John Wiley & Sons, New York.

[Rabelo et al., 2005] Rabelo, L., Helal, M., Jones, A., Min, H.S. (2005). "Enterprise simulation: a hybrid system approach." *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 18, 498-508, CLD.

[Rabelo et al. , 2007] Rabelo, L., Eskandari, H., Shaalan, T., Helal, M. (2007). "Value chain analysis using hybrid simulation and AHP." *International Journal of Production Economics*, 105(2), 536-547.

[Ramezanian et al. 2012] Ramezanian., R., Rahmani, D., Barzinpour, F. (2012). "An aggregate production planning model for two phase production systems: Solving with genetic algorithm and tabu search". Expert Systems with Applications, 39, 1256–1263.

[Reiner et Trcka, 2004] Reiner, G., Trcka, M. (2004). "Customized supply chain design: problems and alternatives for a production company in the food industry. A simulation based analysis." *International Journal of Production Economic*, 89, 217–229.

[Rexhausen et al., 2012] Rexhausen, D., Pibernik, R., Kaiser, G. (2012). "Customer-facing supply chain practices - The impact of demand and distribution management on supply chain success". *Journal of Operations Management*, 30(4), 269–281.

[Richardson, 1991] Richardson, G. P. (1991). "Feedback thought in social science and systems theory." Philadelphia. PA: University of Pennsylvania Press.

[Rizk et al., 2008] Rizk, N., Martel, A., D'Amours, S. (2008). "Synchronized Production–Distribution Planning in a Single-plant Multi-destination Network." Journal of the Operational Research Society 59, 90–104.

[Robinson, 2004] Robinson, S. (2004). "Simulation: The Practice of Model Development and Use". John Wiley & Sons, Chichester, 2004.

[Rodammer et al., 1988] F.A. Rodammer et K. Preston White. (1988). A recent survey of production scheduling. IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics, 18(6), pp. 841-851.

[Rodier, 2010] Rodier, S. (2010). "Une tentative d'unification et de résolution des problèmes de modélisation et d'optimisation dans les systèmes hospitaliers Application au nouvel hôpital Estaing." thèse de Doctorat en Informatique, Université Blaise Pascal, Clermont Ferrand, II France, Juillet 2010.

[Rosenhead et al., 1972] Rosenhead, J., Elton, M., Gupta, S.K. (1972). "Robustness and optimality as criteria for strategic decisions." Operational Research Quarterly 23 (4), 413–431.

[Rozman et al., 2014] Rozman, Č., Škraba, A., Pažek, K., Kljajić, M. (2014). "The development of sugar beet production and processing simulation model–A system dynamics approach to support decision making processes." Organizacija, 47(2), 99–105.

[Ruiz et al., 2010] Ruiz, R., Vázquez-Rodríguez, J. (2010). The hybrid flow shop scheduling problem. European Journal of Operational Research, 205 (1), pp. 1-18.

[Ryu et al., 2004] Ryu, J.H., Dua, V., Pistikopoulos, E.N. (2004) "A bi level programming framework for enterprise-wide process networks under uncertainty." *Comput Chem Eng* 28(6–7), 1121–1129.

[Sahinidis, 2004] Sahinidis, N. V. (2004). "Optimization under Uncertainty: State-of-the-art and Opportunities." *Computers & Chemical Engineering* 28, 971–983.

[Salomon et al. 1993] Salomon, M., Kuik, R., VanWassenhove, L. (1993). Statistical search methods for lot-sizing problems, Annals Operations Research 41, 453–468.

[Sargent, 1991] SARGENT, R.G. (1991). "Simulation Model Verification and Validation." In Proceedings of the 1991 Winter Simulation Conference, 37-47.

[Schroeder et al., 1986] Schroeder, R.G., Larson, P.D. (1986). "A Reformulation of the aggregate planning problem." J. Oper. Manag. 6, 245–256.

[Shanthikumar et Sargent, 1983] Shanthikumar, J.G., Sargent, R.G. (1983). "A unifying view of hybrid simulation/analytic models and modeling". Oper. Res. 31 (6), 1030–1052.

[Shen et Huang, 2010] Chen, S.P., Huang, W.L. (2010). "A membership function approach for aggregate production planning problems in fuzzy environments." *International Journal of Production Research*, 48(23), 7003-7023.

[Shi et al., 2011] Shi, J., Zhang, G., Sha, J. (2011). "Optimal Production Planning for a Multi-product Closed Loop System with Uncertain Demand and Return."*Computers & Operations Research*, 38, 641–650.

[Shi et Haase, 1996] Shi, Y., Haase, C. (1996). "Optimal trade-offs of aggregate production planning with multi-objective and multi-capacity-demand levels." *Int. J. Oper. & Quant. Manag.* 2, 127–143.

[Sillekens et al., 2011] Sillekens, T., Koberstein, A., Suhl, L. (2011). "Aggregate production planning in the automotive industry with special consideration of workforce flexibility." *Int. J. Prod. Res.* 49, 5055–5078.

[Silver, 1972] Silver, E.A. (1972), "Medium range aggregate production planning: State of the art", *Journal of Production and inventory Management*, 13, 15-38.

[Simchi-Levi et al., 2004] Simchi-Levi D., Kaminsk P., Simchi-Levi E. 2004. "Managing the Supply Chain: The Definitive Guide for the Business Professional". McGraw-Hill, New-York.

[Sinclair et Erasmus, 1992] Sinclair, M., Erasmus, S. (1992). "A microcomputer-based decision support system for the management of lumber mill production." Computers & Industrial Engineering, 22(4), 435-446.

[Snyder, 2006] Snyder L.V. (2006). "Facility location under uncertainty: A review." IIE Transactions 38, 7, 537-554.

[Soler, 2001] Y. Soler. "Planification et suivi d'un projet". 2001. Guide méthodologique CNRS du référentiel qualité DSI.

[Spitter et al., 2005] Spitter, J.M., Kok, A.G., Dellaert, N.P. (2005) "Timing production in LP models in a rolling schedule." *Int J Prod Econ* 93–94, 319–329.

[Stefansson et al., 2006] Stefansson, H., Shah, N., & Jensson, P. (2006). "Multiscale planning and scheduling in the secondary pharmaceutical industry." AIChE Journal, 52, 4133.

[Stephen et al., 2004] Stephen, C., Leung, H., Wu, Y. (2004) "A robust optimization model for stochastic aggregate production planning," Production Planning & Control: The Management of Operations, 15:5, 502-514.

[Steuer, 1986] R. E. Steuer. Multiple criteria optimization: Theory, computation and application. John Wiley, New York, 1986.

[Stevenson et al., 2005] Stevenson, M., Hendry, L. C., Kingsman, B. G. (2005). "A review of production planning and control: the applicability of key concepts to the make-to-order industry." *International Journal of Production Research*, 43:5, 869-898.

[Su et Jin, 2008] Su, Y., Jin, Z. (2008). "Modeling Health Service Centers with Simulation and System Dynamics." Proceedings of the Tenth International Conference on Computer Modeling and Simulation (UKSIM). Cambridge, UK.

[Sullivan et Fordyce, 1990] Sullivan, G., Fordyce, K. (1990). "IBM Burlington's Logistics Management System. Interfaces". 20(1), 43–64.

[Sundaramoorthy and Maravelias, 2008] Sundaramoorthy, A., & Maravelias, C. T. (2008). Modeling of storage in batching and scheduling of multistage processes. Industrial & Engineering Chemistry Research, 47(17), pp. 6648–6660.

[Sweetser, 1999] Sweetser, A. (1999). "A Comparison of System Dynamics and Discrete Event Simulation." in In Proceedings of 17th International Conference of the System Dynamics Society and 5th Australian & New Zealand Systems Conference, Wellington, New Zealand.

[Tadei, 1995] Tadei, R., Trubian, J.L., Avendaño, F., Croce, D., Menga, G. (1995). "Aggregate planning and scheduling in the food industry: A case study." Eur. J. Oper. Res. 87, 564–573.

[Tako et Robinson, 2012] Tako, A.A., Robinson, S. (2012). "The application of discrete event simulation and system dynamics in the logistics and supply chain context." Decision Support Systems, 52, 802–815.

[Tang et al., 2000] Tang, J., Wang, D., Fung, R. (2000). "Fuzzy formulation for multi-product aggregate production planning." Prod. Plan. Control, 11, 670–676.

[Tang et Grubbström, 2002] Ou Tang, Robert W. Grubbström. 2002. "Planning and replanning the master production schedule under demand uncertainty." International Journal of Production Economics, 78(3):323–334.

[Taubert, 1968] Taubert, W.H. (1968). "A search decision rule for the aggregate scheduling problem." Manag. Sci. 14, 343–359.

[Tchernev, 1997] Tchernev, N. (1997). "Modélisation du processus logistique dans les systèmes flexibles de production." Thèse de Doctorat en Informatique, Université Blaise Pascal, Clermont Ferrand, France, Janvier 1997.

[Terzi et Cavalieri, 2004] Terzi, S., Cavalieri, S. (2004). Simulation in the supply chain context: a survey. Computers in Industry, 53(1), 3-16.

[Thomas et Lamouri, 2000] Thomas, A., Lamouri S. (2000). "The new problem with Sales, Inventories and Operations planning in a Supply Chain environment." In: Proceedings of the International Society for Optical Engineering on Intelligent Systems in Design and manufacturing, Boston, USA, 321-329.

[Thomé et al., 2011] Thomé, A.M.T., Scavarda, L.F., Fernandez, N.S., Scavarda, A.J. (2011). "Sales and operations planning: A research synthesis" *International Journal of Production Economics*, 138, 1-13, Published by Elsevier B.V.

[Thomé et al., 2012] Antônio Marcio Tavares Thomé, Luiz Felipe Scavarda, Nicole Suclla Fernandez, Annibal José Scavarda. (2012). Sales and operations planning: A research synthesis, International Journal of Production Economics, 138, pp. 1–13.

[Thomé et al., 2012b] Thomé, A. M. T., Scavarda, L. F., Fernandez, N. S., Scavarda, A. J. (2012b). "Sales and Operations Planning and

the Firm Performance." *International Journal of Productivity and Performance Management*, 61 (4), 359–381.

[Thomé et al., 2014] Thomé, A.M.T., Sousa, R.S., Rodriguez, R., Scavarda, L.F. (2014). "The impact of sales and operations planning practices on manufacturing operational performance". *International Journal of Production Research*, 52(7), 2108-2121.

[Thompson et al., 1993] Thompson, S.D., Watanabe, D.T., Davis, W.J. (1993). "A comparative study of aggregate production planning strategies under conditions of uncertainty and cyclic product demands." *International Journal of Production Research* 31, 1957–1979.

[Tian et al., 2010] Tian, F., Sean P., Willems, K., Kempf, G. (2010) "An iterative approach to item-level tactical production and inventory planning". *Int. J. Production Economics*, 439-450.

[Truong et Azadivar, 2003] Truong, TH., Azadivar, F. (2003). "Simulation based optimization for supply chain configuration design." In: Chick, S., Sánchez, PJ., Ferrin, D., Morrice, DJ., (eds) Proceedings of the 2003 Winter Simulation Conference, 1268–1275

[Tuomikangas et Kaipia, 2014] Tuomikangas, N., Kaipia, R. (2014). "Coordination framework for sales and operations planning (S&OP): Synthesis from the literature". *Int. J. Production Economics,* 154, 243–262.

[Umeda et Lee, 2004] Umeda, S., Lee T. (2004). "Design specifications of a generic supply chain simulator." Proceedings of the 2004 Winter simulation conference.

[Vamanan et al., 2004] 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 Landeghem et Vanmaele, 2002] Van Landeghem H., Vanmaele H., 2002. "Robust planning: a new paradigm for demand chain planning, Journal of Operations Management" Volume 20, pp769–783.

[Van Mieghem, 2003] J.A. Van Mieghem. (2003). "Capacity Management, Investment, and Hedging: Review and Recent Developments". Manufacturing & Service Operations Management, vol. 5(4), p. 269-302.

[Venkateswaran et Son, 2005] Venkateswaran, J., Son, Y. J. (2005). "Hybrid system dynamique-discrete event simulation-based architecture for hierarchical production planning." *International Journal of Production Research*, 43(20), 4397-4429.

[Vollmann et al., 1988] Vollmann, T.E., Berry, D.W., Whybark. (1988). "Manufacturing, Planning and Systems Control". The Business One Irwin.

[Vollman et al., 1992] T.E. Vollman, D.W. Berry, Whybark. (1992. "Manufacturing, Planning and Systems Control". The Business One Irwin.

[Vollmann et al., 2005] Vollmann, T.E., Berry, W.L., Whybark, D.C., Jacobs, F.R. (2005). "Manufacturing Planning and Control for Supply Chain Management". McGraw-Hill, Boston.

[Wahlers et al., 1994] Wahlers, J.L., Cox, J.F. (1994). "Competitive factors and performance measurement: Applying the theory of constraints to meet customer needs". *International Journal of Production Economics*, 37, 229–240.

[Wallace, 2004] Wallace, T.F., (2004). "Sales and operations planning-The "how-to" handbook". T.F. Wallace & Company.

[Wallace et Stahl, 2006] Wallace, T. F., Stahl, R. A. (2006). "Sales and Operations Planning: The Executive Guide". Columbia Township, OH: T.F. Wallace.

[Wang et Fang, 2001] Wang, R.C., Fang, H.H. (2001). "Aggregate production planning with multiple objectives in a fuzzy environment." Eur. J. Oper. Res. 133, 521–536.

[Wang et Liang, 2005] Wang, R.C., Liang, T.F. (2005). "Applying possibilistic linear programming to aggregate production planning." I*nt. J. Prod. Econ*. 98, 328–341.

[Wang et Shu, 2005] Wang, J.T., Shu, Y.F. (2005) "Fuzzy decision modeling for supply chain management." Fuzzy Sets Syst 150(1), 107–127.

[Wang et Zheng, 2013] Wang, H.F., Zheng, K.W. (2013) "Application of fuzzy linear programming to aggregate production plan of a refinery industry in Taiwan." *J Oper Res Soc* 64(2), 169–184.

[Wei et al., 2011] Wei, C., Li, Y., Cai, X. (2011). "Robust Optimal Policies of Production and Inventory with Uncertain Returns and Demand." *International Journal of Production Economics*, 134, 357–367.

[Wenchao et al., 2017] Wenchao, W., Guimarães, L., Amorim, P., Almada-Lobo, B. (2017). "Tactical production and distribution planning with dependency issues on the production process." Omega 67, 99–114.

[Wight, 1981] Wight, O. (1981). Manufacturing Resource Planning, MRP II: Unlocking America's Productivity Potential, Oliver Wigth Limited Publications, Inc. Williston, VT 05495.

[Williams, 1981] Williams, J.F. (1981). "Heuristic techniques for simultaneous scheduling of production and distribution in multi-echelon structures: Theory and empirical comparisons." Management Science, 27-3, 336-352.

[Wolosewicz, 2008] Wolosewicz, C. (2008). "Approche intégrée en planification et ordonnancement de la production." Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, Gardanne, France.

[Womack et al, 1992] Womack J.P, Johnes D.T, Roos D., (1992). "Le système qui va changer le monde : Analyse des industries automobiles mondiales dirigée par le MIT". Édition Dunod.

[Wu et al., 2005] S.D. Wu, M. Erkoc and S. Karabuk, S. (2005). "Managing Capacity in the High-Tech Industry: A Review of Literature". The Engineering Economist, vol. 50, p. 125-158.

[Wu et Ierapetritou, 2007] Wu, D., Ierapetritou, M. G. (2007). "Hierarchical approach for production planning and scheduling under uncertainty." Chemical Engineering Process, 46, 1129.

[Xie et al., 2003] Xie, J., Zhao, X., Lee, T.S. (2003). "Freezing the master production schedule under single resource constraint and demand uncertainty." *International Journal of Production Economics* 83, 65–84.

[Yan et al., 2003] Yan, H. S., Xia, Q. F., Zhu, M. R., Liu, X. L., & Guo, Z. M. (2003). "Integrated production planning and scheduling on automobile assembly lines." IIE Transactions, 35, 711.

[Zhao et al., 2011] Lan, Y., Zhao, R., Tang, W. (2011). "Minimum risk criterion for uncertain production planning problems." *Computers & Industrial Engineering* 61, 591–599.

[Zimmermann, 1976] Zimmermann, H.-J. (1976). "Description and optimisation of fuzzy systems." Int. J. Gen. Syst. 2, 209–215.

[Zimmermann, 1991] Zimmermann, H.-J. (1991). Fuzzy set theory and its application (2nd ed.). Boston: Kluwer Academic Publishers.

[Zülch et al., 2011] Zülch, G., Koruca, H.I., Börkircher, M. (2011). "Simulation-supported change process for product customization – A case study in a garment company." Computers in Industry, 62(6), 568-577.

Annexes

Annexe 1 : Grille de lecture-état de l'art

N° article	Auteur (s)	Année	Type de décision			Type de papier		Type de problème(S&OP, APP, MPS...)	Objectif principal de l'article	Multi (Familles F/produits P)	Multi-périodes	Contraintes de production				Contraintes de capacité de stockage			contrainte de durée minimale de stockage	multi-objective	Contexte (Déterministe:D, Incertain: I)	Approache d0e modélisation (Anglais)	Méthode de résolution(Anglais)
			Strategique	Tactique	Operationnelle	Orienté modélisation	Orienté résolution					Capacité	Dimentionnement de capacité	Affectation	Capabilité Technique	Capacité Globale	Dimensionnement des stocks	Affectation d'emplacements					
1	Travaux de thèse	2020	X	X	X		X	Integrated production-distribution planning	Déterminer un plan de production, de stockage et de distribution qui maximise le profit	F & P	X	X		X	X	X		X	X		D	Mixed integer Linear programming	Cplex

2	Masud et Hwang	1980		X			X	APP	Déterminer un plan de production qui maximise le profit et qui minimise la valeur des stocks, les coûts de changement de l'effectif et les commandes en attente	P	X	X							X	D	Multiple objective linear programming formulation	Goal Programming (GP),Step Method (STEM), and Sequential Multiple Objective Problem Solving (SEMOPS)+ LP package MPS/360
3	Al-e-hashem et al.	2011		X			X	APP	Développer un APP multi-objectif et robuste basé sur le conflit existant entre les pertes totales de la chaîne d'approvisionnement et le niveau de satisfaction des clients	P	X	X	X			X			X	I	Multi-objective mixed integer non linear programming	Branch and bound algorithm (LINGO8.0)
4	Liu et Tu	2008		X			X	MPS	Développer un plan de production avec une capacité de stocks limités et une rupture de stock autorisée dont l'objectif est de minimiser le coût total	P	X	X				X				D	Linear programming	Dynamic programming & Microsoft Visual C++ 6.0, and the computer code called Inventory Capacity Limiting with Stockout (ICLS)
5	Leung et Chan	2009	X				X	APP	Déterminer un plan de production optimal avec un niveau d'effectifs donné, dont l'objectif est de mieux contrôler les niveaux de stock, l'utilisation des machines, et la pénurie	P	X	X				X			X	D	Goal programming (linear programming for application)	Simplex method
6	Luis et al.	2016		X			X	MPS	Mesurer la performance du système de production en agroalimentaire en utilisant deux critéres d'évaluation ; maximiser le profit et minimiser la pénurie	P	X	X				X		X	X	X	D	Mixed integer Linear programming.	Lexicographic approach & GAMS version 23.0 & CPLEX 11.2

7	Wang et Liang	2005	X				X	APP	Développer une approche interactive afin de déterminer le plan global optimal en minimisant au maximum la valeur des coûts totaux imprécis, en maximisant la possibilté d'obtenir des coûts totaux les plus bas et en minimisant le risque d'obtenir des coûts totaux les plus élevés	F	X	X				X					I	Possibilistic Linear programming	LINDO
8	Singhvi et Shenoy	2002	X				X	APP	Déterminer le plan agrégé qui maximise le profit en déterminant les niveaux optimaux des variables de décisions (taux de production/niveau de stock/sous-traitance…)		X	X									D	Mixed integer linear programming(MILP)	Pinch tanalysis approach & GAMS15
9	Shen et Huang	2010		X			X	APP	Déterminer la fonction d'appartenance pour le coût total minimum flou du problème d'APP et transformer le modèle APP flou en une famille de modèles APP nets afin de définir les plans de production globaux optimaux		X	X									I	Fuzzy programming.	Membership function approach & LINDO Systems 1999
10	Jamalnia et Soukhakian	2009		X			X	APP	Définir un plan de production qui minimise les coûts de production totaux, les coûts de possession de commande et les coûts liés aux modifications de l'effectif et qui maximise la satisfaction totale du client	P	X	X				X				X	I	Non linear programming	GENOCOP III (Genetic Algorithm for Numerical Optimization of Constrained Problems)

11	Wenchao et al.	2017		X			X	Integrated production-distribution planning	Définir un modèle qui intègre une structure de production en deux étapes pour élaborer un plan tactique des activités de production et de distribution	F	X	X									D	Mixed integer linear programming	Decomposition-based heuristics
12	Chaturvedi et Bandyopadhyay	2015		X			X	APP	Déterminer la gamme de production à différents moments et calculer les objectifs de production avec la moindre variation des niveaux de production entre différentes périodes afin de satisfaire les demandes tout en maintenant les limites des stocks		X					X					D	Euclidean shortest path	Pinch tanalysis approach
13	Da Silva et al.	2006	X				X	APP	Développer un modèle pour optimiser trois critères de performance : le profit, les commandes en retard, et les changements dans le niveau d'effectifs et proposer un système d'aide à la décision afin de renforcer son application dans la pratique	F	X	X				X				X	D	Mixed integer Linear programming	LINGO 5.0
14	Shi et al.	2011		X			X	SCP	Déterminer simultanément les quantités de production des produits neufs, les quantités remises à neuf et les prix d'acquisition des produits usagés, de manière à maximiser le bénéfice total attendu du fabricant	P		X									I	Non linear programming	Lagrangian relaxation & MATLAB.

15	Nowak	2013		X			X	APP	Proposition d'une procédure interactive dont la minimisation des coûts était l'objectif le plus important, en plus de la minimisation des fluctuations des cycles de production		X	X								X	I	Linear programming	Interactive procedure (Simulation &LP)
16	Leung et al.	2006		X		X		APP	Déterminer des plans optimaux de charge de production pour un problème de planification avec des contraintes supplémentaires telles que la sélection des préférences de l'usine	P	X	X		X							I	Stochastic programming	
17	Liang	2007		X			X	APP	Développer un modèle imprécis qui minimise simultanément les coûts de production totaux et les changements dans le niveau de main-d'œuvre en se référant à une demande, des coefficients de coûts, des ressources disponibles et des capacités imprécises.	P	X	X				X				X	I	Interactive possibilistic linear programming	LINDO
18	Ramezanian et al.	2012	X				X	APP	Déterminer un plan de production qui minimise les coûts de production	P	X	X									D	Mixed integer Linear programming.	Genetic algorithm and tabu search
19	Akhil et Udatta	2005	X				X	APP	Développer une formulation basée sur la configuration dans un environnement de fabrication et génération des données d'entrée à l'aide des heuristiques pour réaliser des plans de production	F	X	X									D	Mixed Integer programming	Heuristics & CPLEX

20	Ferland et al.	2004	X				X	APP	Déterminer les volumes de produits dans une scierie avec différents types de troncs et utilisant différents schémas de coupe.	F		X								X	D	Mathematical programming	Heuristic (Tabu search algorithm) & C++.
21	Florian et Klein	1971		X		X		MPS	Déterminer le plan de production qui minimise les coûts de production et de stockage pour satisfaire les commandes client à temps.		X	X										D	Dynamic programming recursion	
22	Aghezzaf et al.	2010		X			X	APP	Présentation de trois modèles alternatifs pour générer des plans de production robustes à la variabilité résultant de l'incertitude de la demande	P & F	X	X		X							D & I	Mixed integer Linear programming	ILOG Cplex 10.1
23	Tian et al.	2010		X			X	Production-inventory planning	Proposition d'une approche itérative pour résoudre conjointement les problèmes de planification de la production et de placement des stocks de sécurité	P	X	X							X			D	Linear programming & Non Linear programming	ILOG CPLEX & software tool from Optiant called PowerChain Inventory
24	Pastor et al.	2009		X			X	Production planning for parallel machines	Déterminer le plan de production dont l'objectif est de répondre à la demande au moindre coût	F	X	X		X	X						D	Mixed integer Linear programming.	ILOG CPLEX 8.1
25	Gansterer	2015	X				X	APP	Étudier l'impact de l'APP sur le niveau de service et le niveau de stock dans un système de production à la commande	F	X	X									I	Linear programming & discrete event simulation	AnyLogic and XpressMP

26	García et al.	2009	X				X	APP	La mise en œuvre d'un système d'aide à la décision pour un problème d'APP qui calcule des calendriers de travail pour six sections différentes d'une usine	F	X	X				X					D	Mixed integer Linear programming.	Decision support systems (APS tool.)
27	Moghaddam et Safaei	2006	X				X	APP	Développer un algorithme basé sur les algorithmes génétique pour résoudre un problème APP limitée par une ressource unique	F	X	X				X					D	Mixed integer non Linear programming	Lingo 8.0
28	Zhao et al.	2011		X			X	Production planning	Déterminer un plan de production qui maximise la probabilité moyenne que le coût total soit moins d'un seuil donné.	P	X										I	Fuzzy random programming	Hybrid monkey algorithm
29	Bushuev	2014		X			X	APP	Présenter une approche d'optimisation convexe pour réssoudre le problème d'APP		X	X				X					D	Convex programming	Convex optimisation algorithm
30	Wei et al.	2011		X			X	Inventory and production planning	Proposer un modèle d'optimisation robuste pour gérerles situatiosn lorsque les retours des produits sonts incertains	P	X	X								X	I	Robust Linear programming	Solver Lingo
31	Leung et al.	2003	X				X	APP	Déterminer les plans de production des sites de fabrication de lingerie soumises à certaines restrictions, telles que les quotas d'importation / exportation de production imposés par les exigences réglementaires	P	X	X				X				X	D	Linear goal programming	Simplex method
32	Naeem et al.	2013		X			X	Lot sizing	Déterminer le plan de production et de recyclage en minimisant le coût total	P	X					X					D & I	Dynamic programming	MPL & MATLAB

33	Baykasoglu	2001		X			X	APP	Proposer un nouveau mécanisme de solution pour résoudre un problème APP à objectifs multiples	P	X	X								X	D	Goal-programming	C++ (MOAPPS 1.0)
34	Fung et al.	2003		X			X	APP	Proposer une approche floue pour formuler le problème APP sous contraintes financières	F	X	X				X					I	Fuzzy non Linear programming	Matlab 5.0
35	Fahmnia et al.	2008	X				X	APP	Développer un modèle complexe et réaliste pour l'APP et construire un algorithme génétique pour son optimisation	P	X	X				X					D	Mathematical programming	Genetic algorithm
36	Mocquillon et al.	2011		X			X	planification a une seule machine	Présentation d'un problème de planification à une seule machine dans une entreprise de production de shampooing. L'objectif est de répondre aux demandes des filiales en respectant leur stock de sécurité et leurs niveaux de stocks maximum.	P	X	X		X		X					D	Mixed integer Linear programming & greedy heuristic	Cplex Solver & C++
37	Stephen et al.	2004		X			X	APP	Déterminer une stratégie de production optimale en minimisant les différents coûts	P	X	X									I	Stochastic non-Linear programming	LINDO
38	Chen et Liao,	2003	X				X	APP	Traiter des méthodes de sélection de plans de production efficaces pour résoudre les problèmes d'APP impliquant des fluctuations de la demande de produits.	P	X	X				X				X	D	Linear programming	Multiple objective decision making MODM (TOPSIS, PROMETHEE II, ,,,)
39	Genin et al.	2005	X				X	S&OP	Etudier la robustesse de la planification des ventes et des opérations par la simulation en tenant compte des variables contrôlables et non contrôlables	F	X	X				X					D	Linear programming	EXCEL solver

40	Thomas et Lamouri	2000	X				X	S&OP	Comparer plusieurs techniques de planification, et choisir celle qui donne une solution optimale robuste	F	X	X				X					D	Linear programming	EXCEL solver
41	Bruno et al.	2015		X			X	S&OP	Etudier l'incertitude de la variabilité de la production dans la planification des ventes et des opérations	P	X	X				X				X	I	Stochastic programming	Gurobi optimization
42	Feng et al.	2010	X				X	S&OP	Présentation de trois modèles de simulation d'horizon glissant pour évaluer les performances de S&OP partiellement et entièrement integré par rapport à la planification découplée traditionnelle	F	X	X				X					D	Mixed integer programming.	Cplex 10.0 Optimiser
43	Feng et Sophie D'Amours	2008		X			X	S&OP	Evaluer les avantages et l'impact du processus S&OP avant sa mise en œuvre	F	X	X			X	X					D	Mixed integer programming.	Optimization Programming Language OPL5.0 and solved by CPLEX 10.0 optimizer
44	Wang et Fang	2001		X			X	APP	Déterminer un plan de production qui maximise le profit et minimise les changements du niveau de la main d'œuvre	P	X	X								X	I	Fuzzy linear programming	An interactive solution procedure
45	Kim et Kim	2001		X			X	Production planning	Proposer un modèle de planification à plusieurs ressources et une approche itérative dans le but de réajuster indépendamment la capacité de chaque ressource	P	X	X									D	Linear programming & simulation model	C++
46	Caridi et Cigolini	2000	X				X	MRP	Combler le vide entre la théorie et la pratique dans le domaine des stocks de sécurité dans les environnements MRP	P							X				I		Méthodes statistiques
47	Ryu et al.	2004		X			X	SCP	Déterminer des plans des deux niveaux de production et de	P		X				X					I	Multi-parametric linear programming	Techniques de programmation paramétrique

									distribution dont l'objectif est de minimiser les coûts															
48	Spitter et al.	2005			X		X	SCP	Etudier l'impact de la variation de la demande, du délai de livraison, du taux d'utilisation des ressources, et de la valeur ajoutée lors des fusions des articles sur le coût de stockage	P	X	X		X							I	Linear programming	LP Solver
49	Koutsoukis et al.	2000	X				X	SCP	Décrire un système d'aide à la décision integré pour la planification stratégique de la supply chain	P	X	X	X								I	Linear programming	FortMP the optimisation solver
50	Xie et al.	2003		X			X	MPS	Etudier l'impact des paramétres gelés d'un MPS sur le coût total, l'instabilité de l'ordonnancement et le niveau de service	P	X	X									I	Simulation	ANOVA analysis
51	Gholamian et al.	2016		X			X	APP	Déterminer des plans de production qui minimisent le coût total de la supply chain, le taux de changement de la main d'œuvre et la pénurie maximale totale de produits.	P	X	X				X				X	I	Mixed integer non Linear programming	Solver CPLEX
52	Demirel et al.	2018		X			X	APP	Déterminer des plans de production qui minimisent les coûts totaux relatifs à la production, au stockage et aux commandes différées, tout en intégrant des contraintes supplémentaires		X	X									I	Mixed integer Linear programming	CPLEX 12.0

Annexe 2 : MILP du modèle de planification tactique

- **Notations**

– Ensembles

Ensembles :

T Ensemble des périodes de l'horizon de planification;

P Ensemble des produits finis à planifier;

S Ensemble des nœuds tels que:

$S = S_i \cup S_1 \cup S_2 \cup S_3 \cup S_4 \cup S_5 \cup S_f \qquad S_i \cap S_j = \varnothing, \forall i, j \in S$

A Ensemble des arcs tels que:

$A = A_1 \cup A_2 \cup A_3 \cup A_4 \cup A_5 \cup A_6 \cup A_7 \cup A_8 \qquad A_i \cap A_j = \varnothing, \forall (i, j) \in A$

Indice :

i / j Indice de nœud $i, j \in S$;

(i, j) Indice de l'arc $(i, j) \in A$;

t Indice de la période $t \in T$;

q Indice du quai de chargement (point de distribution) $q \in S_5$;

p Indice de la famille de produits $p \in P$;

– Paramètres

$CL_{p,j}$ Paramètre valant 1 si la ligne de production $j \in S_1$ a la capabilité technique de produire le produit fini $p \in P$ et 0 sinon ;

$C_{i,j}^{\max}$ Capacité maximale hebdomadaire (tonnes) pouvant transiter par l'arc $(i, j) \in A$;

$D_{p,q,t}$ Demande du quai de chargement $q \in S_5$ en produits finis $p \in P$ à la période $t \in T$;

$I_i^{\max}$ Capacité maximale de stockage offerte par le hangar de stockage $i \in S_3$;

$I_{i,p}^{init}$ Stock initial dans le hangar de stockage $i \in S_3$ du produit fini $p \in P$;

β_p Coefficient de conversion associé au produit fini $p \in P$;

$Succ_{i,j}$ Paramètre valant 1 si le nœud j est un successeur du nœud i et 0 sinon;

α_p Nombre de hangars de stockage possible pour stocker le produit fini $p \in P$;

M Entier arbitrairement grand ;

– Variables

$\varphi_{i,j,p,t}$ Flot pouvant circuler dans l'arc $(i, j) \in A$ du produit fini $p \in P$ à la période $t \in T$;

$I_{i,p,t}$ Quantité stockée dans le hangar $i \in S_3$ du produit fini $p \in P$ à la période $t \in T$;

$\omega_{p,q,t}$ Taux de satisfaction de la demande du quai de chargement $q \in S_5$ du produit fini $p \in P$ à la période $t \in T$;

Variables binaires :

$X_{j,p,t}$ Variable binaire valant 1 si le produit fini $p \in P$ est produit sur la ligne de production $j \in S_1$ à la période, $t \in T$, 0 sinon ;

$Z_{j,p,t}$ Variable binaire valant 1 si le produit $p \in P$ est stocké dans le hangar de stockage $j \in S_3$ à la période, $t \in T$, 0 sinon ;

$Y_{j_1,j_2,p,t}$ Variable binaire valant 1 si le produit $p \in P$ est produit sur la ligne de production $j_1 \in S_1$ à la période $t \in T$ et produit sur la ligne de production $j_2 \in S_1$ pour toute période $t' > t$, 0 sinon ;

$W_{j_1,j_2,p,t}$ Variable binaire valant 1 si le produit $p \in P$ est stocké dans le hangar $j_1 \in S_3$ à la période $t \in T$ et stocké dans le hangar $j_2 \in S_3$ pour toute période $t' > t$, 0 sinon ;

$G_{j,p,t}$ Variable binaire valant 1 si le produit $p \in P$ est dispersé dans le hangar de stockage $j \in S_3$ à la période $t \in T$, 0 sinon. La somme permet de compter le nombre de produits stockés dans un hangar j à la période t ;

U_j Variable binaire valant 1 si la ligne de production $j \in S_1$ est utilisée au moins sur une période $t \in T$, 0 sinon ;

V_j Variable binaire valant 1 si le hangar de stockage $j \in S_3$ est utilisé au moins sur une période $t \in T$, 0 sinon ;

– Coûts pris en compte

$CP_{p,j}$ Coût variable unitaire (\$/tonnes) de production d'un produit $p \in P$ sur une ligne de production $j \in S_1$;

$CS_{p,j}$ Coût variable unitaire (\$/tonnes) de possession de stock d'un produit $p \in P$ au niveau d'un hangar de stockage $j \in S_3$;

COL_j Coût d'ouverture d'une ligne de production $j \in S_1$ sur tout l'horizon de planification ;

COH_j Coût d'ouverture d'un hangar de stockage $j \in S_3$ sur tout l'horizon de planification ;

C_{ChL} Coût fixe de changement d'une ligne de production sur une période de l'horizon de planification pour une famille de produits donnée ;

C_{ChH} Coût fixe de changement d'un hangar de stockage sur une période de l'horizon de planification pour une famille de produits donnée ;

PV_p Prix de vente d'un produit fini $p \in P$;

– Coefficients de pondération associés à la fonction objectif du MILP tactique

θ_1 Coefficient de pondération associé au chiffre d'affaire ;

θ_2 Coefficient de pondération associé au coût d'ouverture d'un hangar de stockage ;

θ_3 Coefficient de pondération associé au coût d'ouverture d'une ligne de production ;

θ_4 Coefficient de pondération associé coût de production ;

θ_5 Coefficient de pondération associé coût de stockage ;

θ_6 Coefficient de pondération associé au coût de changement d'une ligne de production ;

θ_7 Coefficient de pondération associé au coût de changement d'un hangar de stockage ;

- **Formalisation mathématique**

Les différents éléments précédemment introduits permettent de modéliser le problème de planification tactique considéré dans son ensemble. Cependant, à ceux-ci doivent être ajoutées des contraintes portant sur la satisfaction de la demande, de capacité et d'utilisation des ressources, de l'équilibre des stocks et des contraintes relatives à la production et au stockage ; ces derniers étant introduites au sein de la formalisation générale du problème donnée ci-dessous. L'objectif étant de maximiser le profit qui est en fonction du chiffre d'affaire issu des ventes des produits finis CA, les coûts stratégiques CS, et les coûts opérationnels CO.

$$MAX : CA - CS - CO \tag{1}$$

$$CA = \theta_1 \times \sum_{p \in P, q \in S_5, t \in T} \omega_{p,q,t} \times D_{p,q,t} \tag{2}$$

$$CS = \theta_2 \times Coût_{Ouverture\_Hangar} + \theta_3 \times Coût_{Ouverture\_Ligne} \tag{3}$$

$$CO = \theta_4 \times Coût_{production} + \theta_5 \times Coût_{stockage} + \theta_6 \times Coût_{Changement\_Ligne} + \theta_7 \times Coût_{Changement\_Hangar} \tag{4}$$

$$Coût_{Ouverture\_Hangar} = \sum_{j \in S_3} COH_j \times V_j \tag{5}$$

$$Coût_{Ouverture\_Ligne} = \sum_{j \in S_1} COL_j \times U_j \tag{6}$$

$$Coût_{production} = \sum_{j \in S_1, p \in P, t \in T, (i,j) \in A_1 | Succ_{i,j} = 1} CP_{p,j} \times \varphi_{i,j,p,t} \tag{7}$$

$$Coût_{stockage} = \sum_{j \in S_3, p \in P, t \in T} CS_{p,j} \times I_{j,p,t} \tag{8}$$

$$Coût_{Changement\_Ligne} = \sum_{j_1 \in S_1, j_2 \in S_1, p \in P, t \in T | j_1 \neq j_2} C_{ChL} \times Y_{j_1, j_2, p, t} \tag{9}$$

$$Coût_{Changement\_Hangar} = \sum_{j_1 \in S_3, j_2 \in S_3, p \in P, t \in T | j_1 \neq j_2, t \leq T-1} C_{ChH} \times A_{j_1, j_2, p, t} \tag{10}$$

s.t.

$$\sum_{i \in S | Succ_{i,j}=1} \varphi_{i,j,p,t} = \omega_{p,q,t} \times D_{p,q,t} \qquad \forall j \in S_5, p \in P, q \in S_5, t \in T \qquad (11)$$

$$\omega_{p,q,t} \geq 1 - D_{p,q,t} \qquad \forall p \in P, q \in S_5, t \in T \qquad (12)$$

$$\sum_{(i,j) \in A_1, t \in T | Succ_{i,j}=1} \varphi_{i,j,p,t} \leq \sum_{q \in S_5, t \in T} D_{p,q,t} \qquad \forall p \in P \qquad (13)$$

$$\sum_{i \in S | Succ_{i,j}=1} \varphi_{i,j,p,t} = \sum_{k \in S | Succ_{j,k}=1} \varphi_{j,k,p,t} \qquad \forall j \in S \setminus S_3, \forall p \in P, \forall t \in T, j \geq 1, j \leq |S| \qquad (14)$$

$$I_{j,p,t-1} + \sum_{i \in S | Succ_{i,j}=1} \varphi_{i,j,p,t} = \sum_{k \in S | Succ_{j,k}=1} \varphi_{j,k,p,t} + I_{j,p,t} \qquad \forall j \in S_3, \forall p \in P, \forall t \in T, j \geq 1, j \leq |S| \qquad (15)$$

$$\sum_{i \in S, t \in T | Succ_{i,j}=1} \varphi_{i,j,p,t} = \sum_{k \in S, t \in T | Succ_{j,k}=1} \varphi_{j,k,p,t} \qquad \forall j \in S_3, \forall p \in P, j \geq 1, j \leq |S| \qquad (16)$$

$$\sum_{p \in P} \varphi_{i,j,p,t} \leq C_{i,j}^{\max} \qquad \forall i, j \in S, \forall t \in T, Succ_{i,j} = 1 \qquad (17)$$

$$\sum_{p \in P} I_{i,p,t} \leq I_i^{\max} \qquad \forall i \in S_3, \forall t \in T, i \geq 1, i \leq |S| \qquad (18)$$

$$\sum_{p \in P} \varphi_{i,j,p,t} \times \beta_p \leq C_{i,j}^{\max} \qquad \forall j \in S_1, t \in T, (i,j) \in A_1, Succ_{i,j} = 1 \qquad (19)$$

$$I_{i,p,T_0} = I_{i,p}^{\text{int}} \qquad \forall i \in S_3, \forall p \in P \qquad (20)$$

$$\sum_{i \in S | Succ_{i,j}=1} \varphi_{i,j,p,t} \leq I_i^{\max} \times G_{j,p,t} \qquad \forall j \in S_3, p \in P, \forall t \in T, j \geq 1, j \leq |S| \qquad (21)$$

$$\sum_{j \in S_3 | j \geq 1, j \leq |S|} G_{j,p,t} \leq \alpha_p \qquad \forall p \in P, \forall t \in T \qquad (22)$$

$$X_{j,p,t} \leq \varphi_{i,j,p,t} \qquad \forall j \in S_1, (i,j) \in A_1, p \in P, t \in T, Succ_{i,j} = 1 \qquad (23)$$

$$M \times X_{j,p,t} \geq \varphi_{i,j,p,t} \qquad \forall j \in S_1, (i,j) \in A_1, p \in P, t \in T, Succ_{i,j} = 1 \qquad (24)$$

$$\varphi_{i,j,p,t} \leq X_{j,p,t} \times C_{i,j}^{\max} \qquad \forall j \in S_1, (i,j) \in A_1, p \in P, t \in T, Succ_{i,j} = 1 \qquad (25)$$

$$M \times Z_{j,p,t} \geq \sum_{i \in S | Succ_{i,j}=1} \varphi_{i,j,p,t} \qquad \forall j \in S_3, p \in P, t \in T, j \geq 1, j \leq |S| \qquad (26)$$

$$Z_{j,p,t} \leq \sum_{i \in S | Succ_{i,j}=1} \varphi_{i,j,p,t} \qquad \forall j \in S_3, p \in P, t \in T, j \geq 1, j \leq |S| \qquad (27)$$

$$\sum_{s \in T | s \geq t+1} X_{j_2,p,s} - M \times (1 - X_{j_1,p,t}) \leq Y_{j_1,j_2,p,t} \times M \qquad \forall j_1, j_2 \in S_1, p \in P, t \in T, j_1 \neq j_2, t \leq T-1 \qquad (28)$$

$$Y_{j_1,j_2,p,t} \le X_{j_1,p,t} \qquad \forall j_1, j_2 \in S_1, p \in P, t \in T, j_1 \ne j_2, t \le T-1 \quad (29)$$

$$Y_{j_1,j_2,p,t} \le \sum_{s \in T | s \ge t+1} X_{j_2,p,s} \qquad \forall j_1, j_2 \in S_1, p \in P, t \in T, j_1 \ne j_2, t \le T-1 \quad (30)$$

$$\sum_{s \in T | s \ge t+1} Z_{i_2,p,s} - M \times (1 - Z_{i_1,p,t}) \le A_{i_1,i_2,p,t} \times M \quad (31)$$

$$\forall i_1, i_2 \in S_3, p \in P, t \in T, i_1 \ne i_2, t \le T-1, i_1, i_2 \ge 1, i_1, i_2 \le |S|$$

$$A_{i_1,i_2,p,t} \le Z_{i_1,p,t} \quad (32)$$

$$\forall i_1, i_2 \in S_3, p \in P, t \in T, i_1 \ne i_2, t \le T-1, i_1, i_2 \ge 1, i_1, i_2 \le |S|$$

$$A_{i_1,i_2,p,t} \le \sum_{s \in T | s \ge t+1} Z_{i_2,p,s} \quad (33)$$

$$\forall i_1, i_2 \in S_3, p \in P, t \in T, i_1 \ne i_2, t \le T-1, i_1, i_2 \ge 1, i_1, i_2 \le |S|$$

$$U_j \le \sum_{p \in P, t \in T} Z_{j,p,t} \qquad \forall j \in S_1, i \in S, (i,j) \in A_1, Succ_{i,j} = 1 \quad (34)$$

$$\sum_{p \in P, t \in T} Z_{j,p,t} \le M \times U_j \qquad \forall j \in S_1, i \in S, (i,j) \in A_1, Succ_{i,j} = 1 \quad (35)$$

$$\sum_{i \in S, p \in P, t \in T | Succ_{i,j}=1} \varphi_{i,j,p,t} \le M \times V_j \qquad \forall j \in S_3, j \ge 1, j \le |S| \quad (36)$$

$$\sum_{i \in S, p \in P, t \in T | Succ_{i,j}=1} \varphi_{i,j,p,t} \ge V_j \qquad \forall j \in S_3, j \ge 1, j \le |S| \quad (37)$$

$$\varphi_{i,j,p,t} \ge 0 \qquad \forall i, j \in S, (i,j) \in A, p \in P, t \in T \quad (38)$$

$$I_{j,p,t} \ge 0 \qquad \forall j \in S_3, p \in P, t \in T \quad (39)$$

$$\omega_{p,q,t} \in (0..1) \qquad \forall p \in P, q \in S_5, t \in T \quad (40)$$

$$X_{j,p,t} \in \{0,1\} \qquad \forall j \in S_1, p \in P, t \in T \quad (41)$$

$$Z_{j,p,t} \in \{0,1\} \qquad \forall j \in S_3, p \in P, t \in T \quad (42)$$

$$Y_{j_1,j_2,p,t} \in \{0,1\} \qquad \forall j_1, j_2 \in S_1, p \in P, t \in T \quad (43)$$

$$A_{j_1,j_2,p,t} \in \{0,1\} \qquad \forall j_1, j_2 \in S_3, p \in P, t \in T \quad (44)$$

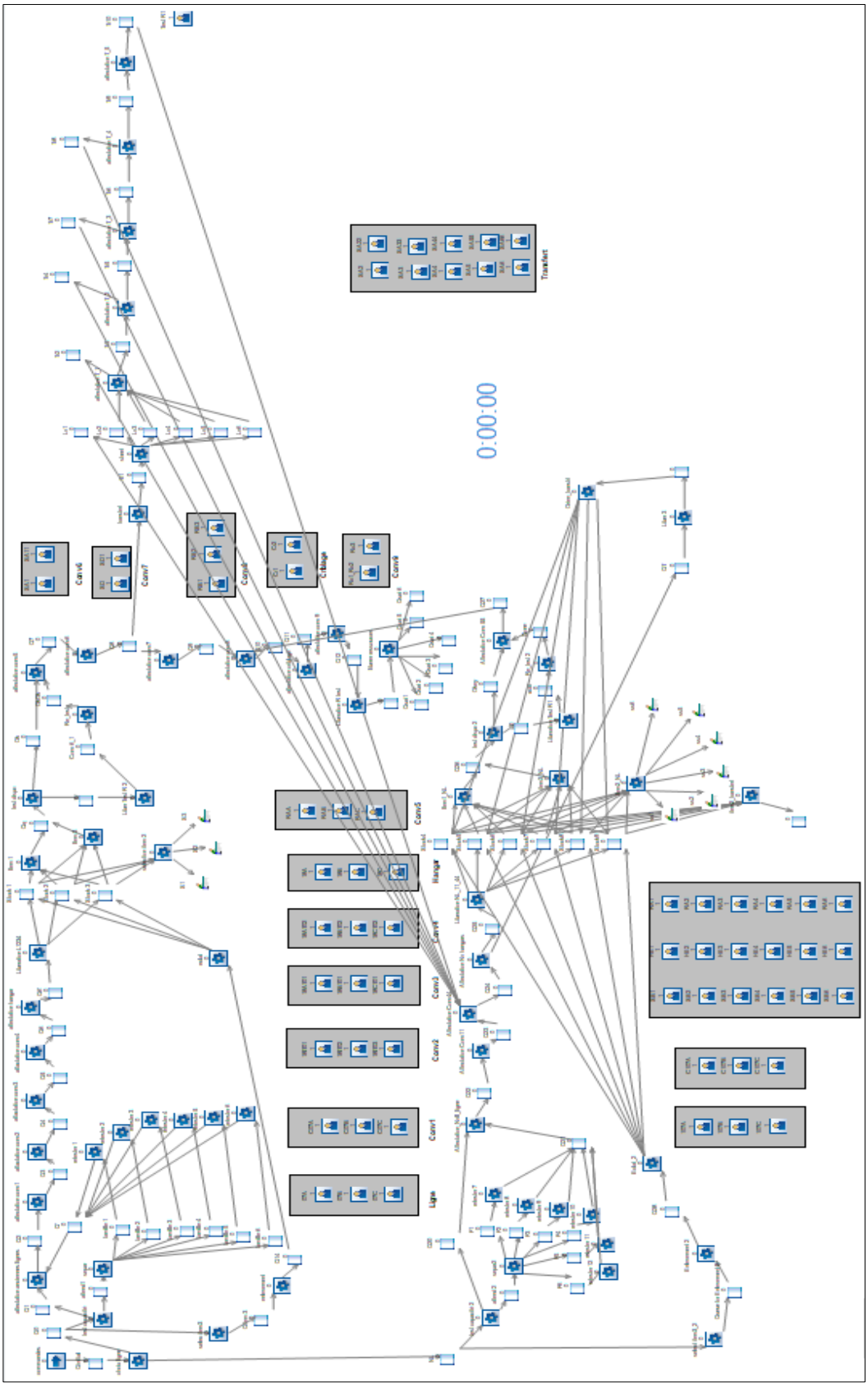
$$G_{j,p,t} \in \{0,1\} \qquad \forall j \in S_3, p \in P, t \in T \quad (45)$$

$$U_j \in \{0,1\} \qquad \forall j \in S_1 \qquad (46)$$

$$V_j \in \{0,1\} \qquad \forall j \in S_3 \qquad (47)$$

Conformément aux éléments indiqués précédemment, les équations (1-4) constituent une formalisation de la fonction objectif tandis que les suivantes (5-10) modélisent les différents calculs des coûts liés au produit fini. Ces coûts caractérisent d'une part les coûts de fonctionnement opérationnel résultant de l'exploitation du réseau d'écoulement de flux ; ils sont relatifs aux coûts totaux de production et de possession des stocks des produits finis sur l'horizon de planification et aux coûts totaux associé à la pénalité de changement d'une ligne de production ou d'un hangar de stockage du même produit au cours d'une période de l'horizon de planification, et d'autre part les coûts de capacité qui sont relatifs à l'ouverture des lignes de production et des hangars de stockage au cours de l'horizon de planification. Ainsi, les égalités (11-13) représentent les contraintes liées à la satisfaction de la demande, l'équation 13 représente le fait que la production totale pour chaque produit fini ne doit pas dépasser la demande totale de ce produit sur tout l'horizon de planification. Ainsi, les égalités (14-16) représentent respectivement la conservation de flux, l'équilibre des stocks, et la dernière étant dédiée à la conservation de stock sur tout l'horizon de planification. Les inégalités (17-18) modélisent les contraintes de capacité des ressources de production de transport et de stockage, tandis l'égalité (19) est une contrainte de restriction relative à la production qui représente le changement de taux de production associé à la production de différents produits finis sur une même ligne de production lors d'une même période de l'horizon de planification. Les trois équations suivantes (20-22), quant à elles, modélisent les contraintes d'affectation et de dispersion des produits finis dans les hangars de stockage. De plus les inégalités (23-25) modélisent les contraintes logiques d'utilisation des lignes de production, tandis que les équations (26-27) représentent celles d'utilisation des hangars de stockage. Les équations (28-30) correspondent à des contraintes de pénalité de changement des lignes de production par les produits finis et ceci pour chaque période de l'horizon de planification, tandis que celle correspondant à des non changements des hangars de stockage sont modélisées par les équations (31-33). De plus les contraintes d'ouverture des lignes de production et des hangars de stockage respectivement sont représentées par les équations (34-37). Et finalement Les contraintes (38-47) définissent le domaine de définition des variables de décision.

Annexe 3 : Capture du modèle de simulation


0:00:00
Transfert
Conv6
Conv7
Conv8
Chlage
Conv9
Conv5
Hangar
Conv4
Conv3
Conv2
Conv1
Ligne

Annexe 4 : Extrait du programme de vérification de disponibilité des ressources et capacité de stockage : cas de l'hangar H_1 et ligne L_1

Variables

Affect_isOk : variable booléenne valant vrai si toutes les ressources sont disponibles, false sinon ;

Début

Réinitialiser $L_{Capacité\_courante}$ à 0 ;

SI L_*Ancien_Hangar* =1 \\ *correspond à l'affectation du label L_Ancien_hangar à H_1*\\

SI L_Type_Item=1

SI H_1_$L_{Capacité_courante}$ + Ligne.Débit <= S_$L_{Capacité_maximale}$

SI L_Ancienne_Ligne =1 \\ *correspond à l'affectation du label L_Ancienne_Ligne à L_1*\\

SI L_1.Current Available =1 \\ *tester la disponibilité de la ressource ligne L_1*\\

SI L_convoyeur_ligne_AL=1 \\ *correspond à l'affectation du label* L_convoyeur_ligne_AL *à C_1*\\

SI C_1.Current Available =1 \\ *tester la disponibilité de la ressource convoyeur ligne C_1 associé à L_1*\\

SI L_convoyeur_routage_AL=1 \\ *correspond à l'affectation du label* L_convoyeur_routage_AL *à C_4*\\

SI C_4.Current Available =1 \\ *tester la disponibilité de la ressource convoyeur de routage C_4* \\

SI L_convoyeur_stockage1_AL=1 \\ *correspond à l'affectation du label* L_convoyeur_stockage1_AL *à C_7*\\

SI C_7.Current Available =1 \\ *tester la disponibilité de la ressource convoyeur de stockage1 à C_7* \\

SI L_convoyeur_stockage2_AL=1 \\ *correspond à l'affectation du label* L_convoyeur_stockage2_AL *à C_{10}*\\

SI C_{10}.Current Available =1 \\ *tester la disponibilité de la ressource convoyeur de stockage2 à C_{10}* \\ **ALORS**

Affect_isOk := true ;

SINON

Affect_isOk := false ;

SINON

Affect_isOk := false ;

SINON

Affect_isOk := false ;

SI L_convoyeur_routage_AL=2 \\ *correspond à l'affectation du label* L_convoyeur_routage_AL *à C_5*\\

SI C_5.Current Available =1 \\ *tester la disponibilité de la ressource convoyeur de routage C_5* \\

SI L_convoyeur_stockage1_AL=1 \\ *correspond à l'affectation du label* L_convoyeur_stockage1_AL *à C_7*\\

SI C_7.Current Available =1 \\ *tester la disponibilité de la ressource convoyeur de stockage1 à C_7* \\

SI L_convoyeur_stockage2_AL=1 \\ *correspond à l'affectation du label* L_convoyeur_stockage2_AL *à* C_{10}\\
SI C_{10}.Current Available =1 \\ *tester la disponibilité de la ressource convoyeur de stockage2 à* C_{10} \\ **ALORS**
Affect_isOk := true ;
SINON
Affect_isOk := false ;
SINON
Affect_isOk := false ;
SINON
Affect_isOk := false ;

SI L_convoyeur_routage_AL=3 \\ *correspond à l'affectation du label* L_convoyeur_routage_AL *à* C_6\\
SI C_6.Current Available =1 \\ *tester la disponibilité de la ressource convoyeur de routage* C_6 \\
SI L_convoyeur_stockage1_AL=1 \\ *correspond à l'affectation du label* L_convoyeur_stockage1_AL *à* C_7\\
SI C_7.Current Available =1 \\ *tester la disponibilité de la ressource convoyeur de stockage1 à* C_7 \\
SI L_convoyeur_stockage2_AL=1 \\ *correspond à l'affectation du label* L_convoyeur_stockage2_AL *à* C_{10}\\
SI C_{10}.Current Available =1 \\ *tester la disponibilité de la ressource convoyeur de stockage2 à* C_{10} \\ **ALORS**
Affect_isOk := true ;
SINON
Affect_isOk := false ;
SINON
Affect_isOk := false ;
SINON
Affect_isOk := false ;
SINON
Affect_isOk := false ;
SINON
Affect_isOk := false ;