



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

Planification et Ordonnancement de Plateformes Logistiques

THÈSE

présentée et soutenue publiquement le 05 novembre 2010

pour l'obtention du

Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine
(spécialité informatique)

par

Susana Carrera

Composition du jury

<i>Rapporteurs :</i>	Marie-Ange Manier	Maître de Conférences HDR, Université de Technologie de Belfort-Monbeliard
	Aziz Moukrim	Professeur, Université de Technologie de Compiègne
<i>Examineurs :</i>	El Houssaine Aghezzaf	Professeur, Université de Gand, Belgique
	Lionel Amodeo	Professeur, Université de Technologie de Troyes
	Zineb Habbas	Maître de Conférences HDR, Université Paul Verlaine, Metz
<i>Directrice de thèse :</i>	Marie-Claude Portmann	Professeur, Institut National Polytechnique de Lorraine
<i>Co-directrice :</i>	Wahiba Ramdane Cherif	Maître de conférences, Institut National Polytechnique de Lorraine

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier sincèrement Marie-Claude Portmann, Professeur émérite à l'Ecole des Mines de Nancy, qui m'a initiée à la recherche (et à la compréhension des expressions lorraines!), pour ses conseils qui m'ont guidée pendant ces trois années de thèse, pour sa disponibilité et sa patience, et finalement pour sa persistance à trouver des thèmes de recherche intéressants. Cela a été un plaisir de travailler sous la direction d'une personne aussi pétillante et passionnée par son travail. Je voudrais également remercier Wahiba Ramdane Cherif, Maître de conférences à l'Ecole des Mines de Nancy, pour m'avoir co-encadré et apporté son soutien tout au long de cette thèse, mais aussi pour être toujours aussi sympathique et souriante.

Je tiens aussi à exprimer ma reconnaissance à Marie-Ange Manier, Maître de Conférences à l'Université de technologie de Belfort-Monbeliard, et à Aziz Moukrim, Professeur à l'Université de technologie de Compiègne qui m'ont fait l'honneur d'être rapporteurs de cette thèse. Je les remercie aussi pour leurs remarques et commentaires qui m'ont permis d'améliorer ce mémoire.

Je voudrais remercier Zineb Habbas, Maître de Conférences à l'Université Paul Verlaine, Lionel Amodeo, Professeur à l'Université de technologie de Troyes, et El-Houssaine Aghezzaf, Professeur à l'Université de Gand, pour avoir accepté de faire partie de mon jury de thèse.

Mes remerciements vont également à Ammar et Françoise et à toutes les personnes de l'équipe ORCHIDS. De même à tous ceux avec qui j'ai partagé le "bureau des thésards" : Adrien, Zerouk, Smail et enfin José pour ses remarques et sa très agréable compagnie pendant mes dernières semaines.

Je garde en mémoire les pauses café et *jungle speed*® avec les collègues du LORIA, merci à Stéphane (aussi fournisseur DVD, très apprécié!), Pierre, et les doctorants, post-doctorants et autres membres de l'équipe Orpailleur. Je profite pour faire passer un grand merci à Jean Lieber pour m'avoir, de manière complètement désintéressée (bazinga!), mise en contact avec Marie-Claude dans un premier temps.

J'ai rencontré de nombreuses personnes sans qui ces années passées à Nancy n'auraient pas été aussi agréables. Je pense en particulier à toutes les personnes du club de plongée avec qui j'ai partagé des moments de fatigue et de détente les mercredis soir à la piscine et certains week-ends dans les eaux froides (très froides) des lacs des Vosges. Merci aussi à toute la famille Cojan pour leur bonne humeur, leur gentillesse et leurs encouragements.

Quiero agradecer a dos personas sin las cuales no habrían sido posibles estos últimos seis años. Chame, gracias a su entusiasmo, me abrió la puerta al mundo y, con ello, al mayor cambio en mi forma de ver las cosas. Te agradezco por ser fuente de motivación, además de ser un gran ejemplo y amigo. A mi mejor amigo, Edu, quien siempre está ahí, quien sabe darme ánimo en todas las circunstancias, y sobre todo por la franqueza que lo caracteriza y que me ha hecho más fuerte. Me siento muy afortunada de haber podido comenzar esta aventura contigo, y te agradezco por tu apoyo incondicional.

Agradezco a mis hermanos : Pablo, Marce y David por haber compartido nuestra infancia y parte de nuestras vidas de adultos, por su cariño y su apoyo, por su inteligencia y su actitud frente a la vida que me hace sentir orgullosa de ser su hermana. A mis padres porque soy el

fruto de todos sus esfuerzos y enseñanzas, por el amor y la confianza que siempre me han dado, los amo y los respeto profundamente. A mi familia, mis éxitos son sus éxitos, les agradezco por haberme llevado tan lejos.

Finalmente, a la mejor persona que conozco y con quien tengo la suerte de compartir mi vida, Julien. Gracias por tu paciencia, tu estímulo continuo, por ponerte al frente de la cocina durante los últimos meses de redacción, pero sobre todas las cosas, por creer en mí.

Introduction générale

La globalisation de l'économie et l'implantation des centres de production dans des zones géographiques à coûts de revient inférieurs ont conduit à la constitution de réseaux d'entreprises de plus en plus complexes et à des flux importants de produits à l'échelle mondiale. Ces produits sont déplacés par différents moyens de transport via des entrepôts (pour des durées relativement importantes) et des plateformes (pour des durées généralement plus courtes avec re-conditionnement et re-distribution vers les clients industriels ou particuliers).

L'irrégularité dans les productions et dans les demandes induit des surcharges à certaines périodes, difficiles à supporter car il n'est pas possible de dimensionner les plateformes à la charge maximale de manière permanente. Malgré, ou à cause de, l'utilisation massive de personnel intérimaire et/ou d'heures supplémentaires pendant les périodes de pointe, les goulets d'étranglement induisent des pertes financières importantes pour les organismes concernés. Il est donc nécessaire de proposer des solutions efficaces afin d'améliorer la situation actuelle, sachant que l'on peut agir en interne, en optimisant le fonctionnement interne de la plateforme (avec toute la complexité que les contraintes propres aux plateformes logistiques induisent), ou en externe en considérant globalement les flux, par exemple, au moyen de négociations avec les partenaires pour avancer ou retarder les livraisons. Et ce, aux niveaux tactique et opérationnel.

C'est dans le contexte de l'optimisation et l'aide à la décision pour la gestion de la chaîne logistique en général, et de l'optimisation des entrepôts et des plateformes logistiques en particulier, que le présent mémoire s'inscrit. Il est le résultat des travaux de recherche menés lors de ma thèse co-encadrée par Marie-Claude Portmann et Wahiba Ramdane-Cherif, au sein de l'équipe ORCHIDS (Operations Research for Complex HybriD Decision Systems) du laboratoire d'informatique LORIA à Nancy.

La question posée dans cette thèse est celle de l'optimisation de la planification et de l'ordonnement des plateformes logistiques. Nous étudions deux problèmes propres à ces structures, un au niveau tactique et l'autre au niveau opérationnel, avec des hypothèses constatées dans des applications réelles et qui ont été négligées, d'après le résultat de nos recherches bibliographiques, dans la littérature concernant les entrepôts.

Au niveau de la planification notre problème est celui du lissage de charge avec des négociations pendant les périodes de pointe pour minimiser les pertes financières dues à la saisonnalité de la demande. La thèse de Latifa Ouzizi [113], co-encadrée par François Vernadat et Marie-Claude Portmann, proposait déjà des modèles de négociation semi-distribués pour le niveau tactique (planification prévisionnelle dans un réseau d'entreprise), mais ces modèles simplifiés tenaient essentiellement compte des contraintes de production des différents sites, les transports étaient modélisés par des décalages temporels et les plateformes logistiques ignorées ou modélisées comme des centres de production alors que les contraintes sont différentes. Nous poursuivons ces travaux, pour traiter un problème qui, à notre connaissance, n'a pas été traité auparavant.

Ce problème combine le lissage de charge avec des négociations et la gestion de l'organisation du travail en y intégrant toutes les spécificités liées aux plateformes logistiques. Nos travaux font la jonction entre les choix stratégiques et les choix opérationnels, en proposant des outils d'aide à la décision permettant d'optimiser les résultats des négociations entre les partenaires intervenant au niveau de la négociation des flux.

Au niveau opérationnel, nous étudions plusieurs problèmes d'ordonnancement liés aux activités de préparation de commandes dans les plateformes logistiques. Ce type de structures ont des contraintes particulières, liées à la forme des arrivées des composants et à la façon dont l'expédition des commandes se fait. Ces deux types de contraintes particulières sont présentées dans la littérature pour des problèmes d'ordonnancement d'ateliers mais n'ont pas été traitées ensemble auparavant. En raison du caractère NP-difficile de nos problèmes et du manque d'études les concernant dans la littérature (pour la plupart des problèmes considérés), nous avons décidé de développer des approches de résolution exactes pour des problèmes simplifiés d'ordonnancement pour plateforme ; notamment une plateforme avec une seule machine de préparation de commande, et ce, avec l'objectif de construire une base pour l'étude de plateformes plus complexes. Nous examinons plusieurs extensions à nos problèmes dans les perspectives à la fin de ce mémoire.

Dans le premier chapitre de cette thèse, nous définissons précisément le contexte général dans lequel se positionne notre étude. Nous introduisons la problématique de gestion de la chaîne logistique où plusieurs entités juridiques interagissent, et celle du contrôle des flux et de la gestion de production d'une seule entité avec un centre de décision centralisé. Nous dressons un panorama général des problèmes de planification, d'ordonnancement et de leur coordination, pour un partenaire quelconque de la chaîne logistique en général, et pour les entrepôts en particulier. Nous mettons en évidence que la coordination entre partenaires (mais aussi entre les types de décisions à prendre), souvent avec des objectifs antagonistes, n'est pas facile à mettre en œuvre. Nous présentons les principaux modèles et logiciels d'aide à la décision relatifs à ce domaine. Enfin, nous terminons le chapitre par positionner nos travaux de recherche dans le contexte introduit. Nous concluons cette partie en dégagant les motivations et les objectifs de la thèse.

Dans le deuxième chapitre, nous abordons le problème de lissage de charge dans les plateformes logistiques pendant les périodes de pointe pour minimiser les coûts (incluant ceux de personnel). Nous commençons le chapitre en introduisant le problème de lissage de charge auquel les plateformes logistiques font face pendant les pics de charge. Ensuite, nous présentons le cas de l'entreprise de distribution de chaussures, avec toutes ses particularités, qui a motivé notre travail. Nous analysons la littérature concernant le lissage de charge, les mécanismes de négociation et la gestion des ressources humaines dans les centres de production et les entrepôts. Dans le but de concevoir des outils d'aide à la décision génériques, nous présentons les éléments génériques susceptibles d'être appliqués à de nombreux problèmes de ce type, que ce soit pour les plateformes logistiques ou pour des ateliers de production. Deux modèles linéaires (en raison du caractère moyen terme du problème de lissage de charge) génériques, incluant deux types de négociations concernant les dates et les quantités des livraisons des partenaires en amont et en aval de la plateforme, sont exposés ensuite. Nos modèles peuvent être appliqués à des structures ayant des organisations physiques et de travail différentes. Nous expliquons également comment nous avons généré des jeux de données regroupés dans trois familles d'instances qui dépendent de l'agencement physique de la plateforme. A partir des résultats (obtenus avec ILOG CPLEX) de nos modèles linéaires sur ces jeux de données, nous sommes en mesure d'évaluer l'intérêt de notre approche sur le lissage de charge et la pertinence des types de négociation envisagés.

Les problèmes d’ordonnancement pour plateforme sont étudiés dans le chapitre trois. Nous étudions un type de plateforme bien spécifique qui exécute des activités de préparation de commande. Nous commençons le chapitre en présentant les hypothèses particulières de ce type de plateformes liées aux arrivées de composants, aux demandes des magasins et aux contraintes d’expédition, ainsi que les applications industrielles qui ont motivé notre recherche. Ensuite, nous analysons la littérature concernant le problème et les hypothèses que nous considérons, à savoir : le problème de préparation de commandes, c’est-à-dire un ordonnancement avec des contraintes de ressources consommables et avec des dates de livraison fixes, nous concluons que nos hypothèses n’ont pas été considérées simultanément dans la littérature. Nous distinguons trois problèmes d’ordonnancement selon les différentes hypothèses sur la manière dont l’expédition des commandes est réalisée. Nous introduisons les méthodes de résolution que nous avons considérées : un modèle linéaire en nombres entiers pour le plus simple des problèmes et des Procédures par Séparation et Evaluation (PSE) avec un schéma de séparation classique. Pour chaque problème, nous décrivons les éléments nécessaires pour la PSE, en particulier les méthodes approchées polynomiales (algorithmes de listes), les bornes inférieures et les règles de dominance éventuelles. Nous expliquons également comment nous avons généré des jeux de données pour ces problèmes qui n’ont pas encore été traités dans la littérature. Nous comparons nos méthodes exactes avec nos méthodes approchées et bornes inférieures, et, pour le problème le plus simple, nous comparons les performances de nos procédures par séparation et évaluation avec les performances obtenues en utilisant un logiciel de programmation linéaire du commerce (ILOG CPLEX).

Le mémoire se termine par un chapitre de conclusion contenant une synthèse des résultats obtenus et quelques perspectives pour la poursuite de ces travaux.

Table des matières

Introduction générale	iii
Chapitre 1 Contexte du Travail	1
1.1 Chaîne logistique	2
1.1.1 Présentation générale	2
1.1.2 Gestion de la production et contrôle de flux au sein d'une entité de la chaîne logistique	7
1.1.3 Plateformes logistiques	16
1.2 Outils d'aide à la décision	22
1.2.1 Modélisation et évaluation des chaînes logistiques	23
1.2.2 Systèmes d'information	25
1.2.3 Méthodes de résolution	27
1.3 Positionnement du travail de la thèse et ses objectifs	30
Chapitre 2 Lissage de charge à moyen terme	33
2.1 Introduction	35
2.2 Motivation industrielle	36
2.3 Etat de l'art	38
2.3.1 Gestion de personnel	39
2.4 Formalisation du problème et hypothèses spécifiques	41
2.5 Modèles Linéaires proposés	42
2.5.1 Eléments du modèle	42
2.5.2 Modèle avec les négociations des dates de livraison	46
2.5.3 Modèle avec négociations des délais et des quantités	53
2.6 Expérimentations et Résultats	55
2.6.1 Agencements de plateforme testés	55
2.6.2 Mise en œuvre et données utilisées	57
2.6.3 Expériences numériques	60
2.6.4 Résultats obtenus avec les négociations des délais	61

2.6.5	Résultats obtenus avec les négociations des délais et des quantités	69
2.7	Conclusion du chapitre	75
Chapitre 3	Ordonnancement pour plateforme de préparation de commandes	77
3.1	Introduction	79
3.2	Motivation industrielle	79
3.3	Etat de l'art	80
3.3.1	Ordonnancement sous contrainte de ressources consommables	81
3.3.2	Ordonnancement avec des dates de livraison fixes	82
3.4	Définition du problème	82
3.5	Méthodes de résolution	84
3.6	Modèle de programmation linéaire mixte	84
3.7	Procédure par Séparation et Evaluation (PSE)	87
3.7.1	Présentation générale des Procédures par Séparation et Evaluation	87
3.7.2	Méthodes approchées polynomiales	88
3.7.3	Bornes inférieures	96
3.7.4	Schéma des Procédures par Séparation et Evaluation proposées	110
3.7.5	Règles de dominance	112
3.8	Expériences	115
3.8.1	Génération de données	115
3.8.2	Etude comparative des bornes inférieures et des méthodes approchées rapides	116
3.8.3	Résultats des méthodes de résolution exactes	119
3.9	Conclusion du chapitre	123
Chapitre 4	Conclusion Générale et Perspectives	125
4.1	Synthèse des travaux	126
4.2	Perspectives	127
4.2.1	Perspectives concernant la planification des plateformes	128
4.2.2	Perspectives concernant l'ordonnancement de plateforme	129
4.2.3	Perspectives concernant l'intégration des deux niveaux temporels	130
Annexes		131
1	Génération des données pour le problème de planification	131
1.1	Génération des données pour la négociation des délais	131
1.2	Génération des données pour la négociation des délais et des quantités . .	133
2	Synthèse des résultats de complexité des problèmes d'ordonnancement	133
2.1	Complexité des problèmes d'ordonnancement avec des ressources consom- mables	134

2.2	Complexité des problèmes d'ordonnancement avec des dates de livraison fixes	136
Bibliographie		139

Table des figures

1.1	Exemple de chaîne logistique à trois étages (Khouja [88])	3
1.2	Problèmes de planification dans la chaîne logistique (Meyr <i>et al.</i> [106])	5
1.3	Zones et flux dans une plateforme	18
1.4	Positionnement des outils (Erschler et Grabot [54])	27
2.1	Plateforme du problème industriel	37
2.2	Diagramme des opérations d'assemblage et de désassemblage	44
2.3	Courbes cumulées en amont pour un produit	45
2.4	Agencements de plateforme	56
2.5	Construction des courbes cumulées en amont pour un produit p	69
3.1	Flux externes d'un nœud de la chaîne logistique	83
3.2	Types de modélisation en ordonnancement avec exemples de valeurs pour les variables	85
3.3	Optimalité de LPT pour une ressource et consommations égales	91
3.4	Optimalité de CC pour une ressource et temps de traitement égaux	92
3.5	Contre exemple d'optimalité de l'ordre $LPT - SCD$ pour minimiser le C_{max}	93
3.6	Contre exemple d'optimalité de l'ordre $WSPT$ pour minimiser la somme des pénalités des jobs en retard	95
3.7	Borne inférieure pour le temps mort total et/ou partiel	98
3.8	Impact de la relaxation des contraintes de disponibilité des composants	98
3.9	Schéma de construction de la borne supérieure (Martello et Toth [102]) du problème de sac à dos	99
3.10	Problème de sac à dos sous-jacent avec une borne supérieure de sa capacité	100
3.11	Calcul de borne inférieure avec des ordres agréables et f sac à dos pour $\sum w_j \hat{C}_j$	100
3.12	Discrétisation du temps par événements, minimisation du C_{max}	102
3.13	Discrétisation du temps par événements, hypothèse (B)	104
3.14	Discrétisation du temps par événements, cas général	105
3.15	Relaxation TKEX pour une ressource	106
3.16	Courbe d'arrivée uniforme en escalier pour un composant	107
3.17	Deux relaxations TKEX successives pour une ressource	108
3.18	Exemple de la construction de l'arbre de recherche pour nos PSE	110
1	Complexité des problèmes avec des ressources consommables pour minimiser le C_{max}	135

Chapitre 1

Contexte du Travail

Dans ce premier chapitre, nous décrivons le contexte général dans lequel se situe cette thèse, celui de la gestion et de l'optimisation de la chaîne logistique. Plus particulièrement, nous nous intéressons aux décisions, à moyen et à court terme, relatives au traitement des flux au sein d'un de ses maillons, les plateformes logistiques, et aux interactions de celles-ci avec les partenaires en amont et en aval.

La première section est consacrée à la définition des aspects importants de la gestion de la chaîne logistique ainsi qu'à la caractérisation des problèmes rencontrés dans la gestion de la production et du contrôle des flux à moyen et à court terme. Nous y mettons en évidence les problèmes décisionnels et les hypothèses particulières associés aux plateformes logistiques à moyen et court terme. Ensuite, nous nous intéressons aux outils d'aide à la décision qui ont été élaborés pour la gestion de la chaîne logistique en général, et pour les problématiques associées aux plateformes logistiques en particulier. Des méthodes et des outils issus de l'application des techniques d'optimisation y sont présentés. Enfin, nous terminons en positionnant nos travaux de recherche par rapport à l'environnement considéré.

Contents

1.1	Chaîne logistique	2
1.1.1	Présentation générale	2
1.1.2	Gestion de la production et contrôle de flux au sein d'une entité de la chaîne logistique	7
1.1.3	Plateformes logistiques	16
1.2	Outils d'aide à la décision	22
1.2.1	Modélisation et évaluation des chaînes logistiques	23
1.2.2	Systèmes d'information	25
1.2.3	Méthodes de résolution	27
1.3	Positionnement du travail de la thèse et ses objectifs	30

L'objectif principal de cette thèse est de proposer des outils d'aide à la décision qui permettent de piloter les flux sous contrainte tout en essayant de minimiser les coûts dans les plateformes logistiques. En particulier, nous cherchons à développer des outils d'aide à la décision efficaces pour la planification et l'ordonnancement des plateformes logistiques, intégrant des facteurs importants comme : les variations des flux qui peuvent être saisonnières, les contraintes locales de chaque partenaire et la coordination entre eux via des négociations, les contraintes sociales dont la formulation change selon le degré de granularité des modèles de gestion de flux considérés, etc.

Bien que la spécificité des plateformes logistiques fait que ces outils soient différents de ceux développés pour les centres de production ou pour d'autres entités de la chaîne logistique, nous analysons la littérature concernant la gestion de production et le contrôle de flux dans d'autres entités de la chaîne que les plateformes, pour constituer éventuellement une base pour notre travail, mais aussi pour préciser les différences de gestion avec les plateformes logistiques.

Dans ce chapitre, nous commençons, dans une première partie, par décrire la structure globale dans laquelle les plateformes logistiques s'intègrent, la chaîne logistique, et ce, dans le but de positionner les entrepôts et les plateformes, et de souligner leur importance dans cette structure. Nous faisons ensuite le zoom sur une entité de la chaîne (dans le cas où la prise de décisions est centralisée) et décrivons les problèmes à moyen et à court terme qu'elle peut rencontrer. Enfin, nous introduisons les plateformes logistiques en décrivant le type de problèmes les plus étudiés dans la littérature, les processus associés aussi bien en amont qu'en aval de l'entrepôt ainsi que les contraintes liés à son fonctionnement et les indicateurs d'évaluation de sa performance.

Concernant les outils d'aide à la décision à concevoir, il existe de nombreuses méthodes de résolution issues de la recherche opérationnelle, le choix d'une d'entre elles se justifie par les caractéristiques des problèmes traités et des outils à concevoir. La deuxième partie de ce chapitre se focalise sur l'analyse des outils d'aide à la décision existant pour la résolution des problèmes dans les chaînes logistiques. Nous y décrivons le type d'outils et les méthodes de résolution qui y sont souvent imbriquées et donnons des exemples d'utilisation.

1.1 Chaîne logistique

Dans cette section nous commençons par introduire des éléments importants dans la définition et la gestion des chaînes logistiques. Ensuite, nous présentons le problème de la gestion et du contrôle des flux dans les maillons de la chaîne logistique. Enfin, nous faisons le point sur les problèmes de gestion rencontrés dans la partie de la chaîne concernée par nos travaux de recherche, les plateformes logistiques.

1.1.1 Présentation générale

Définitions de la littérature

Dans la littérature, on définit les chaînes logistiques comme le réseau de toutes les entités qui interviennent dans la fabrication des produits selon les exigences des consommateurs et qui ont un impact sur le coût de ces produits. Govil et Proth [69] définissent une chaîne logistique comme un réseau global d'organisations qui coopèrent afin d'améliorer les flux d'information et de matériels entre fournisseurs et clients au plus bas coût et dans les meilleurs délais.

Gunasekaran *et al.*, dans [74], définissent la chaîne logistique comme un réseau de fournisseurs, usines, entrepôts, centres de distribution, et magasins au travers duquel les matières premières sont achetées, transformées et livrées aux consommateurs.

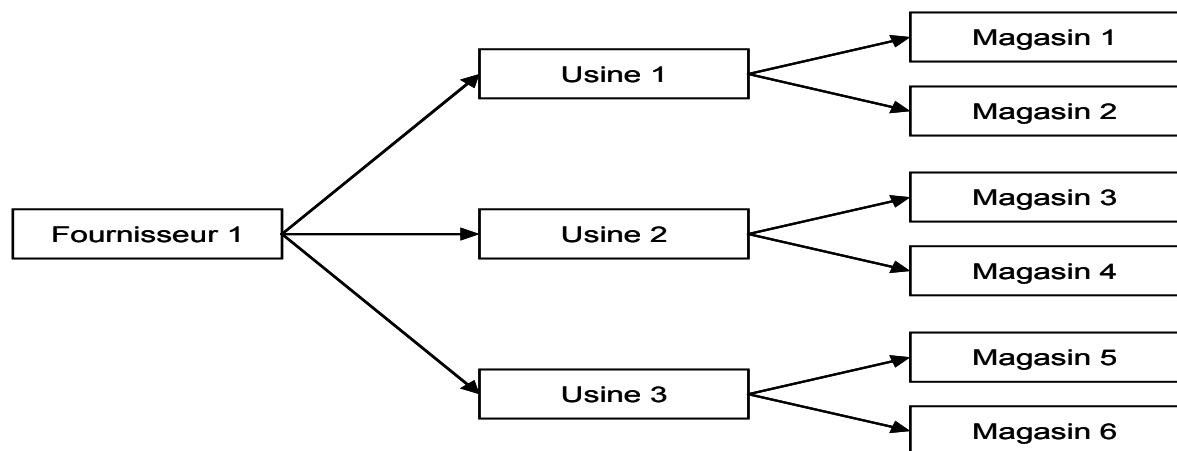


FIGURE 1.1 – Exemple de chaîne logistique à trois étages (Khouja [88])

Selon Hall et Potts [78], la chaîne logistique représente tous les étages auxquels on donne de la valeur ajoutée aux produits, ceci inclut l’approvisionnement des matières premières et des composants intermédiaires, la fabrication de produits finis, le conditionnement, le transport, l’entreposage, et la logistique. Un exemple de chaîne logistique à trois étages est présenté dans la figure 1.1.

Pour Moon *et al.* [108], il s’agit d’un processus intégré dans lequel plusieurs entités travaillent ensemble pour obtenir des produits de qualité à bas prix, avec des niveaux de stocks réduits et un niveau élevé de performances.

L’objectif premier d’un tel réseau, sous des conditions satisfaisantes de rentabilité pour tous, est la satisfaction du client final ; et donc toutes les activités de la chaîne doivent être conçues selon les besoins des clients. Plusieurs notions importantes peuvent être retenues des définitions précédentes. Les notions de flux, d’entités, de coopération, ainsi que les notions liées aux activités transformant les produits en leur donnant de la valeur ajoutée à différents niveaux de la chaîne. Toutes ces notions sont importantes dans la définition de la chaîne logistique et sont abordées individuellement à la suite de cette section.

Structure des chaînes logistiques

Les chaînes logistiques peuvent être considérées du point de vue du produit et de l’entreprise. Du point de vue du produit, la chaîne qui le concerne est constituée de tous les partenaires (entités juridiques) intervenant d’une manière ou d’une autre dans la production et la satisfaction de la demande du produit en question, le client lui même fait partie de ce réseau. Nous pouvons identifier différentes fonctions que ces partenaires peuvent effectuer au sein de la chaîne : approvisionnement, fabrication, entreposage, sous-traitance, distribution, ventes, ... Une entité juridique peut regrouper plusieurs fonctions. Du point de vue de l’entreprise (regroupant une ou plusieurs fonctions), on considère toutes les chaînes logistiques où l’entreprise intervient. Si une entité juridique regroupe plusieurs fonctions, on parle de chaîne logistique interne pour les fonctions qu’elle gère directement et les liens qu’elle supervise avec ses partenaires directs.

Chaque entité a un champ d'action ou un rôle bien défini dans la chaîne logistique. De même, chaque organisation a des problèmes à résoudre et doit prendre des décisions concernant son champ d'activité. Ce n'est pas pour autant que toutes les entités sont indépendantes ; elles interagissent entre elles et subissent l'effet des décisions des autres. L'efficacité avec laquelle se font les interactions a un impact fondamental dans la performance de la chaîne logistique.

Gestion de la chaîne logistique

Lorsque l'on cherche à traiter de manière regroupée ou à associer les problématiques qui concernent chacune des entités, et que l'on veut obtenir un niveau de performance global, alors on parle de gestion de la chaîne logistique. Simchi-Levi *et al.* [134] définissent la gestion de la chaîne logistique comme un ensemble d'approches utilisées pour intégrer, de manière efficace, fournisseurs, fabricants, entrepôts, et magasins, de sorte que les bonnes quantités de marchandise sont produites et distribuées aux bons endroits et aux bons instants, tout en minimisant les coûts et en satisfaisant le niveau de service exigé.

C'est vers le début des années 80 que la gestion de la chaîne logistique a pris de plus en plus d'importance. Les entreprises avaient réussi à réduire les coûts de production internes avec la mise en pratique de différentes stratégies de production. Les entreprises ont pris conscience que l'amélioration de leurs propres systèmes de production n'était pas suffisante et qu'il fallait gérer efficacement les interactions des entités de la chaîne. Ceci leur permettrait de réduire les coûts inutiles associés aux politiques de transport, aux coûts de stockage, entre autres. Ainsi, l'objectif de la gestion de la chaîne logistique est d'être efficace au niveau des coûts tout au long de la chaîne logistique. Il s'agit de minimiser les coûts opérationnels, les coûts de transport et de distribution et les coûts de stockage des matières premières et des produits finis. Le but n'est pas de minimiser les coûts de distribution, ni de réduire les stocks de manière indépendante, mais d'avoir une approche de gestion globalement efficace.

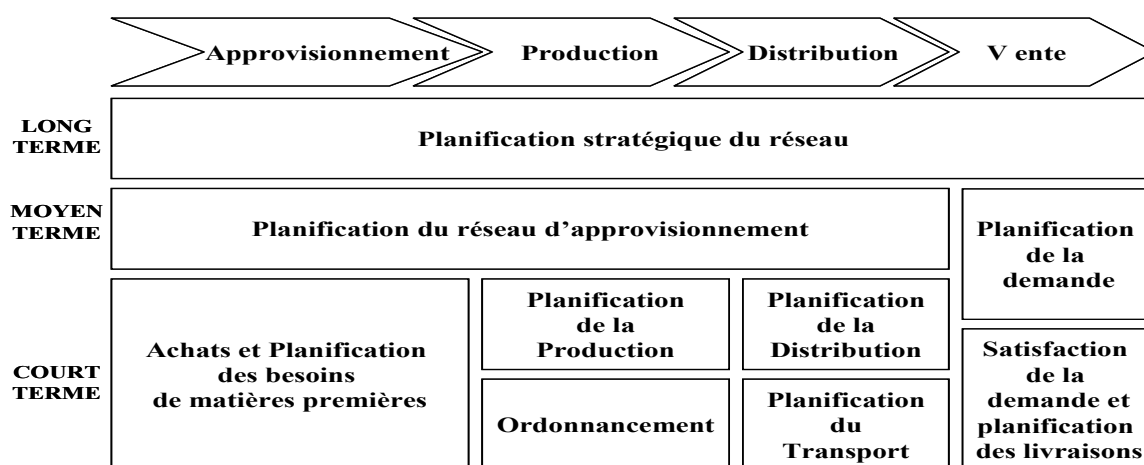
La gestion de la chaîne logistique peut être vue comme une approche intégrée de la gestion de la production dans chaque maillon, dont nous donnons plus de détails dans la suite de ce chapitre (c.f. section 1.1.2).

La difficulté de la gestion de la chaîne logistique réside dans le défi que cela représente de concevoir la chaîne et de minimiser les coûts transversaux en conservant les niveaux de service tout au long de la chaîne. En effet, il est déjà difficile de gérer une seule entité en minimisant les coûts et en gardant le niveau de service. La difficulté s'accroît exponentiellement quand le nombre d'organisations se multiplie. Plusieurs facteurs rendent presque impossible l'optimisation globale de la chaîne logistique comme la complexité du réseau logistique, les objectifs antagonistes et les fluctuations de demande et de coût. Ces fluctuations peuvent être dues à l'impact des variations saisonnières, aux offres des concurrents, aux tendances du marché, sans oublier les aléas.

Dans la suite de cette section, nous décrivons quelques aspects de la gestion de la chaîne logistique. Pour une description plus détaillée des aspects concernant la conception et la gestion des chaînes logistiques, ainsi que les approches qui sont utilisées, nous renvoyons le lecteur à Govil et Proth [69], Manzini *et al.* [101], Gunasekaran *et al.* [74], Simchi-Levi *et al.* [134], et Chopra et Meindl [43].

Décomposition temporelle et hiérarchique des problèmes de décision

Comme nous pouvons le voir, la gestion du réseau logistique est une tâche compliquée à laquelle sont associées des prises de décisions à tous les niveaux : dès l'étape de conception de la chaîne jusqu'à son fonctionnement opérationnel. Toutes les décisions à prendre auront un im-

FIGURE 1.2 – Problèmes de planification dans la chaîne logistique (Meyr *et al.* [106])

pact dans une période de temps définie. Aussi, comme en gestion de production, nous pouvons identifier trois niveaux temporels auxquels les décisions sont associées : stratégique, tactique et opérationnel qui auront un effet à long, moyen et court terme respectivement.

Le niveau stratégique étudie des problèmes de décision qui ont un impact à long terme sur l'organisation. Celui-ci inclut des décisions concernant le nombre, la localisation, et la capacité des entrepôts et des centres de production, le choix de partenaires, l'organisation des flux au sein du réseau logistique, etc. Le niveau tactique inclut des décisions qui sont reconsidérées périodiquement, avec des périodes qui vont de trois mois à un an. Les champs décisionnels sont par exemple : les décisions d'approvisionnement et de planification de la production, les politiques d'entreposage, les stratégies de transport et aussi la fréquence de visite des clients. Enfin, le niveau opérationnel se concentre sur les décisions de tous les jours, telles que : ordonnancement, allocation des ressources, détermination des délais de livraison, routage, chargement des camions, etc.

En plus de la dimension temporelle des décisions, Stadtler [141] donne une décomposition hiérarchique des décisions pour la gestion de la chaîne logistique où l'objectif premier est d'améliorer la compétitivité du réseau et la qualité du service que l'on fournit aux clients. L'auteur établit deux piliers fondamentaux pour atteindre l'objectif : l'intégration des entités et la coordination des flux.

Chaque pilier induit différents problèmes décisionnels. L'intégration d'entités inclut, par exemple, le choix des partenaires (fournisseurs, sous-traitants, etc.) pour lequel on prendra en compte plusieurs aspects comme l'état actuel du réseau, les besoins que l'on cherche à satisfaire, les emplacements géographiques, les capacités des partenaires potentiels. Une fois que les partenaires sont déterminés, on peut définir l'organisation exacte du réseau ; on cherche alors à déterminer de manière précise les relations entre les partenaires en prenant en compte les objectifs communs. Cette procédure d'intégration a, évidemment, une influence non négligeable sur les performances

du réseau logistique et aussi sur le partage du marché entre les concurrents.

De même, pour la coordination des flux on doit faire face à la prise de décision dans différents domaines : les choix technologiques qui permettront les échanges d'information entre les partenaires, la conception des processus tout au long de la chaîne pour éliminer les activités inutiles, ou encore la planification coordonnée des flux. Cette dernière est, de loin, la tâche la plus compliquée à cause de la complexité du réseau et des objectifs contradictoires des partenaires. Nous y reviendrons dans la section suivante. Dans la figure 1.2 on peut trouver la classification temporelle et fonctionnelle des problèmes de planification que l'on retrouve dans la gestion des chaînes logistiques selon Meyr *et al.* [106].

Coordination dans la chaîne logistique

Nous venons de voir que pour une gestion efficace du réseau logistique, la bonne prise des décisions au sein d'une seule entité ne suffit pas. Il est donc nécessaire qu'à chaque étage de la chaîne, les partenaires prennent en compte l'impact de leurs actions sur les autres étages.

Gunasekaran *et al.* [74] parle de la chaîne logistique comme une relation à long terme entre fournisseurs et clients. Dans le but de continuer cette relation, la coordination doit améliorer la rentabilité de tous. Qu'il s'agisse des échanges d'information ou de la coordination des activités entre fournisseurs, producteurs, entrepôts et magasins ; l'intégration sera moins difficile si les différentes entités appartiennent à la même entreprise (et qui cherchent donc à atteindre la même performance globale), que si elles font partie de compagnies différentes avec des intérêts parfois conflictuels.

L'impact du manque de coordination peut se sentir à plusieurs endroits de la chaîne : au niveau des coûts de production, des coûts de stockage, des cycles de réapprovisionnement, des coûts de transport, du coût de personnel, de la disponibilité de certains produits, des relations entre partenaires de la chaîne.

Pour ces raisons, le besoin de coordonner les décisions est évident si l'on souhaite améliorer les performances globales et être meilleur que ses concurrents.

Dans la littérature, plusieurs articles traitent la coordination du réseau logistique. Nous renvoyons le lecteur vers Li et Wang [99] et Sahin et Robinson [129] pour une revue des travaux sur les mécanismes de coordination de flux et d'informations dans les chaînes logistiques.

Thomas et Griffin [145] classifient les modèles de coordination dans les chaînes logistiques en trois catégories : acheteur-vendeur, production-distribution et stockage-distribution. La création de partenariats entre les acteurs de la chaîne est l'une des formes de coordination les plus courantes dans la réalité, les objectifs sont, en général, de trouver des stratégies favorables pour l'ensemble, de définir les responsabilités,...

De manière générale, nous pouvons identifier plusieurs sources de coordination dans la littérature qui peuvent être classées dans les catégories précédentes : l'intégration des décisions stratégiques pour ce qui est la conception de la chaîne (Stadtler [141], Manzini *et al.* [101]), la planification coordonnée de la production, le transport et le stockage (Lei *et al.* [97], Sarmiento et Nagi [131]), l'ordonnancement de la production et la distribution ou la gestion de stocks (Mouloua [109], Khouja [88], Cárdenas-Barrón [25], Giard et Mendy [67], Hall et Potts [78], Kaminsky et Kaya [87], Ganeshan [63], Giannoccaro *et al.* [66], Hnaien [84]).

Il est aussi évident que la tâche de coordination est très difficile à cause de la structure de la chaîne logistique, des objectifs antagonistes des partenaires et de la difficulté de partage des informations. C'est pourquoi, dans la littérature, la plupart des recherches se sont concentrées sur l'intégration de certains sous secteurs de la chaîne logistique.

1.1.2 Gestion de la production et contrôle de flux au sein d'une entité de la chaîne logistique

Dans une économie concurrentielle, les entreprises de tous les secteurs se voient contraintes à organiser leurs productions de manière à fabriquer une grande variété de produits de qualité et au moindre coût. De plus, la concurrence impose qu'elles aient des délais de livraison courts et fiables. Il est aussi de leur intérêt d'être au courant de l'évolution technologique sur les processus intervenant dans la production et la conception des produits, pour éventuellement accroître les rendements (augmenter les débits et minimiser les coûts de production). Dans cette section nous abordons le problème de la gestion de la logistique du point de vue d'une entreprise (ou d'une entité juridique) qui fait partie du réseau logistique. Nous donnons par la suite une description des problèmes à moyen et à court terme rencontrés dans la gestion de la production d'une entité et nous consacrons une partie de cette section à l'analyse des mécanismes de coordination concernant les fonctions de la gestion de production. Ici nous n'abordons pas les problèmes à long terme car ils sortent du contexte de cette thèse.

A. Notions générales

Gestion de la production

La gestion de la production est un ensemble d'activités à moyen et à court terme (conception, planification, ordonnancement, gestion de l'information et contrôle) qui ont pour objectif d'optimiser les processus qui donnent de la valeur ajoutée aux produits tout au long de la production. L'objectif final est de réduire les délais et minimiser les coûts en respectant les contraintes auxquelles ces activités sont soumises. Face à cette situation, l'amélioration continue des flux est envisagée en supprimant les opérations inutiles dans tous les processus de l'entreprise. Ainsi, la gestion de la production se place au cœur de la stratégie de l'entreprise, elle détermine la durée du cycle de fabrication, les ressources (économiques, humaines, techniques) mises en place pour assurer la production et la durée d'utilisation de ces moyens.

Nous pouvons identifier les mécanismes d'action de la gestion de production suivants : la diminution des stocks, l'amélioration du séquençement des opérations, la détermination des tailles des lots de fabrication pour chaque famille de produits, la diminution des temps de configuration, la coordination. L'évolution de la gestion de la production incite à travailler chez chacun des partenaires de la chaîne logistique interne mais principalement au niveau des connexions. Par la suite, nous faisons le point sur ces mécanismes au moyen et court terme.

Gestion des flux

Le contrôle des flux a un rôle primordial dans la gestion de production. On parle ici d'une part des flux physiques : approvisionnement, transport des matières premières et des composants dans des usines, transport et livraison des produits finis ; et d'autre part des flux d'information comme le suivi de commandes, des ordres de fabrication, des heures de main d'œuvre, etc. Le contrôle des flux consiste à piloter l'ensemble des activités successives réalisées lors de la fabrication ou la distribution d'un produit. C'est ce mouvement des matières premières, des composants, des sous-ensembles, des en-cours, des produits finis le long de la chaîne de fabrication et de distribution, qui forme le flux. La gestion de production veut, par le contrôle des flux, simplifier les flux physiques, faciliter les échanges en les fluidifiant ou en les accélérant. Dans le but d'éviter des pannes, de diminuer les temps de configuration et de développer la collaboration entre les fournisseurs et les distributeurs.

Il existe différentes approches pour gérer les flux. L'environnement concurrentiel actuel des

entreprises fait que l'approche de gestion des flux qui se révèle la plus efficace, du point de vue économique, est celle des flux tendus. Sa caractéristique est qu'elle minimise les stocks et les en-cours le plus possible par rapport au risque de non satisfaction de la demande à cause des délais. Deux types de flux sont identifiés dans cette approche : les flux poussés et les flux tirés. La gestion par flux poussés est une technique basée sur la prévision et la planification (Material Requirement Planning - MRP). Cette technique de gestion permet d'anticiper les besoins exacts avec leur décalage dans le temps. Il faut faire la distinction entre les flux programmés et les flux subis. Les flux programmés sont ceux concernant les produits finis ou pièces de rechange, vendus au client et que l'on connaît par les prévisions. Les flux subis sont ceux nécessaires pour répondre à la demande prévue ou imprévue, donc tous les processus de production des produits finis et pièces de rechange. La gestion par flux poussés consiste à prévoir le mieux possible la demande (flux programmés) et à calculer les flux qui devraient être subis en produisant au plus tard compte tenu des capacités de production.

La gestion par flux tirés est une approche où la matière n'est pas poussée de l'amont vers l'aval (pour satisfaire la demande à temps), mais tirée par la consommation (demande déjà satisfaite). Dans cette approche, des petits stocks de produits finis et semi-finis sont gardés tout au long de la chaîne de production. Le principe est le suivant : dès que le client, interne ou externe, consomme les composants en provenance de son fournisseur le stock doit être rempli à nouveau et un ordre de fabrication est envoyé au fournisseur (Erschler et Grabot [54]).

Nos travaux de recherche présentés dans cette thèse se basent sur le principe de flux prévus et calculés.

Pour une présentation détaillée de la gestion de la production et toutes ses sous-fonctions on dirige le lecteur vers Courtois *et al.* [46].

B. Gestion de production et contrôle des flux à moyen terme - Problèmes de planification

La gestion de la production à moyen terme a pour but de planifier les décisions relatives à l'activité globale d'une usine. A ce niveau de granularité temporelle, on cherche la réponse aux deux questions suivantes : Combien produire de chaque famille de produits ? Quand la production de ces quantités doit être lancée ? De manière générale, il s'agit de la planification de tous les processus qui interviennent depuis la production jusqu'à la satisfaction de la demande. Ceci correspond à l'étape de la "planification du réseau d'approvisionnement" dans la figure 1.2. Les activités concernées sont : la planification de la demande et des activités de production ; la gestion des stocks ; la configuration du réseau de distribution ; la définition des contrats avec les fournisseurs ; la détermination des stratégies de distribution (par exemple la distribution directe fournisseurs-clients ou le passage dans une plateforme de stockage) ; la gestion de la main d'œuvre. L'objectif recherché à ce niveau est de coordonner les flux à toutes les étapes de la production, de trouver l'équilibre entre les demandes prévisionnelles et la capacité réelle de production de l'entreprise, de calculer les tailles des lots de production pour chaque famille de produits et d'éviter les goulets d'étranglement. La taille importante du problème à résoudre conduit souvent à une représentation agrégée des produits et des ressources.

Dans cette section nous donnons une description détaillée des différentes activités de la gestion de la production au moyen terme et expliquons comment elles sont abordées dans la littérature.

Planification de la demande

Nous venons de le voir, dans n'importe quelle industrie, toute production est motivée par

la satisfaction de la demande. La demande, qu'elle soit connue avec certitude ou pas, est une information nécessaire pour pouvoir prendre des décisions comme combien produire ? Dans la gestion de la production d'une entreprise, l'estimation de la demande se fait à long, moyen et court terme, et ce pour répondre à des questions qui concernent ces trois niveaux temporels.

Toutes les décisions prises à moyen terme seront donc basées sur les commandes connues ou sur les prévisions de la demande faites pour les mois ou l'année à venir. Dans le moyen terme, le calcul des prévisions se fait, par exemple, pour définir et maîtriser les capacités globales de production et d'approvisionnement, acheter une machine, embaucher du personnel, ...

Dans la plupart des cas, la principale source d'information pour l'estimation de la demande est constituée par l'historique des ventes de l'entreprise. Parallèlement, on peut faire appel aux sondages et aux autres études de marché pour avoir des données d'actualité. D'un autre côté, l'entreprise peut avoir aussi une influence sur l'évolution de la demande, en faisant des promotions, par exemple. De toutes façons, à cause de la distorsion de l'information qui peut survenir par une communication déficiente entre les différents étages de la chaîne logistique, la perception de la demande peut changer à chaque niveau. Cet effet a un impact très important sur les coûts de production et sur la performance globale du réseau. D'où l'importance d'avoir un système de prévisions de la demande fiable.

Il existe de nombreuses méthodes qui fournissent des estimations plus ou moins correctes de la demande. Ces méthodes sortent du cadre de cette thèse, nous conseillons les travaux de Courtois *et al.* [46] et Chopra et Meindl [43] pour des explications approfondies de ces mécanismes.

Planification de la production

L'objectif de la planification de la production est de déterminer exactement combien et approximativement quand produire, pour cela on doit prendre des décisions concernant l'activité globale d'une usine. La planification de la production cherche à : prévoir et planifier la disponibilité et l'utilisation de ressources (équipes de travail, dispositifs de stockage et de transport, machines, main d'œuvre, ...) ; optimiser les coûts ; et avoir un plan de production qui soit réactif aux fluctuations du marché, Erschler et Grabot [54].

Avec la planification de la production on connaît, en moyenne et par familles de produits, à chaque période la quantité à produire en fonction des processus de production (gammes, nomenclatures, capacité des ressources, ...), de l'état du système de production (niveaux des stocks, des encours, pannes machine, ...), des prévisions de demande actualisées et des coûts mis en jeu (production, stockage, mise en fabrication). Etant donné que la planification se fait sur un horizon temporel assez long et que les prévisions de la demande changent avec le temps, la planification de la production est souvent remise en cause.

Au départ, la planification de la production se faisait avec un système de calcul automatique de type MRP (Material Requirement Planning) ou MRP II (Manufacturing Resource Planning). Le premier est un modèle qui calcule les quantités nécessaires des matériaux, le long de la chaîne de production, afin de satisfaire les demandes en produits finaux, il a été proposé par Orlicky [112] dans les années 60-70. Ce modèle ne tient pas compte des contraintes liées à la charge des ressources, ce qui représente un problème quant à la faisabilité du plan obtenu. Le MRP II est apparu, dans les années 70, en réponse à cette insuffisance. Le MRP II est une méthode de simulation industrielle qui permet de gérer la production depuis le long terme jusqu'au court terme. Il considère un système plus complexe contrôlant l'utilisation des capacités des ressources.

Avec l'évolution de la recherche opérationnelle et des outils mathématiques, on s'est rendu compte qu'il est possible d'optimiser le plan de production des composants et des produits finis sans avoir à décomposer le problème et à faire le calcul des besoins par une technique de type MRP. De nombreux modèles de planification optimale de la production existent dans la

littérature. En général on y considère les fonctions d'approvisionnement, de production et de consommation. Ces modèles tiennent compte de l'évolution des stocks, des contraintes de ressources, des capacités de stockage, des nomenclatures, de la satisfaction de la demande. Dans un premier temps, l'objectif était de déterminer un plan de production qui minimise les coûts de production et de stockage (Dauzère-Péres et Lasserre [48], Özdamar et Yazgaç [114]). D'autres aspects de la production se sont intégrés aux modèles avec le temps, comme la possibilité d'avancer ou de retarder la satisfaction de la demande, ou la prise en compte des coûts de personnel ou de préparation de machines. On a pu intégrer aussi des hypothèses de plus en plus réalistes, par exemple, la production par lots de taille fixe dans le cas où les processus technologiques l'imposent. Le problème de calcul optimal de cette taille est aussi un problème de planification appelé lot-sizing (Robert [125], Belvaux et Wosley [11], Billington *et al.* [12], Drexel et Kimms [52], Absi [1]).

La première partie de nos travaux, qui sera présentée dans le chapitre 2, se situe dans ce contexte. La planification de la production d'une entité avec des techniques de coordination entre ses partenaires.

Gestion de stocks d'approvisionnement et/ou de distribution

Pour plusieurs auteurs, les décisions concernant la gestion des stocks et la distribution sont les décisions les plus importantes au niveau tactique. Pourquoi y a-t-il des stocks ? Les stocks ont un rôle de régulation du processus de production, ils permettent de désynchroniser la demande d'un produit de sa production. Ainsi, ils donnent de la flexibilité à la production et ils évitent la rupture et la perte des ventes à cause des grands délais de production. Néanmoins, les stocks bloquent une grande quantité de moyens financiers et physiques qui représentent entre 25% et 35% des capitaux immobilisés d'une entreprise. Ceci constitue évidemment un désavantage de taille, et la réduction des coûts de stock s'annonce nécessaire.

D'après Silver [133], on cherche à répondre aux trois questions suivantes : Avec quelle fréquence doit-on faire un bilan des stocks ? Quand faut-il émettre un ordre de réapprovisionnement ? De quelle taille doit être cet ordre ? (Giannoccaro *et al.* [66], Axsäter et Zhang [4]). Et tout cela dans l'objectif de maintenir un seuil acceptable au niveau des services qui utilisent le stock. Il faut savoir que les stocks se trouvent partout où il y a de la production dans la chaîne logistique. Ils se matérialisent sous formes de matières premières, de pièces de rechange pour les machines ou d'outillages, des en-cours de production ou des produits semi finis et des produits finis.

La gestion des stocks réunit des fonctions telles que le magasinage, la gestion de l'information, et la classification des produits par catégories. Comme nous l'avons vu précédemment, l'incertitude sur l'évolution de la demande peut avoir un impact catastrophique sur la production. La solution qui a été proposée dans un premier temps était d'avoir des grandes quantités de produits finis stockées pour répondre à la demande. Ceci n'est certainement pas une bonne idée car les coûts de stockage peuvent être bien plus grands que la perte éventuelle de ventes à cause des délais de livraison et de production. Cependant, l'existence des stocks de sécurité est une nécessité pour pallier aux différents aléas qui peuvent apparaître.

Dans la littérature, la gestion de stocks est abordée sous plusieurs angles. Les auteurs font, la plupart du temps (et comme pour beaucoup de problèmes de gestion de production), des hypothèses irréalistes telles que : des systèmes de production qui n'ont qu'un seul produit, des demandes ou délais d'approvisionnement complètement déterministes, des paramètres stationnaires, ... pour simplifier leurs modèles (Ganeshan [63]).

Les problèmes de dimensionnement et l'utilisation des lieux de stockage est traité avec plus de détail dans la section 1.1.3. La solution de ce problème varie selon le système de production considéré et ses interactions avec le marché. Kaminsky et Kaya [87], par exemple, fournissent

une approche pour déterminer les endroits de la chaîne logistique interne auxquels on doit avoir des stocks pour des matières premières, des produits semi finis ou des produits finis, ainsi que les quantités de ces produits.

Transport et stratégies de distribution

Le transport est une fonction primordiale dans les chaînes logistiques, il consiste à déplacer les produits entre deux entités de la chaîne. En particulier pour une entreprise, cette fonction est chargée de faire arriver les produits chez les clients en respectant certains critères. Comme pour toutes les autres fonctions, les coûts de transport sont loin d'être négligeables et l'impact de la qualité de la distribution sur les performances globales est très important, par exemple une distribution rapide permet à l'entreprise d'être plus réactive. Par ailleurs, le type de transport qu'une entreprise utilise a une influence sur les stocks et le bon positionnement des installations. Les décisions associées au transport incluent le choix d'une stratégie de distribution et le choix d'un moyen de transport (avion, camion, train, bateau). Ces décisions concernent plutôt le niveau stratégique, au niveau tactique on trouve la planification de la distribution.

Bien que le choix d'une stratégie de distribution soit une décision stratégique, nous présentons rapidement les types de stratégies. Simchi-Levi *et al.* [134] identifient trois stratégies de distribution qui sont le plus souvent utilisées :

L'*expédition directe* est une stratégie où les produits sont expédiés directement du fournisseur vers les magasins sans passer par les centres de distribution. L'*entrepotage* est la stratégie classique où les produits sont stockés dans des entrepôts et sont acheminés vers les clients selon leurs besoins. Le *cross-docking* est une stratégie où les produits sont distribués sans aucun traitement intermédiaire du fournisseur aux clients en passant par les centres de distribution ou entrepôts. Les produits restent une très courte durée (souvent moins de 12 heures) dans les entrepôts qui agissent donc comme des coordinateurs du processus d'approvisionnement et comme des points de transbordement des commandes des détaillants qui n'ont pas de stocks chez eux.

Un autre problème, d'ordre stratégique, lié à la distribution est celui de concevoir le réseau de distribution des produits d'une entreprise, c'est-à-dire déterminer le nombre de centres de production et d'entrepôts et/ou centres de distribution ou points de transbordement et leurs localisations. Nous envoyons le lecteur intéressé vers Chopra et Meindl [43] et Amiri [2] pour plus d'information sur la conception du réseau de distribution et les problèmes d'optimisation associés.

Le problème de planification de la distribution consiste à déterminer les quantités qui doivent être livrées, et à prévoir les dates de livraison chez les clients. Ce problème prend en compte les capacités des véhicules dont dispose l'entreprise ou ses partenaires de distribution, la capacité de production et bien sûr des prévisions de la demande. Très souvent dans la littérature, on trouve le problème de planification de la distribution associé au problème de planification de la production ou à celui du stockage. Par exemple, Özdamar et Yazgaç [114] traitent le problème de production-distribution d'une entreprise. Ils proposent une approche de planification de production hiérarchique itérative avec différents niveaux d'agrégation (du temps, des capacités, des demandes, des produits) pour déterminer des plans de production et de distribution prévisionnels tout en minimisant les coûts de stockage et le nombre de véhicules. Gen et Syarif [65] proposent un algorithme génétique pour le problème de planification de production, de distribution et de stockage pour satisfaire les demandes dans les délais. Sarmiento et Nagi [131] présentent un état des problèmes de planification stratégique et tactique qui incluent des décisions concernant la distribution.

C. Gestion de production et contrôle de flux à court terme - Problèmes d'ordonnancement

La gestion de la production à court terme consiste à décider exactement quand et par quelle ressource produire. De manière générale, étant donnés un horizon de temps, un ensemble de ressources et leur disponibilité sur l'horizon, un ensemble d'activités auxquelles sont associées les ressources permettant leur exécution, la capacité qu'elles requièrent et leur durée d'exécution, le problème d'ordonnancement consiste à décider, pour chaque activité, ses dates de début et de fin ainsi qu'à affecter les ressources (humaines et matérielles) pour exécuter ces activités. En gestion de production, ces activités sont associées à la production des commandes. Les décisions sont prises, à court terme, sur la base établie par le plan de production prévisionnel fourni par la gestion de production à moyen terme. Dans cette partie nous nous concentrons sur l'ordonnancement de la production (correspondant à l'étape "ordonnancement" dans la figure 1.2), mais cela peut aussi concerner les fonctions distribution et approvisionnement de la gestion de production et toute activité qui met à disposition des ressources.

Dans ce qui suit nous décrivons brièvement le problème d'ordonnancement des différentes activités de la gestion de la production : ordonnancement de la production (ordonnancement d'atelier), ordonnancement du transport, ...

Ordonnancement d'atelier

Un atelier de production est l'endroit physique où la production se déroule. Il est composé des ressources (matières premières, composants, machines, main d'œuvre, outils) et des installations nécessaires à la production. Un atelier est caractérisé par : le type de tâches à exécuter et les relations de précédence entre elles, le type de ressources, les gammes de fabrication (ordre de passage par les machines). Les tâches à exécuter peuvent être interrompues au cours d'exécution (préemptives) ou non ; les ressources peuvent être consommables (leur quantité diminue avec l'exécution des tâches) ou renouvelables (le cas des machines ou du personnel). Nous pouvons distinguer plusieurs types d'atelier selon l'organisation du travail entre les machines : flowshop, jobshop et openshop. Dans un flowshop chaque job visite chaque machine de l'atelier et l'ordre de passage d'un job sur les différentes machines est le même pour tous les jobs. Dans un jobshop l'ordre de passage des jobs sur les différentes machines varie d'un job à un autre. Finalement, dans les openshops les gammes de fabrication ne sont pas fixées à l'avance, l'ordre de passage des jobs sur les machines est alors une décision à prendre.

L'ordonnancement d'atelier consiste à : identifier les données du problème (ensemble de ressources, ensemble de jobs à réaliser ou ordres de fabrication donnés par le plan de production, une fonction objectif à optimiser), placer les opérations selon la disponibilité des ressources ou des contraintes technologiques pour répondre à un certain nombre d'objectifs, tout en respectant les contraintes de production. Un job est un regroupement d'opérations, pour qu'un job soit fini, toutes les opérations le concernant doivent être exécutées.

La résolution du problème d'ordonnancement se fait dans le but de trouver des solutions réalisables ou de trouver la meilleure solution selon un critère. Parmi les critères classiques de la littérature on trouve : la minimisation des en-cours, la minimisation des délais de fabrication, le respect des délais (Sourd et Kedad-Sidhoum [140], Bülbül *et al.* [17]), la maximisation de l'occupation des ressources, la minimisation de la durée totale (Chang et Lee [35]), le nombre de tâches exécutées (Hassin et Shani [80]), ...

Nous pouvons citer les travaux de Fondreville [57], Chen et Lee [37] et Gupta et Stafford [76] pour le flowshop, ce dernier présente un bilan des travaux de l'ordonnancement de flowshop pendant les dernières 50 années. Ainsi que ceux de Baptiste *et al.* [6], Salegna et Park [130] et

le livre de Pinedo [119] pour plus d'information sur l'ordonnancement d'atelier. En reprenant la notation introduite par Graham *et al.* [70], une classification des variantes du problème peut être réalisée en fonction de l'environnement machine, des caractéristiques des activités à ordonnancer et du critère d'optimalité considéré.

Souvent, la combinatoire associée à des problèmes d'ordonnancement fait qu'ils sont difficiles à résoudre de manière optimale pour le critère choisi. Dans la littérature associée, on trouve des méthodes de résolution optimale pour des problèmes avec des hypothèses simplificatrices avec une ou deux machines par exemple mais qui, en général, sont utilisés comme base pour le développement de solutions pour des problèmes plus compliqués (Chang et Lee [35], Sourd et Kedad-Sidhoum [139], Bülbül *et al.* [18]). Il existe très peu de logiciels d'optimisation exacte de problèmes d'ordonnancement de taille industrielle en raison de la difficulté de proposer des méthodes de résolution génériques efficaces. Par contre, beaucoup d'outils d'aide à la décision fournissent des solutions réalisables considérées comme satisfaisantes.

D. Coordination dans la gestion de production et le contrôle des flux

Dans cette partie, nous nous intéressons à la prise de décisions conjointes dans la gestion de production dans l'objectif d'obtenir de meilleures solutions d'un point de vue global. L'idée d'étudier conjointement des fonctions concurrentes s'est présentée comme un nouveau mécanisme d'amélioration de la gestion de production. Tout comme dans la chaîne logistique, au sein d'une seule entité juridique, deux types de coordination décisionnelle peuvent être identifiés. Le premier type de coordination est la prise de décisions intégrée, où plusieurs fonctions de la gestion de production sont considérées ensemble, dans le même niveau temporel, pour la prise de décisions comme par exemple l'ordonnancement de la production et la distribution (si celle-ci est intégrée à l'entreprise). Le deuxième type consiste à étudier une fonction particulière de la gestion de la production et de coordonner les décisions à différents niveaux temporels. L'objectif final dans tous les cas est de trouver un équilibre.

Dans ce qui suit, nous commençons par nous placer à un niveau temporel pour présenter les techniques de coordination, dans la planification et l'ordonnancement, trouvées dans la littérature, ainsi que les approches de résolution utilisées. Ensuite, les mêmes aspects sont analysés pour la coordination entre les niveaux tactique et opérationnel. Notre objectif n'est pas de faire une recherche bibliographique exhaustive des approches, mais d'identifier les problèmes étudiés dans la littérature concernant la coordination en gestion de la production.

Coordination à un même niveau temporel

Il y a différents types de coordination possibles entre les opérations d'une entreprise (une entité juridique avec ou sans centre de décision centralisé). Par exemple, si c'est elle même qui gère la distribution vers ses clients, l'idéal serait de coordonner les activités concernant la production et la distribution car ce sont des activités qui se suivent directement dans le processus de satisfaction de la demande des clients. En général, l'intérêt porté sur les modèles d'intégration de la production et de la distribution, et autres, est dû aux efforts de réduction des niveaux de stockage, car ce type de modèles crée une interaction plus serrée entre les partenaires de la chaîne logistique interne.

Le premier type de coordination concerne justement *la production et la distribution* aux niveaux tactique ou opérationnel. De nombreux articles (moins nombreux pour la coordination dans l'ordonnancement) traitent ce sujet avec des objectifs très variés comme minimiser les coûts de production et satisfaire la demande des consommateurs dans les délais, éventuellement mi-

nimiser le coût global de production et de distribution, etc. ; mais aussi avec des hypothèses simplificatrices, comme supposer que les fonctions de production et du transport sont gérées par le même département au sein de l'entreprise et la coordination est, de ce fait, possible, ou décider que la production et la distribution ne concerne qu'un seul type de produit, etc. Chandra et Fisher [34] combinent l'ordonnancement de la production et le problème de tournées de véhicules au niveau de la planification, les auteurs comparent l'approche intégrée avec l'approche de résolution séquentielle et montrent l'intérêt de l'intégration de la prise des décisions concernant la production et la distribution. De même, Hall et Potts [78] étudient le problème au niveau opérationnel, dans des chaînes à plusieurs étages, en ordonnant la production dans un ou plusieurs ateliers et en constituant les batches des jobs qui doivent être livrés ensemble, ils ne considèrent pas la construction de tournées de véhicules mais des durées de livraison pour chaque client.

Un autre type de coordination identifié concerne les fonctions de *la distribution et le stockage* sans prendre en compte la production. L'objectif est de minimiser les coûts de stockage (en minimisant les stocks retenus dans les centres de stockage) et de transport. Ce type de modèles de coordination s'adresse à des entreprises de distribution pour l'organisation de la distribution à leurs clients, cela concerne les plateformes logistiques et les entrepôts dont nous parlons dans la section suivante. Nous faisons une présentation plus détaillée de ce type de coordination dans la section 1.1.3.

Quelques travaux considèrent les trois fonctions : *production, distribution et stockage* ensemble et essaient de résoudre le problème de coordination des trois fonctions simultanément. Ce problème est très compliqué et il faut faire appel à des méthodes heuristiques, de décomposition et des métaheuristiques pour sa résolution. Lei *et al.* [97], par exemple, traitent coordination de la production, la gestion des stocks et l'organisation de la distribution pour satisfaire la demande des consommateurs et minimiser les coûts. Les auteurs considèrent un seul produit (mais leur modèle peut être étendu au cas à plusieurs produits), un ensemble de sites de production hétérogènes avec des flottes de transport et un ensemble de clients communs. L'objectif est de minimiser les coûts de transport, de stockage et de production. Les auteurs proposent un algorithme par décomposition où l'on détermine en premier le planning de production, de stockage et de transport, puis à l'aide d'une heuristique ils calculent les tournées de véhicule.

Bard et Nananukul [8] traitent aussi le problème de coordination entre la production, le stockage et la distribution. Dans ce travail, les auteurs supposent qu'il y a un seul centre de production et plusieurs clients qui ont des demandes connues à l'avance, les stocks sont retenus chez les clients, il y a également une flotte de véhicules homogène. Les auteurs proposent un algorithme basé sur la recherche tabou pour déterminer le planning de production, tout en prenant en compte les contraintes de stockage chez les clients et pour calculer les tournées des véhicules, dans le but de minimiser les coûts (production, stockage, distribution). Ils proposent également une analyse des études récentes concernant le problème de production, distribution et stockage intégré.

Nous citons aussi les travaux de Park [115], Pundoor et Chen [123], Chen et Vairaktarakis [40], Hall et Potts [79], Chang et Lee [35], Li *et al.* [98], Özdamar et Yazgaç [114] et Martin *et al.* [103]. En particulier, Sarmiento et Nagi [131] et Chen [39] présentent des analyses de l'état de l'art concernant la coordination entre la production et la distribution, incluant des décisions liées au stockage.

Coordination à plusieurs niveaux temporels

Pour la coordination d'une même activité aux niveaux tactique et opérationnel, Robert [125] identifie les approches monolithiques et les procédures itératives. Les approches monolithiques consistent à intégrer dans une seule formulation les niveaux temporels. Dans les approches itératives, la planification et l'ordonnancement se font de manière indépendante dans des procédures itératives, mais les décisions sont remises en cause à chaque itération. La plupart des articles qui abordent ce problème d'intégration concernent la production, mais le même principe s'applique à d'autres problèmes comme les problèmes de transport, de gestion de personnel, etc.

Dauzère-Pérès et Lasserre [48] montrent l'intérêt de la coordination entre les niveaux temporels, ils expliquent que les approches hiérarchiques, où l'on décompose la prise de décisions en trois niveaux : stratégique, tactique et opérationnel, ne sont pas efficaces car elles ignorent ou négligent les contraintes au niveau opérationnel, et, de ce fait, très souvent les plannings obtenus en pratique ne sont pas réalisables. Dans cet article, les auteurs traitent le problème de la planification et l'ordonnancement de la production où l'on minimise les coûts de production et de stockage. Ils expliquent que l'approche monolithique n'a pas d'intérêt à cause des nombreuses perturbations du système de production et à cause de la difficulté de la résolution de problèmes de grande taille. Ils comparent l'approche hiérarchique (ou la capacité de production est agrégée, et souvent surestimée), avec des approches itératives sur deux processus, l'un effectue du lot-sizing en supposant que les séquences d'opérations sont fixées, l'autre ordonnance en supposant que la taille des lots est connue et fixée. Le but est de déterminer un planning optimal faisable en considérant la capacité de l'ordonnancement. L'ordonnancement définitif est calculé par la suite.

Récemment Moon *et al.* [108] ont étudié le problème de planification de la production et de l'ordonnancement dans un environnement où il y a des relations de précédence. Ils proposent une formulation mathématique qui intègre les deux problèmes pour minimiser le temps total d'exécution pour avoir des solutions optimales globales, et résolvent le problème avec un algorithme génétique. D'autres travaux comme Tan [143], Drexler et Kimms [52], Brandimarte et Calderini [20], et plus récemment Wolosewicz [155] traitent le problème de coordination de la planification et de l'ordonnancement de la production.

Approche juste-à-temps (JAT)

L'approche juste-à-temps est une technique de gestion de production qui a pour objectif de ne produire que ce qui sera vendu juste à temps pour qu'il soit vendu. Dans la logique du JAT, la fabrication d'un produit est déclenchée par sa non-disponibilité chez le client immédiat alors qu'il est très possible qu'il en ait besoin à n'importe quel instant (flux tirés par la consommation). L'application du JAT est très liée à l'introduction du système du Kanban qui permet, au moyen d'étiquettes signalant les demandes de chaque poste de la chaîne de production, de mettre en œuvre simplement une politique de production JAT. Suivant la logique du juste-à-temps, il est facile de déduire que son efficacité est très sensible aux aléas de la production comme les pannes, les temps d'attente, les produits défectueux, etc. et aux gaspillages comme les déplacements et les stocks inutiles qui ne font qu'augmenter les coûts. C'est pourquoi les gestionnaires redoublent d'efforts pour solutionner ces problèmes et pourquoi le JAT induit l'optimisation des processus de l'entreprise. Au départ, le JAT ne concernait que les lieux de production mais peu à peu la philosophie s'est étendue à d'autres problèmes comme la distribution, où la livraison se fait pour que les produits arrivent chez les clients juste au moment où ils sont requis.

Dans les entreprises utilisant le JAT, l'organisation des processus à moyen terme se fait souvent à l'aide d'un système MRP (ces deux modes de gestion ne sont pas incompatibles car ils se

placent à des niveaux temporels différents). Par contre, à court terme le dimensionnement et la date de la production sont imposés par la logique du JAT. Il est toutefois nécessaire d'organiser le travail avec les contraintes propres de la production, comme la capacité des ressources, qui ne peuvent pas être prises en compte par une méthode de type kanban par exemple. Sourd [138] introduit les éléments de base de l'ordonnancement juste-à-temps. La particularité du JAT dans l'ordonnancement est que les dates d'échéance sont données et doivent être respectées dans la mesure du possible, l'intégration de pénalités d'avance et de retard est la façon la plus courante d'imposer le juste-à-temps. Voir les travaux de Baptiste *et al.* [6], Hendel et Sourd [82], Sourd et Kedad-Sidhoum [140], Bülbül *et al.* [18], Esteve *et al.* [55], Bülbül *et al.* [17], Hassin et Shani [80] et Lauff et Werner [93] pour un aperçu des hypothèses et méthodes considérées.

La vision théorique du JAT est idéaliste car elle demande une qualité de service irréprochable, en n'autorisant aucune erreur, aucun imprévu et aucune économie d'échelle. De surcroît, il faut une main d'œuvre flexible, des délais de fabrication courts, etc. Dans un cadre de production réel, les économies faites sur le stockage et les réductions de délais sont vite confrontées aux investissements nécessaires pour assurer la réactivité des machines, la flexibilité du personnel, la disponibilité des moyens de transport. Dans le contexte de la chaîne logistique, le JAT est un processus qui s'applique sur les flux entre les fournisseurs et les centres de production, et entre ces derniers et les clients. Selon des études théoriques, cette approche de gestion conduirait à des améliorations importantes des processus. Néanmoins, d'après Khouja [88], malgré la popularité de JAT dans la chaîne logistique, les fournisseurs continuent de conserver des quantités relativement importantes de produits en stockage qu'ils délivrent par petits lots ; la raison est que le JAT est un système sensible qui ne peut pas prendre en compte les variations importantes du marché.

1.1.3 Plateformes logistiques

Dans cette section nous introduisons l'entité de la chaîne logistique sur laquelle nos travaux de recherche se sont centrés, même si nos modèles peuvent être utilisés dans un cadre plus large. Dans les sections précédentes nous avons parlé de la gestion de stocks comme l'une des activités les plus importantes dans la gestion de la production. Maintenant nous nous intéressons au rôle que les plateformes logistiques jouent dans la gestion des stocks (fonction magasinage) et de l'importance qu'elles ont d'un point de vue économique.

Dans cette partie nous introduisons quelques éléments qui vont éclaircir ce point et nous présentons les problèmes décisionnels que l'on peut rencontrer dans la gestion des entrepôts.

Définitions générales et objectifs des entrepôts

Mocellin [107] est la seule référence trouvée dans laquelle l'auteur souligne la différence entre un entrepôt et une plateforme logistique.

L'auteur définit un *entrepôt* comme l'endroit physique où sont stockées les marchandises dans des buts précis parmi lesquels on compte : le groupage ou le fractionnement de conditionnement de produits finis avant réexpédition, déconditionnement ou reconditionnement, l'utilisation différée en production de matières premières, attente spéculative pour les marchandises liées à des fluctuations de prix, ...

La *plateforme logistique* (*hub ou cross-docking*) d'un autre côté désigne plutôt l'endroit où l'on reçoit de la marchandise pour la réexpédier dans un délai très court. Il est rare de pratiquer des opérations de reconditionnement sur une plateforme, puisque l'objectif principal est de rediriger

les flux vers une autre destination.

L'*entrepasage* (*warehousing*) : est une prestation qui concerne toutes les activités associées à la gestion d'un entrepôt. C'est-à-dire toutes les opérations de mouvement des produits à l'intérieur de l'entrepôt et dans les centres de distribution, à savoir : réception, stockage, picking (ou extraction), emmagasinage, tri et expédition. La réception et l'expédition de la marchandise représentent l'entrée et la sortie des flux de l'entrepôt. Le stockage concerne l'organisation des biens dans les zones de stockage.

Le *picking* : est une activité qui consiste à sélectionner et à extraire du stock de produits à livrer ou à utiliser dans le processus de production ou de constitution de commandes.

Nous ne ferons pas, pour notre part, la distinction entre entrepôts et plateformes logistiques dans la suite du document. Et nous considérons, comme la majorité des autres auteurs, qu'aussi bien l'entrepôt que la plateforme logistique peut regrouper l'ensemble des opérations citées pour les entrepôts.

Comme nous pouvons le voir, l'objectif premier d'une plateforme logistique est celui de stocker des produits (pièces, matières premières, produits finis, ...) pour qu'ils soient disponibles quand les consommateurs de ces produits en ont besoin. On peut traduire cela par le besoin : de satisfaire rapidement la demande, de réduire les délais d'attente et de donner de la flexibilité à la production. Un autre objectif est celui de servir de point de transbordement des marchandises et éventuellement d'effectuer les activités nécessaires pour la livraison des produits, comme l'emballage.

Les problèmes de décision dans les entrepôts

Comme toute entité dans la chaîne logistique, la gestion des entrepôts est concernée par des décisions stratégiques, tactiques et opérationnelles. Au niveau stratégique on prend des décisions concernant la taille du ou des entrepôts, leur localisation, la sélection du matériel d'entrepasage, le niveau d'automatisation des opérations, la taille des différentes zones fonctionnelles, l'agencement physique de la plateforme et tout ce qui concerne sa conception et qui a un impact sur la capacité de stockage ... A moyen et court terme on s'occupe d'optimiser la logistique interne de l'entrepôt. Les décisions tactiques ont plus à voir avec la gestion de la main d'œuvre comme le calcul du personnel nécessaire, l'allocation des produits aux zones fonctionnelles, le calcul de la capacité de travail de la plateforme, la gestion des négociations avec les partenaires en amont et en aval de la plateforme. Pour finir, les décisions opérationnelles consistent essentiellement à : déterminer les tournées de picking, l'affectation du personnel aux différentes missions selon leur niveau de polyvalence, l'ordonnancement des tâches selon le planning d'entrée.

L'un des objectifs de la gestion des entrepôts est d'optimiser la capacité de débit. Optimiser la capacité de débit d'une plateforme logistique consiste à faire transiter les produits le plus rapidement possible en fonction des besoins des clients. Les pièces, produits, matériels ne doivent pas perdre de temps dans les différentes étapes du processus de réception ou de la mise en réserve par exemple. Mais dans beaucoup de situations pratiques, cet objectif n'est pas le seul. Souvent, les commandes ont des dates dues, et les pénalités de non respect de ces dates sont souvent élevées. Ainsi, un compromis est nécessaire entre la productivité et l'urgence.

La plupart des travaux traitant les plateformes logistiques se basent sur quatre problématiques, étudiées séparément ou en essayant de mesurer l'effet combiné du choix des modalités de chacune sur la performance de l'entrepôt. A savoir, l'organisation interne de l'entrepôt, la politique de rangement, la politique de picking et la politique de groupage des commandes ou batching.

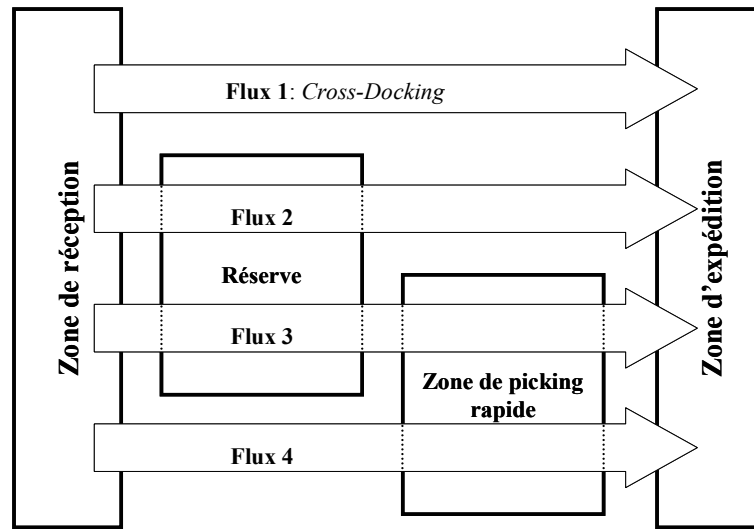


FIGURE 1.3 – Zones et flux dans une plateforme

Dans cette thèse nous abordons seulement les problèmes de planification et d’ordonnancement des plateformes logistiques. C’est pourquoi dans ce qui suit nous parlons des aspects moyen et court terme des problématiques présentes dans les entrepôts. Nous envoyons le lecteur vers Van Den Berg [148], et Mocellin [107] pour une description complète de la problématique des entrepôts et pour avoir plus de détail sur la prise des décisions stratégiques.

Organisation interne des entrepôts

L’organisation interne des plateformes logistiques est déterminée par ses zones fonctionnelles et les interactions entre ces zones. Ces interactions sont représentées par des flux de produits dans l’entrepôt. Bien que le choix de l’organisation interne soit une décision stratégique, nous introduisons les principaux flux et zones de stockage que l’on peut retrouver dans les entrepôts car les autres problématiques dépendent fortement de la configuration physique choisie.

Selon la structure de la plateforme, plusieurs types de flux et zones fonctionnelles peuvent exister au sein d’une plateforme logistique, voir Heragu *et al.* [83]. En général, nous pouvons distinguer cinq zones et quatre types de flux (Figure 1.3). Dans la zone de réception, les produits sont reçus et mis dans le quai de déchargement. La zone de transit, aussi appelé zone de “*cross-docking*”, permet de transférer les produits depuis la zone de réception vers la zone d’expédition directement. La réserve est une zone de stockage pour des produits, emballés ou pas, qui resteront dans l’entrepôt pour une longue période. La zone de picking rapide est réservée au stockage de produits qui doivent être expédiés rapidement ; cette zone a une capacité assez limitée et généralement contient les produits les plus courants. Finalement, derrière la zone d’expédition on trouve les quais de chargement.

Les flux décrits peuvent exister ou non dans les plateformes. Le flux 1, “cross-docking”, est utilisé quand les produits doivent traverser la plateforme directement de la zone de réception jusqu’à la zone d’expédition sans subir d’opération de conditionnement. Le flux 2 concerne les produits qui passent de la zone de réception à la réserve pour être livrés au delà de l’horizon considéré. Quant au flux 3, les produits sont d’abord stockés dans la réserve et par la suite transférés (avec ou sans conditionnement) à la zone de picking rapide. Finalement, le flux 4 est

une variante du flux 1 ; dans ce cas, les produits reçus vont directement à la zone de picking rapide pour des opérations d'assemblage et pour la consolidation de commandes.

Pour diminuer les coûts de manutention, il peut être intéressant de transformer du flux 3 en flux 4, mais les contraintes de stockage, de sécurité et d'organisation limitent l'ampleur de cette modification. Nos modèles doivent permettre d'étudier partiellement cette possibilité en particulier en ce qui concerne les contraintes de stockage.

Il existe des travaux dans la littérature qui étudient le problème d'organisation des plateformes logistiques, Heragu *et al.* [83] et Bartholdi et Gue [9] traitent des problèmes de dimensionnement et de structure physique optimales selon différents critères de performance.

Allocation des produits aux zones de stockage

Cette problématique concerne l'organisation des biens dans les zones de stockage pour atteindre une occupation optimale de l'espace et faciliter la manipulation des outils, des produits et des ressources matérielles. Les critères d'organisation des stocks peuvent être physiques ou peuvent aussi prendre en compte des facilités de gestion telles que l'emplacement des différentes zones de stockage, l'impact du placement des biens dans l'efficacité du picking, etc.

Van den Berg [147], De Koster *et al.* [49] distinguent différentes politiques d'affectation des produits aux zones de stockage : stockage basé sur la classification des produits, stockage aléatoire, stockage dédié, stockage dans le premier emplacement vide et stockage selon le niveau de demande. Nous ne donnons pas plus de détail sur ces politiques car ce problème ne constitue pas le cœur de notre recherche. Heragu *et al.* [83] proposent une approche d'optimisation pour ce problème. Les auteurs étudient le problème d'allocation des produits aux zones fonctionnelles tout en minimisant le temps de traitement des produits et un coût qui dépend des flux suivis par les produits. Dans Strack et Pochet [142], les auteurs intègrent la prise de décisions concernant l'allocation des produits aux différentes zones et le choix des politiques de réapprovisionnement, les auteurs font une revue des travaux récents sur l'allocation des produits aux zones de stockage.

Picking et batching

Le picking, se trouve au cœur du fonctionnement d'un entrepôt. Des études ont montré que le coût lié au picking peut atteindre jusqu'à 50% du coût total de gestion des entrepôts. Aussi est-il important de réduire ce coût.

D'un point de vue tactique les décisions consistent à constituer des regroupements astucieux de commandes et à planifier les tournées de picking avec l'objectif de minimiser les trajets à vide (c'est-à-dire les distances inutiles franchies par le préparateur de commandes lors de ses tournées de picking). Pendant les dernières années, et dans le but d'être plus réactif vis-à-vis des consommateurs, les entreprises ont adopté une stratégie où l'on reporte, au plus tard dans la chaîne logistique, des activités qui donnent de la valeur ajoutée ou qui personnalisent les produits. Par rapport à cela, les entrepôts et centres de distribution se voient chargés des tâches d'étiquetage, d'assemblage de produits, de personnalisation de paquets ou de constitution de palettes. En pratique, ces tâches sont intégrées aux processus de planification et d'ordonnement du picking (Van Hoek [150]).

Il existe plusieurs méthodes pour faire le picking et le choix d'une d'entre elles est une décision tactique. L'efficacité du picking est étroitement liée à la *planification des tournées de picking*. Le problème de planification des tournées de picking peut être assimilé au problème de voyageur de commerce avec certaines spécificités. L'objectif reste celui de trouver le chemin le plus court qui permettra au préparateur d'extraire du stock tous les produits demandés, sauf qu'il peut passer plusieurs fois par le même endroit. Plusieurs approches ont été proposées pour traiter ce

problème : des méthodes exactes aboutissant à une solution optimale ainsi que des méthodes approchées beaucoup plus simples à implémenter et largement utilisées. Les systèmes spécialisés dans la gestion des entrepôts utilisent généralement des heuristiques simples.

Ratliff et Rosenthal [124] et De Koster *et al.* [49] proposent des algorithmes permettant de résoudre le problème de tournées de picking de façon optimale pour des entrepôts ayant des caractéristiques bien précises. Les algorithmes dépendent fortement de l'agencement de l'entrepôt, s'il y a des allées transversales, si les allées sont étroites ou larges par exemple.

Les heuristiques sont d'usage courant dans la planification des tournées de picking. A titre d'exemple, la plus simple des heuristiques est la politique de traversée : toute allée contenant au moins un produit de la commande doit être traversée entièrement. Nous pouvons citer encore les politiques de demi tour, de point intermédiaire, le plus grand vide, etc. Les heuristiques étant très nombreuses, nous n'allons pas faire ici une présentation exhaustive. Le lecteur intéressé peut se référer à Roodbergen et De Koster [126] et De Koster *et al.* [49] pour une description détaillée.

Le *batching* (ou *regroupement*) des commandes est une méthode où l'on regroupe des commandes, relativement petites, dans un certain nombre de sous-ensembles, chaque sous-ensemble sera par la suite préparé dans la même tournée. C'est-à-dire que les activités de picking, tri, emballage et expédition se font en même temps pour toutes les commandes d'un même batch. Le gain de temps potentiel du batching n'est pas négligeable puisque cette solution minimise le temps moyen de préparation par commande, mais il peut être augmenté par le tri qui doit s'effectuer à la fin de la préparation d'un batch. L'opération de tri consiste à trier les produits par commandes quand plusieurs commandes sont collectées ensemble. Gademmann *et al.* [61] ont démontré que le problème de minimisation des délais du picking est NP-difficile. De même Gademman et Van de Velde [60] montrent que le problème de batching supposant connu le temps total du picking minimal pour tout batch est NP-difficile au sens fort quand le nombre de commandes par batch est plus grand que deux.

Il existe plusieurs politiques pour faire le batching dans les entrepôts. Le lecteur intéressé peut se référer à Le Duc et De Koster [95] pour la présentation et l'évaluation de quelques unes des politiques de batching. Par ailleurs, le batching étant un problème difficile, il n'est pas rare de trouver dans la littérature de nombreux articles qui développent des méthodes heuristiques pour le résoudre. Dans l'état de l'art proposé par De Koster *et al.* [49], plusieurs types d'heuristiques sont identifiés, elles sont basées sur des techniques de tournées de véhicule où l'on cherche à minimiser les distances ou le temps de parcours. Une évaluation des performances de deux de ces heuristiques est donnée dans De Koster *et al.* [50].

Pour plus d'information sur le picking et le batching, De Koster *et al.* [49] font une revue des travaux sur le développement et le contrôle du processus de picking manuel. Les auteurs analysent le problème dès la prise des décisions stratégiques jusqu'à la prise des décisions opérationnelles : choix optimal d'agencement, méthodes d'allocation des produits aux zones, techniques de routage, batching et tri. De même, Petersen et Aase [117] évaluent simultanément par une méthode de simulation plusieurs politiques de picking, tournées et allocation de stockage. Leur objectif est de déterminer quelle combinaison de politiques a le plus grand effet dans la performance du système.

Quelles que soient les techniques de routing ou de batching choisies, il faut qu'elles ne soient pas très compliquées à mettre en œuvre. Notamment, les méthodes de résolution exactes fournissent assez souvent des résultats qui ne sont pas facilement interprétables par les employés de la plateforme. Dans ce cas, les erreurs des employés sont nombreuses car la logique des tournées leur échappe et ils préfèrent agir à leur façon quand ils ne comprennent pas.

L'outil le plus utilisé dans les études des entrepôts, pour les problèmes que nous venons de décrire, est la simulation. C'est un élément puissant, car il permet d'évaluer les performances sans changer effectivement les agencements ou politiques, voir Petersen et Aase [117], Ascheuer *et al.* [3]. On trouve des méthodes exactes pour la résolution de petites instances pour le batching Gademann *et al.* [61] et Gademann et Van de Velde [60] mais, en général, on voit que l'utilisation des méthodes heuristiques pour le picking est une pratique répandue.

Autres problèmes tactiques et opérationnels

Récemment, Gu *et al.* [72], Rouwenhorst *et al.* [127] et van den Berg [147] ont présenté des revues des études sur les problèmes de planification et d'ordonnancement rencontrés dans les entrepôts. Parmi les problèmes que les auteurs identifient on trouve : la gestion de stocks, l'ordonnancement des opérations de la plateforme (autres que le picking), et la conception du système de distribution.

Le problème de *gestion des stocks* dans les plateformes logistiques consiste à définir quels produits sont à stocker dans l'entrepôt et en quelles quantités. Van den Berg et Zijm [149] indiquent que la plupart des modèles de la littérature, concernant la gestion des stocks, ont comme objectif la réduction des niveaux de stock. En général, la réduction des stocks se fait en ordonnant soigneusement les livraisons des fournisseurs et des clients, en réduisant les quantités des commandes ou en faisant les livraisons plus souvent. Les modèles classiques de gestion de stocks déterminent des politiques pour un seul produit, en général avec une demande constante mais, assez souvent, avec des capacités de stockage limitées.

En ce qui concerne l'optimisation de processus des plateformes logistiques et notamment *l'ordonnancement des opérations*, nous trouvons beaucoup de travaux sur l'étude des flux de produits qui traversent la plateforme aux différentes phases : la réception, le stockage, le picking et l'expédition. Ici, les décisions de base consistent à déterminer les flux internes à la plateforme, l'utilisation des ressources internes en connaissant les dates et les quantités des livraisons entrantes et sortantes avec des contraintes de ressources, temps, débit, rendements, etc. Nous avons déjà fait une analyse sur les processus de stockage et de picking, maintenant nous abordons les processus de réception et d'expédition. Dans la littérature, la recherche sur le processus de réception et d'expédition est très réduite et elle s'est surtout concentrée sur l'affectation et le séquençement des camions aux quais et des quais aux destinations (Baptiste et Maknoon [7], Yu et Egbelu [159], Boysen *et al.* [19]).

On retrouve aussi des travaux sur l'ordonnancement des activités de déchargement et de transbordement dans les plateformes qui font du cross-docking, et qui minimisent les coûts opérationnels et de stockage intermédiaire (Koné [90], Yu [158], Larbi *et al.* [91], Song et Chen [137], Larbi *et al.* [92], Sadykov [128]), ou la durée totale de l'ordonnancement (Chen et Lee [37] démontrent que ce problème est NP-difficile), ou encore la somme des pénalités de retard (Chen *et al.* [38]). Les travaux d'ordonnancement se centrent sur ce type de plateformes car les activités des plateformes qui pratiquent le cross-docking sont les plus simples à modéliser car elles ne sont pas associées au picking et au stockage. Par ailleurs, l'intérêt du cross-docking est de plus en plus grand car il permet de réduire les coûts de stockage. Il existe tout de même des travaux où l'on traite des activités externes (notamment le transport) aux plateformes qui pratiquent le cross-docking ; ces travaux consistent principalement à minimiser des coûts de transport, du nombre de camions nécessaires et de la planification de leur trajet (Lee *et al.* [96], Chen *et al.* [38]).

Dans la littérature, nous trouvons des études de systèmes qui incluent des entrepôts. Ces systèmes sont, la plupart du temps, de type fournisseurs-entrepôts-magasins et les études se concentrent sur les décisions de distribution et de stockage qui, dans ce cas, sont prises ensemble (un exemple de coordination). Il s'agit d'un problème de coordination entre l'entrepôt et ses partenaires en amont et en aval. Dans les *systèmes de distribution* à plusieurs étages, on peut toujours trouver des moyens de réduire les coûts et d'améliorer l'efficacité, d'où l'intérêt d'étudier les différents systèmes ensemble. Nous donnons par la suite quelques exemples des problèmes de coordination qui incluent des plateformes logistiques.

Chandra [33], par exemple, développe un modèle intégré à deux étages (entrepôt-détaillants) qui détermine les politiques de réapprovisionnement (gestion des stocks) d'un entrepôt en supposant que celui-ci est aussi responsable de fournir des programmes efficaces de distribution des biens aux clients. Le problème consiste à déterminer la politique de réapprovisionnement et le calcul de tournées de distribution (deux problèmes NP-difficiles) simultanément dans le but de minimiser les coûts de distribution et de stockage.

Viswanathan et Mathur [151] traitent, pour leur part, un problème similaire de prise de décision intégré de tournées de véhicule et de politique de stockage. Il s'agit d'un mécanisme de coordination entre l'entrepôt et ses clients directs, les détaillants. Ici, les auteurs déterminent les quantités à livrer (à des instants fixés par un planning prévisionnel) à chaque tournée et les tournées de véhicule pour satisfaire une demande connue. L'entrepôt joue le rôle de point de transbordement et ne garde pas de stock, le stock est ainsi cumulé chez les clients. L'objectif est de minimiser les coûts de stockage chez les clients et les coûts de transport. Les auteurs utilisent des méthodes heuristiques pour résoudre le problème.

Ganeshan [63] présente une politique de gestion de stocks pour une chaîne logistique à trois étages (fournisseurs, entrepôt, détaillants). Il considère un environnement mono produit, avec une demande et des temps de transport stochastiques, et où il y a plusieurs entités qui peuvent fournir un même client et où aucun centre de production n'est considéré. L'objectif est de minimiser le coût de stockage, le modèle est basé sur les interactions entre le cycle des fournisseurs et les demandes des clients. Le modèle est testé par simulation et l'auteur a pu constater que les retards des commandes étaient réduits. L'auteur assure que les résultats obtenus avec le modèle peuvent servir de base pour déterminer les stocks de sécurité et les stocks en déplacement par la suite.

Voir aussi les travaux de Lim *et al.* [100], Sindhuchao *et al.* [135], Cagri *et al.* [24], Che et Leon [36] pour d'autres mécanismes de coordination et méthodes de résolution, et Williams et Tokar [153] pour une revue des travaux sur la gestion des stocks et des modèles coopératifs.

Pour notre part, dans notre travail sur les plateformes logistiques, au niveau tactique nous nous concentrons sur la partie de coordination entre les entrepôts et ses partenaires pour ce qui est de la gestion des stocks, et de la planification des opérations et de la main d'œuvre à l'intérieur de la plateforme pour ce qui est la réception, le stockage, et l'expédition (chapitre 2); au niveau opérationnel nous travaillons sur l'ordonnancement des activités de préparation de commandes (chapitre 3).

1.2 Outils d'aide à la décision

La gestion de la chaîne logistique et notamment la gestion de la production manipulent énormément de données et sont étroitement liées aux systèmes d'information des entreprises. Depuis

l'identification de ces problématiques, des logiciels informatiques, pour fournir de l'assistance aux managers, sont apparus. Cette assistance se manifeste par l'utilisation d'outils d'aide à la décision, lesquels, en général, se concentrent sur des fonctions bien précises de la gestion de la chaîne logistique : gestion des matières premières, gestion des moyens de production, gestion administrative de la production.

Les décideurs veulent des outils d'aide à la décision qui fournissent des solutions réalisables. La complexité des chaînes logistiques induit de nombreuses contraintes et la combinatoire des problèmes à résoudre est souvent très grande, d'où la difficulté de trouver des méthodes satisfaisantes quant au temps de calcul et à la qualité des solutions obtenues. Par ailleurs, les particularités associées à chaque domaine industriel font qu'il est pratiquement impossible de créer des outils assez génériques pour pouvoir répondre aux besoins décisionnels de chaque domaine. C'est pour cette raison que le plus souvent les outils d'aide à la décision sont dédiés à un certain domaine d'application. Un élément clé est à la base de la conception de ces outils, la modélisation de la dynamique de la structure de la chaîne sur laquelle les logiciels agissent.

Dans cette section nous commençons par présenter rapidement les différentes manières de modéliser et d'évaluer les chaînes logistiques que l'on peut trouver dans la littérature. Ensuite, nous présentons les principaux systèmes d'information développés depuis l'identification du problème de la gestion de production. Enfin, nous décrivons les méthodes de résolution qui constituent la base des outils d'aide à la décision.

1.2.1 Modélisation et évaluation des chaînes logistiques

Modélisation

La modélisation est au cœur de la conception des outils d'aide à la décision. Un modèle n'est qu'une représentation externe et explicite d'une part de la réalité comme elle est perçue par les personnes qui souhaitent utiliser ce modèle pour comprendre, changer, gérer, et contrôler cette partie de la réalité d'une façon ou d'une autre (Pidd [118]).

La modélisation de la chaîne logistique peut prendre en compte les flux de matières et d'information, des règles de comportement, les particularités des données, etc. Beamon [10] classe les approches de modélisation de la chaîne logistique en quatre catégories selon le type de données et l'objectif de l'étude : modèles déterministes, modèles stochastiques, modèles économiques et modèles de simulation.

Les *modèles déterministes* ne font intervenir aucune variable aléatoire. Dans ce cas, les relations entre les variables sont strictement fonctionnelles. Ce type de modèle a l'avantage de permettre d'inclure des relations complexes, mais a aussi le désavantage de faire des hypothèses non réalistes quant à l'incertitude de certaines variables ou paramètres comme la demande ou le temps de transport, par exemple.

Les *modèles stochastiques*, au contraire, incluent au moins une variable aléatoire.

Les *modèles économiques* considèrent les entités du système comme des agents qui prennent des décisions dans le but d'optimiser un indicateur de performance économique. La modélisation de l'interaction vendeur-acheteur par la théorie des jeux est un exemple de modèle économique. Ce type de modèle est très limité car il ne prend pas en compte des mesures qui ne soient pas d'ordre financier.

Les *modèles de simulation* sont très répandus dans la modélisation des chaînes logistiques. Ces modèles essaient d'imiter le comportement des composants du système. Ils ont l'avantage de permettre aux décideurs d'explorer les conséquences possibles des actions sans avoir à les

exécuter en réalité, aussi ils peuvent capturer les incertitudes et traiter l'aspect dynamique des systèmes complexes et des systèmes à grandes échelles. (Taylor [144])

Taylor [144] identifie encore deux types de modèles : les modèles conceptuels et les modèles mathématiques. L'intersection entre ces deux types et ceux décrits avant n'est pas vide. Par exemple, beaucoup de modèles déterministes de la littérature sont aussi des modèles mathématiques.

Les *modèles conceptuels* sont les plus simples. Ils regroupent les éléments de base qui devraient être présents dans une situation idéale du système à modéliser, il peut s'agir de diagrammes ou d'explications verbales. Ces modèles servent de base pour débattre sur les différences entre le système tel qu'il est et ce qu'il serait dans une situation hypothétique. Ces modèles sont très difficiles à mettre en œuvre pour les systèmes complexes tels que les chaînes logistiques et leur utilité se limite à la compréhension du système modélisé.

Les *modèles mathématiques* pour leur part sont les plus utilisés dans la gestion des chaînes logistiques. Ils consistent à modéliser des contraintes et des mesures de performance par des équations. La programmation linéaire en nombres entiers (PLNE), introduite par Fisher [56], est la plus utilisée. L'inconvénient de ce type de modèles est que bien qu'ils représentent assez précisément la réalité ils font appel à des techniques de résolution complexes et induisent des temps de calcul importants pour des instances de taille réelle.

Evaluation

Toutes les études faites sur la gestion de la chaîne logistique et de la production n'auraient aucun intérêt si l'on ne pouvait pas évaluer l'impact qu'elle a sur l'efficacité du système. La première idée qui vient à l'esprit du manager est de mesurer cette influence d'un point de vue économique. Le problème qui survient avec ce type de mesure est que des économies peuvent se faire de plusieurs manières : une meilleure stratégie de distribution par exemple ou tout simplement une baisse de la qualité du service fourni. Avec cet exemple, on peut voir qu'il y a d'autres aspects à surveiller, c'est-à-dire, d'autres mesures à prendre. Dans ce cas, ce sera l'ensemble d'évaluations qui permettront de faire un diagnostic global de la gestion.

“Un indicateur de performance peut être défini comme une donnée quantifiée qui mesure l'efficacité de tout ou une partie d'un processus ou d'un système, par rapport à une norme, un plan ou un objectif qui aura été déterminé et accepté, dans le cadre d'une stratégie d'ensemble” (Courtois *et al.* [46]).

Gunasekaran et Kobu [73] présentent une revue des indicateurs de performances des niveaux stratégique, tactique et opérationnel d'une chaîne logistique. Dans leur recherche bibliographique, les auteurs ont trouvé à peu près 90 indicateurs de performance de la chaîne logistique ; après élimination des doublons ils n'ont retenu que 27 indicateurs (ceci révèle le besoin de standardisation des indicateurs de performance, ne serait-ce que pour avoir un langage commun entre partenaires) parmi lesquels on compte : utilisation de la capacité de production, précision de l'ordonnancement, fiabilité de livraison, coûts de stockage, satisfaction des employés, satisfaction du client, ... Un indicateur de performance peut donner des informations sur plusieurs aspects.

L'étude de Gunasekaran *et al.* indique que environ 38% des indicateurs de la littérature restent des indicateurs économiques, et cela malgré le fait que les indicateurs opérationnels soient tout

aussi importants pour vérifier la bonne santé du réseau. Des indicateurs de temps et de productivité concernent 40% des mesures prises. L'utilisation des ressources et la flexibilité concernent 35% et 27% des indicateurs respectivement ; les auteurs remarquent, cependant qu'il s'agit d'aspects très difficiles à mesurer mais qu'ils jouent un rôle très important dans la gestion. Les indicateurs concernant les performances de : la planification, les fournisseurs, la production, les livraisons et la satisfaction du client, constituent 50%, 15%, 35%, 12% et 27% des mesures prises respectivement. Les auteurs donnent aussi une classification des indicateurs selon le niveau temporel et l'étage considéré dans la chaîne logistique.

Nous renvoyons le lecteur intéressé vers Gunasekaran *et al.* [75] et Beamon [10] pour plus de détail sur les mesures quantitatives et qualitatives concernant les indicateurs d'évaluation de la performance de la planification de commandes, des fournisseurs, de la production, des livraisons, de la qualité de service, des coûts de la logistique.

1.2.2 Systèmes d'information

La gestion de la chaîne logistique consiste à intégrer les fonctions du réseau logistique et à coordonner les partenaires. Vue la complexité des tâches d'intégration et de coordination, les systèmes d'information, qui prennent en compte tous les paramètres qui interviennent dans le processus décisionnel, sont indispensables. C'est pourquoi des outils informatiques sont apparus pour gérer la chaîne logistique aux niveaux tactique et opérationnel dès l'identification de ces problématiques.

Les systèmes d'information concernés regroupent tout ce qui implique : la production, les stocks, le transport et l'entreposage, les moyens de production (machines, personnel), la qualité, etc. Pour que ces outils deviennent vraiment opérationnels et efficaces, il a été nécessaire de les intégrer dans des plateformes de communication et d'échange de données informatisées.

En général, ces outils informatiques considèrent la chaîne logistique comme un ensemble d'agents informatiques, où chacun est responsable d'une ou plusieurs activités de la gestion de la chaîne et où chaque agent interagit avec les autres dans la planification et l'exécution de leurs responsabilités. Fox *et al.* [58] présentent tout un cadre pour la construction de ce type de structures de gestion par agents. Les modules des outils d'aide à la décision sont implémentés de manière progressive et organisationnelle de façon à ce que les activités de l'entreprise puissent être suivies et contrôlées à plusieurs niveaux de granularité temporelle. De plus, les logiciels de gestion possèdent de plus en plus une intégration de fonctionnalités verticale, mais aussi horizontale par la prise en compte des contraintes multi-sites et des relations clients-fournisseurs.

Nous présentons ici les fonctionnalités de trois des familles de progiciels de gestion qui semblent être les plus répandus : les Entreprise Resource Planning (ERP), les Advanced Planning Systems (APS) et les Manufacturing Execution Systems (MES).

Entreprise Resource Planning

Ces progiciels de gestion sont destinés à la gestion globale des différents flux d'une entreprise aux trois niveaux temporels. Au départ les ERP ont été conçus pour le pilotage de la gestion de production dans les ateliers et les usines après l'apparition du MRP II. L'accroissement de la complexité des systèmes a fait que d'autres domaines de compétence ont été intégrés aux ERP : la gestion des stocks ; la gestion d'approvisionnement et des achats ; gestion commerciale ; gestion des ressources humaines ; gestion comptable et financière. Ainsi, les ERP permettent la hiérarchisation temporelle et conceptuelle des problématiques concernant la gestion de flux de tout type d'entreprise et pas seulement aux industries manufacturières.

L'ERP ajoute encore un degré de hiérarchisation en découpant l'entreprise en multiples entités, toutes dotées de leur propre système de gestion mais communiquant entre elles. Le principal avantage des ERP est qu'ils possèdent une unique base de données, cela facilite le partage d'informations entre les différentes entités et entre les niveaux opérationnel et tactique. En revanche, le champ d'action des ERP reste celui de la gestion d'une entreprise et ils ne peuvent pas gérer la totalité de la chaîne logistique. Cependant, les ERP favorisent l'intégration de la gestion de plusieurs entreprises qui ont leur propre système de gestion.

Les ERP sont basés sur le MRP I et le MRP II qui n'ont pas de bases théoriques d'optimisation, mais qui sont plutôt des méthodes de gestion ou de contrôle. De manière générale, les ERP prennent en charge la détermination des prévisions de vente et de production, l'équilibrage entre la charge et la capacité réelle de l'entreprise, la planification de la production, et l'ordonnancement et la gestion d'atelier.

Advanced Planning Systems

Les APS, comme les ERP, peuvent prendre en compte toutes les fonctions de gestion d'une entreprise : les achats, les approvisionnements, la production, le stockage, le transport et la distribution. La différence des APS par rapport aux ERP est que les APS utilisent les données des ERP (de demandes et de ressources) et offrent des réponses optimisées en temps réel. Ils sont capables, par exemple, de proposer un planning de production optimal selon la demande, la capacité des ressources et les contraintes de production.

Erschler et Grabot [54] définissent les APS comme des systèmes d'aide à la décision qui s'appuient sur des algorithmes puissants, capables d'apporter des propositions de solutions réalistes à des problèmes de planification et de programmation complexes. Dans l'objectif de rendre la chaîne logistique la plus réactive possible, les systèmes d'information doivent être capables de prendre en compte, en temps réel, la répercussion des contraintes de l'un des maillons sur les autres. C'est le cas des APS. En plus ils sont capables de connecter en temps réel l'opérationnel et la planification et de faire éventuellement la coordination entre ces deux niveaux.

A la différence des ERP, dans les APS aucune règle n'est définie *a priori*, toute la procédure est basée sur la prise de décisions. Pour prendre des décisions, l'homme modélise ses problèmes et cherche la meilleure solution par optimisation ou simulation. L'APS permet de modéliser des contraintes, d'exprimer des fonctions de coût et de chercher des valeurs des variables de décision qui optimisent ces critères. L'optimisation est faite grâce à des moteurs de résolution basés sur des techniques d'optimisation telles que la programmation linéaire par exemple.

Les APS peuvent être consacrés à quelques fonctions de la gestion des chaînes logistiques, nous pouvons identifier trois familles d'APS : logistique, transport avec gestion des entrepôts, ordonnancement, gestion de production.

Manufacturing Execution Systems

Les MES sont des systèmes d'aide à la décision qui agissent au niveau opérationnel de l'atelier de production. Etant donné que les contraintes associés à la production dépendent fortement du secteur industriel, les MES sont, en général, très spécialisés. D'un point de vue fonctionnel, ils sont en mesure de positionner dans le temps des opérations sur des ressources avec des contraintes. Autrement dit ils peuvent effectuer l'ordonnancement à capacité finie, la gestion des ressources de production, la traçabilité des produits, l'analyse des performances, la gestion du travail au sein de l'atelier, etc. La plupart des MES sont des systèmes d'optimisation qui assurent la continuité du flux logistique avec des plannings donnés en entrée.

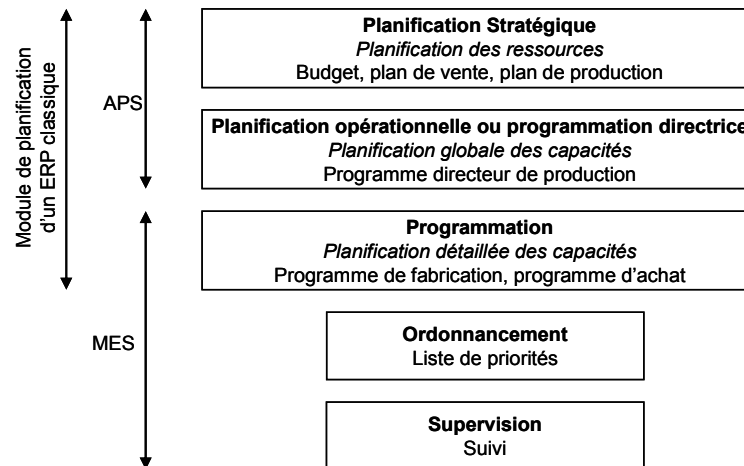


FIGURE 1.4 – Positionnement des outils (Erschler et Grabot [54])

La position par rapport à la hiérarchie fonctionnelle, des trois familles d'outils d'aide à la décision présentées ci-dessus, est donnée dans la Figure 1.4.

L'importance des outils d'aide à la décision est qu'ils permettent d'opérer simplement l'ensemble des fonctions d'une entreprise, et aussi ils offrent la capacité de gérer leurs problèmes et de prendre leurs propres décisions. En plus, ces outils permettent d'automatiser le processus de prise de décisions.

Notre travail se situe au niveau des APS pour la partie planification (Chapitre 2) et au niveau des MES pour la partie ordonnancement (Chapitre 3).

1.2.3 Méthodes de résolution

Dans cette partie nous nous intéressons aux méthodes utilisées dans la littérature pour résoudre les problèmes décisionnels des chaînes logistiques, et d'optimisation en général, et qui constituent le support théorique des outils d'aide à la décision que nous venons d'introduire. De manière générale, les approches d'aide à la décision peuvent faire appel à des techniques de simulation, de recherche opérationnelle, de théorie organisationnelle, ..., ou à des combinaisons de celles-ci. Pour notre part, ici nous nous concentrons sur les méthodes issues de la recherche opérationnelle pour la résolution de problèmes d'optimisation.

Résoudre un problème d'optimisation consiste à trouver, parmi un ensemble de solutions, celle qui minimise ou maximise un critère donné. Trouver la meilleure solution est le but des *méthodes exactes* comme les procédures par séparation et évaluation (PSE) ou la programmation dynamique. Malheureusement, dans le domaine d'application de la gestion des chaînes logistiques et notamment de la gestion de production, les problèmes sont NP-difficiles (pas d'algorithme de résolution polynomiaux si $P \neq NP$, Gary et Johnson [64]), la taille des problèmes industriels est importante et utilisent des variables de décision binaires ou entières (temps discrétisé, par exemple). En conséquence, l'exploration du grand nombre de solutions possibles pour extraire une solution optimale est impossible en des temps raisonnables. Ainsi, les méthodes exactes sont réservées à des problèmes de petite taille et ne sont donc pas adaptés à la résolution de

problèmes difficiles de taille industrielle. Néanmoins, les résolutions exactes peuvent être utilisées pour des sous-problèmes ou des problèmes simplifiés, par exemple, agrégation des données au moyen terme ou limitation de l'horizon considéré à court terme.

L'alternative pour ces problèmes de planification et d'ordonnancement de grande taille sont les *méthodes approchées*. Ces méthodes sont très utilisées dans le milieu industriel (souvent dans les progiciels d'ordonnancement) car elles fournissent généralement de bonnes solutions. Bien que la plupart du temps les solutions fournies ne soient pas optimales, les méthodes approchées sont conçues pour fournir un bon compromis entre la qualité d'une solution et son temps de calcul.

Dans cette partie, notre objectif n'est pas de faire une description exhaustive des méthodes de résolution de la littérature mais de citer les grandes familles. Nous reprenons ici la classification fournie par Portmann [121].

Familles de méthodes

Par la suite nous donnons une explication rapide des familles de méthodes de résolution et donnons, dans la mesure du possible, quelques exemples d'utilisation des méthodes dans les problèmes d'optimisation de la gestion des chaînes logistiques.

Programmation linéaire

La programmation linéaire est une formulation mathématique du problème d'optimisation où le critère et les contraintes sont des fonctions linéaires des variables du problème. Pour des variables entières, en absence de bonnes propriétés d'unimodularité, les problèmes associés aux modèles linéaires sont NP-difficiles. Néanmoins, grâce à l'expertise des chercheurs et à l'augmentation de la rapidité des ordinateurs, les progiciels commercialisés permettent actuellement de résoudre, de manière exacte, des problèmes de taille intéressante.

La programmation linéaire est la méthode la plus répandue (pour son adaptabilité) dans les problèmes de planification où les variantes les plus simples (en général les cas à un seul produit, avec capacité infinie, constante ou finie), mènent à des problèmes qui restent polynomiaux ou NP-difficiles au sens faible. C'est le cas du modèle proposé par Wirojanagud *et al.* [154] pour la planification de la main d'œuvre dans un centre de production. Cependant, pour certains problèmes il existe des contraintes (ou la fonction objectif) qui ne peuvent pas être linéarisées de manière satisfaisante (obtention d'un modèle de taille peu raisonnable). Dans ces cas, d'autres méthodes peuvent être élaborées pour la résolution des problèmes, des méthodes basées sur la relaxation lagrangienne ou des heuristiques de décomposition peuvent être appliquées.

Par contre, pour les problèmes d'ordonnancement, la programmation linéaire devient très vite inapplicable à cause des problèmes de taille car la combinatoire associée est beaucoup plus importante et alors les performances de la programmation linéaire se révèlent encore insuffisantes actuellement.

Méthodes par construction

Il s'agit de méthodes itératives qui consistent à construire une solution, en partant d'une solution vide, en appliquant certaines règles qui déterminent les choix, jusqu'à l'obtention d'une solution complète. C'est le cas des algorithmes de listes pour l'ordonnancement où l'on détermine un ordre au fur et à mesure que l'on parcourt une liste de jobs pré-ordonnée selon un certain critère.

Une méthode de construction est dite *gloutonne* si lors de la construction on ne remet pas en cause une décision prise, c'est le cas de l'algorithme d'ordonnancement NEH (Nawaz *et al.* [111]). Si on considère des heuristiques par construction *non gloutones* alors avec cette définition très

large les procédures par séparation et évaluation (PSE) et la programmation par contraintes (PPC) sont des méthodes par construction.

Pour les PSE, qui sont aussi des méthodes exactes, la solution est construite avec l'exploration d'un arbre de recherche dans lequel chaque nœud correspond à un sous-problème, et on a l'option de retourner en arrière lorsque l'on ne peut plus compléter la solution par des choix valides. Les procédures par séparation et évaluation sont utilisées dans la résolution exacte de problèmes où la combinatoire est importante comme les problèmes d'ordonnancement, un exemple est donné dans Baptiste *et al.* [6] pour l'ordonnancement juste-à-temps dans un jobshop. Nous faisons une présentation approfondie des procédures par séparation et évaluation dans la section 3.7 du chapitre 3.

Méthodes par décomposition

Ce type de méthodes consistent à diviser le problème initial en plusieurs sous-problèmes, qui, en pratique, sont plus simples à résoudre. Ensuite, les solutions des deux problèmes sont fusionnées pour obtenir une solution globale. Selon le type de décomposition du problème initial, cette combinaison de solutions peut être très compliquée à mettre en œuvre, on retrouve assez souvent des procédures itératives. Selon Portmann [120] cette décomposition peut être hiérarchique (par exemple la décomposition décisionnelle long, moyen et court terme de la gestion de la production), structurelle, spatiale, temporelle. Chandra [33] utilise une décomposition structurelle de deux problèmes difficiles pour déterminer les politiques de réapprovisionnement et de distribution ensemble.

Il est à noter que les procédures par séparation et évaluation, ainsi que la programmation dynamique sont également des méthodes par décomposition, décomposition de l'espace des solutions et/ou de l'espace des décisions. Cette classification, ne conduit donc pas à des sous-ensembles disjoints, mais permet de décrire les méthodes en utilisant les caractéristiques de chaque famille.

Méthodes par voisinage/recherche locale

Les méthodes de recherche locale sont des méthodes améliorantes. A partir d'une solution initiale, ces méthodes explorent les solutions "voisines" de la solution initiale jusqu'à ce qu'une condition d'arrêt soit satisfaite. Les définitions de voisinage et les techniques de choix d'une solution du voisinage sont très diverses, parmi les algorithmes de recherche locale on trouve l'algorithme de plus forte pente, la recherche tabou (Glover [68]), le recuit simulé, ...

Chen *et al.* [38] et Wan et Yen [152] présentent des exemples d'application de la recherche tabou sur des problèmes d'ordonnancement avec des fenêtres de temps. Heragu *et al.* [83] utilisent le recuit simulé pour un problème d'affectation de dimensionnement des zones de stockage et affectation de produits à ces zones.

Méthodes à base de populations

Comme pour le cas précédent, ces méthodes sont aussi des méthodes améliorantes. Dans ce cas, on commence par générer une population initiale de solutions, cette population évolue avec les itérations et les meilleurs éléments ont plus de chance d'être conservés, jusqu'à ce que la condition d'arrêt soit atteinte. L'exemple le plus connu de ce type de méthodes sont les algorithmes génétiques pour lesquels l'évolution de la population se fait par un opérateur de mutation et le croisement de solutions. Kim *et al.* [89] et Gen et Syarif [65] ont conçu des algorithmes génétiques pour résoudre des problèmes d'équilibrage de charge dans des lignes d'assemblage et pour la planification conjointe de la production et la distribution respectivement.

Comme on peut le voir, les champs d'application des différentes familles d'approches de

résolution est très vaste et pas exclusif, c'est pourquoi dans la littérature nous pouvons trouver des combinaisons d'algorithmes de ces familles, ces nouvelles procédures sont des méthodes hybrides qui ont souvent des performances meilleures que les méthodes simples.

En pratique, dans l'industrie l'utilisation des algorithmes développés par les chercheurs est très limitée. Notamment, dans la gestion de la production, l'utilisation de progiciels inclus dans les APS, les ERP est la plus répandue sans que l'on connaisse les qualités réelles des algorithmes internes, pour cause de confidentialité ; les recherches dans ce domaine se concentrent dans l'intégration d'approches de résolution plus efficaces aux logiciels déjà existants, c'est le but de la thèse de Robert [125]. Dans d'autres domaines d'application qui font appel aux mêmes techniques de résolution, des solveurs commercialisés sont de plus en plus utilisés. La résolution de programmes linéaires par ces progiciels (CPLEX de ILOG ou GLPK) est de plus en plus efficace, l'utilisation de méthodes hybrides (combinaison de PSE avec des méthodes de coupes, heuristiques, recherche locale) permet de rendre ces logiciels de plus en plus robustes. Pour les problèmes quelconques, la programmation par contraintes (PPC) est une méthode très répandue.

Dans cette thèse nous nous concentrons sur les approches de résolution exactes pour nos problèmes de planification et d'ordonnancement. Pour la planification, nous avons choisi la programmation linéaire et sa résolution avec un progiciel (CPLEX). Pour le problème d'ordonnancement notre choix a été une procédure par séparation et évaluation.

1.3 Positionnement du travail de la thèse et ses objectifs

L'environnement dans lequel nos travaux se situent est celui de la gestion des plateformes logistiques et des entrepôts, bien que la plupart de nos résultats soient généralisables à des environnements de production. Dans cette thèse, nous avons cherché à intégrer des particularités caractérisant le travail dans les plateformes et les entrepôts. Plus particulièrement nous nous concentrons sur les fonctions de distribution/organisation du travail et de préparation de commandes pour la résolution de problèmes de planification et d'ordonnancement respectivement.

Le type de produits utilisés par les plateformes de distribution et de préparation de commande que nous étudions sont des produits finis à durée de vie limitée, qui ont des délais de livraison dans des intervalles de temps limités dû au caractère saisonnier de la demande. Au niveau tactique (distribution/organisation du travail), le délai effectif de livraison peut encore résulter d'une ultime négociation sur un intervalle très limité entre la plateforme et ses partenaires en amont et en aval, tandis qu'au niveau opérationnel (préparation de commande), nous supposons que les délais sont déterminés par les priorités propres à chaque commande. Dans nos travaux, nous supposons que la demande est connue et est calculée dans les niveaux temporels supérieurs.

Dans nos travaux à moyen terme nous intégrons la plateforme logistique dans un système à trois étages fournisseur-plateforme-détaillants. Nous déterminons un planning des livraisons en amont et en aval en prenant en compte l'interaction de la plateforme avec ses partenaires. Nous déterminons également la planification du travail dans la plateforme en considérant les caractéristiques physiques, opérationnelles et techniques de la plateforme. L'une des particularités de notre plateforme est qu'il est possible de considérer des opérations de désassemblage et d'assemblage de produits, opérations pour lesquelles il est nécessaire de considérer des nomenclatures. Au niveau opérationnel, nous avons restreint les opérations de la plateforme à l'opération

d'assemblage que nous assimilons à la préparation de commandes, chaque commande utilise (consomme) des quantités connues des produits arrivant à la plateforme à des instants déterminés dans la phase de planification.

Par rapport au type de ressources considérées, en planification, la principale ressource de notre plateforme logistique est le personnel. Cette ressource, dans notre cas, est critiques. Nous acceptons des heures supplémentaires et du personnel intérimaire, nous prenons en compte leurs compétences.

En ordonnancement, nous supposons que les ressources humaines seront disponibles grâce à la planification de la plateforme. En outre, nous assimilons le travail de la plateforme au travail effectué par une machine (mais une légère extension nous permettrait de considérer des machines en parallèle). Nous résolvons un problème d'ordonnancement à une machine avec les caractéristiques des livraisons amont héritées du niveau planification de la plateforme logistique et avec différentes hypothèses pour les livraisons aval.

L'objectif général de cette thèse est de proposer des outils d'aide à la décision pour les problèmes à moyen et à court terme des plateformes logistiques qui ont les caractéristiques que nous venons d'introduire. De manière générale, dans ce chapitre nous avons fait une brève description du cadre dans lequel se place notre étude. En outre, nous avons pu mettre en évidence l'importance économique et stratégique des plateformes logistiques et des entrepôts dans les chaînes logistiques. Ainsi, l'étude de problèmes d'optimisation de ces structures est nécessaire.

Chapitre 2

Lissage de charge à moyen terme

Nous abordons dans ce chapitre le problème de planification de la production dans les plateformes logistiques. En particulier, nous étudions le lissage de charge dans les plateformes qui doivent satisfaire une demande saisonnière. Ce même problème peut être identifié dans des structures telles que les ateliers de production, pour cette raison nous avons essayé d'adopter une approche générique. La caractéristique principale de notre travail est de jouer, légèrement, sur la flexibilité donnée par la négociation des dates et des quantités des livraisons en amont et en aval de la plateforme de distribution avec comme objectif essentiel de réduire les coûts de main d'œuvre.

Le caractère moyen terme de cette problématique nous a conduit à proposer des modèles linéaires pour les différents types de négociations que nous envisageons comme recours possibles au problème de lissage de charge.

Dans ce chapitre, nous commençons par donner la description précise du problème industriel qui a motivé notre recherche et du problème de planification que nous étudions. Ensuite, nous analysons les travaux existant dans la littérature concernant les problèmes de lissage de charge dans la production incluant ou pas des contraintes de personnel et/ou qui font appel à des négociations, et nous positionnons notre problème par rapport à la littérature rapportée.

Enfin, nous décrivons les approches de modélisation et de résolution retenues pour notre problème et nous enchaînons avec la présentation des expérimentations et l'analyse des résultats.

Les travaux présentés dans ce chapitre ont fait l'objet de deux communications dans des conférences internationales Carrera *et al.* [29] et Carrera *et al.* [30].

Contents

2.1	Introduction	35
2.2	Motivation industrielle	36
2.3	Etat de l'art	38
2.3.1	Gestion de personnel	39
2.4	Formalisation du problème et hypothèses spécifiques	41
2.5	Modèles Linéaires proposés	42
2.5.1	Eléments du modèle	42
2.5.2	Modèle avec les négociations des dates de livraison	46
2.5.3	Modèle avec négociations des délais et des quantités	53
2.6	Expérimentations et Résultats	55
2.6.1	Agencements de plateforme testés	55
2.6.2	Mise en œuvre et données utilisées	57
2.6.3	Expériences numériques	60

2.6.4	Résultats obtenus avec les négociations des délais	61
2.6.5	Résultats obtenus avec les négociations des délais et des quantités . . .	69
2.7	Conclusion du chapitre	75

2.1 Introduction

Dans n'importe quelle industrie, déterminer de manière précise la capacité de production n'est pas un problème facile. Puisque notre étude se place dans un contexte où la demande est saisonnière, on peut se demander si la détermination de la capacité de production doit être basée sur la demande que le centre de production affronte pendant les périodes de pointe. Si oui, ceci impliquerait que la plupart du temps, le fabricant a des ressources chères inactives. Ou alors, la capacité de production doit se baser sur la demande moyenne, auquel cas il y a besoin d'une capacité supplémentaire, et chère, pendant les périodes de pointe, Simchi *et al.* [134]. Le même problème se présente lorsqu'on veut planifier la capacité de transport ou la capacité de stockage, par exemple.

Chopra et Meindl [43] identifient plusieurs mécanismes pour assurer la satisfaction de la demande pendant les périodes de pointe. Ces mécanismes touchent aux domaines de la gestion de la capacité de production et de la gestion des stocks. Les auteurs proposent de :

- Jouer sur la flexibilité temporelle de la main d'œuvre, en ayant des horaires de travail particuliers (3×8) ou des heures supplémentaires par exemple ;
- Utiliser de la main d'œuvre temporelle, laquelle est, en général, embauchée pendant toute la période de pointe ;
- Sous-traiter la production excédante ;
- Avoir des centres de production spécialisés et d'autres flexibles. Les centres de production spécialisés produisent de manière efficace des quantités stables, d'une gamme limitée de produits, à tout instant. Les centres flexibles peuvent produire des volumes variables et une variété plus grande de produits à un coût plus élevé. Ainsi les fluctuations sont absorbées par les installations flexibles ;
- Avoir des lignes de production flexibles avec des taux de production qui peuvent varier facilement. La production est ainsi changée pour satisfaire la demande. Les lignes de production sont conçues pour que le fait de changer le nombre de ressources allouées à une ligne varie significativement le taux de production. Cette approche ne marche que si la variation de la demande, sur les différentes lignes de production, est complémentaire (la demande augmente pour certains produits et diminue pour d'autres) pour ne pas avoir à augmenter les ressources ; une autre condition est que les ressources s'adaptent facilement aux lignes de production ;
- Avoir des stocks de produits très demandés et d'autres de demande prévisible. Les produits de demande prévisible doivent être produits avant la période de pointe, ainsi, la plus grande partie de la capacité de production sera réservée pour la production des produits très demandés.

Dans tous les cas, la coordination entre la production et la distribution est nécessaire (Chen et Pundoor [41]). Les procédures décrites pour faire face à la demande peuvent aussi être appliquées au contexte des plateformes logistiques. L'approche adoptée par les plateformes logistiques que nous étudions est celle de l'utilisation de la flexibilité de la main d'œuvre et du personnel intérimaire. Cette dernière, en particulier, est une pratique qui coûte très chère, d'où l'intérêt de la réduire le plus possible. Le problème que nous étudions dans ce chapitre est celui du lissage de charge pendant les périodes de pointe pour minimiser les coûts de personnel.

L'objectif de ce chapitre est de proposer une approche d'aide à la décision basée sur des méthodes d'optimisation et de recherche opérationnelle pour le lissage de charge dans les plateformes logistiques dans le but de réduire les coûts de main d'œuvre supplémentaire engagés. Les

moyens que nous utilisons pour lisser la charge sont les négociations des flux avec les partenaires en amont et en aval de la plateforme et l'étude de la structure physique des zones de stockage. Les négociations concernent les dates de livraison et les quantités effectivement livrées à chaque tournée des fournisseurs et des clients (magasins). Notre travail analyse des contraintes réalistes qui ne sont pas souvent considérées dans la littérature concernant les plateformes logistiques.

Note : Par analogie aux plateformes logistiques, le problème que nous traitons correspond au problème de planification dans les ateliers de production. Ce dernier est pris en charge par les logiciels de MRP (MRP3 pour la prise en compte des contraintes de capacité). La grande différence entre la planification en atelier ou dans une plateforme logistique se situe au niveau des ressources. En effet, MRP gère principalement les ressources matérielles (machines) alors que dans une plateforme logistique (surtout dans les moins automatisées d'entre elles) la ressource essentielle est la ressource humaine.

Nous proposons un modèle de programmation linéaire en nombres entiers, le plus général possible, pour le lissage de charge des plateformes logistiques et la planification de la main d'oeuvre. Dans le cadre des chaînes logistiques en général, nous modélisons plusieurs types de négociations avec les partenaires en amont et en aval. On peut utiliser du personnel intérimaire et on dispose d'un nombre limité d'heures supplémentaires pour chaque catégorie de personnel. Dans ce modèle, nous considérons quelques-unes des fonctions les plus importantes d'un entrepôt, telles que la prise en compte de nomenclatures pour ce qui concerne l'assemblage et le désassemblage de produits. L'analyse expérimentale de plusieurs agencements physiques de plateforme, complétée par des organisations différentes des flux et du travail, nous permet de comparer les agencements de plateforme et de montrer l'importance des négociations.

La suite de ce chapitre est organisée comme suit : dans 2.2 nous présentons le cadre industriel de nos recherches. Dans 2.3, nous analysons l'état de l'art concernant les différents aspects de notre problème. En suite, dans 2.4, nous détaillons le problème étudié ainsi que les contraintes industrielles qui peuvent être intégrées à la problématique de lissage de charge et les critères considérés ; puis, dans 2.5 nous décrivons les modèles de programmation linéaire qui ont été conçus. Dans 2.6, les modèles proposés sont testés sur une variété de structures de plateforme, aussi ces modèles sont testés avec des données générées aléatoirement, les résultats sont présentés et commentés. Enfin, la section 2.7 donne la conclusion du chapitre.

2.2 Motivation industrielle

Dans le cadre de contacts entre l'équipe Orchids et des entreprises gérant des plateformes logistiques, plusieurs problèmes reviennent de façon récurrente et, en particulier, les problèmes de lissage de la charge de ces plateformes. En effet, les entreprises perdent de l'argent car il y a des périodes de l'année où la charge de travail augmente et où elles sont obligées de recruter du personnel intérimaire, alors qu'à d'autres périodes leur personnel est sous-employé.

Plusieurs mécanismes d'action peuvent être identifiés pour pallier à ce problème de lissage de charge : négociations de contrats avec les clients et les fournisseurs, règles de fonctionnement régissant les flux amont et aval ainsi qu'une meilleure organisation interne de la plateforme (agencement, organisation des activités, affectation optimale des produits aux emplacements de stockage).

En particulier, le problème de lissage de charge nous a été inspiré suite à un audit d'un cas industriel qui est celui de l'entreprise de distribution de chaussures, que nous appelons dans cette thèse SAVAT. Nous présentons dans ce qui suit notre cas de référence, les problèmes rencontrés

par cette entreprise et l'approche que nous proposons pour la résolution de ce problème. Une approche qui se veut générique et qui permettrait de traiter ce type de problèmes sur d'autres cas de plateformes logistiques et de certaines structures de production comme les ateliers.

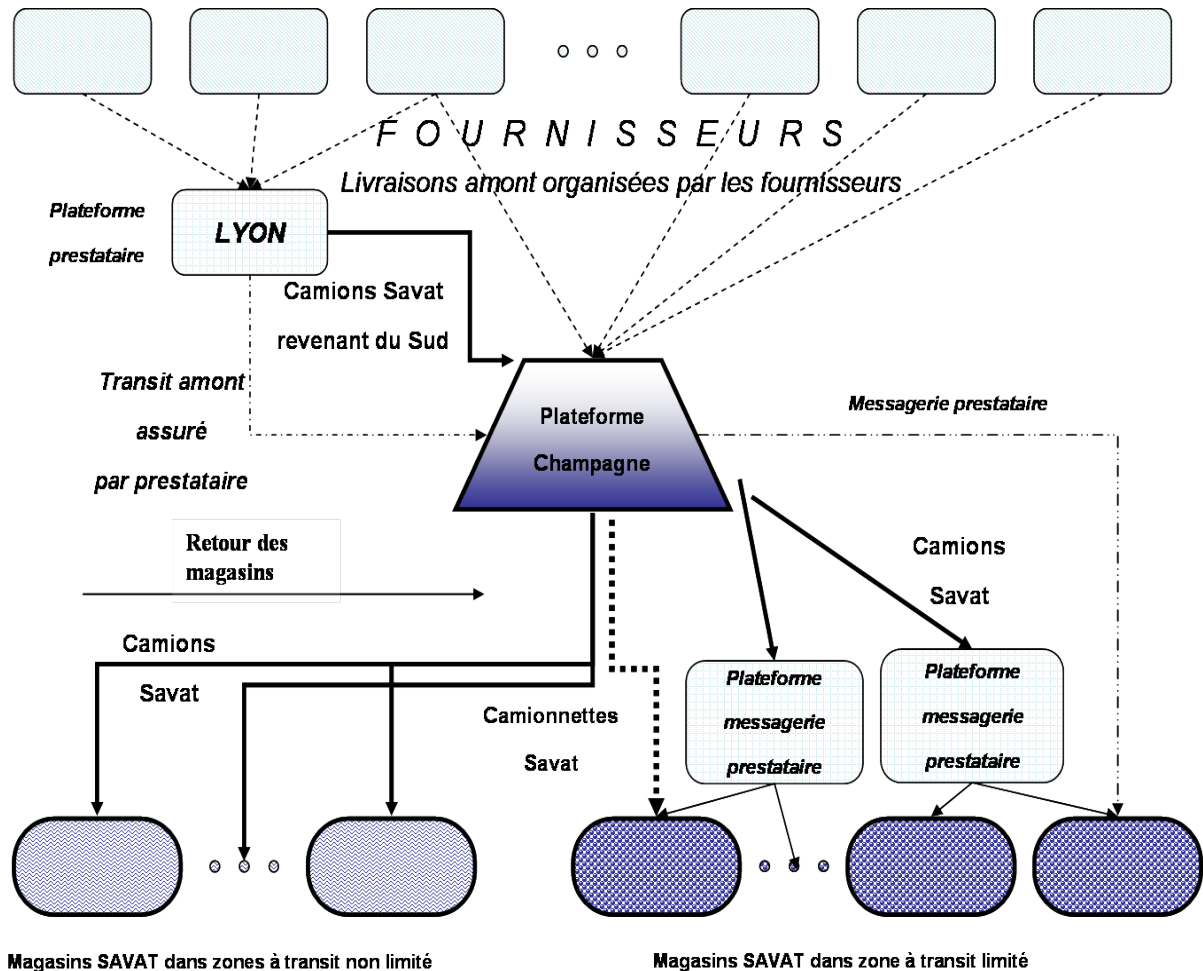


FIGURE 2.1 – Plateforme du problème industriel

L'entreprise SAVAT a été créée en Lorraine en 1936. C'est une entreprise de distribution, sans fabrication. Elle possède ou gère environ 100 magasins en France, une flotte de véhicules et possède une plateforme logistique en Champagne. Son chiffre d'affaires est de 60 millions d'euros par an pour environ 2 millions de paires de chaussures vendues.

L'entrepôt en Champagne joue le rôle d'intermédiaire entre les fournisseurs et les magasins (les clients), mais aussi entre les magasins eux-mêmes.

Si on observe la charge de la plateforme, deux fois par an il y a des pics de charge dus au début de saison printemps/été et automne/hiver. Les magasins reçoivent une première livraison avec les nouveaux produits de saison. Plus tard, pour réapprovisionner des pointures manquantes (réassortiment), les magasins peuvent demander des livraisons complémentaires à la plateforme ou aux autres magasins. Pendant plusieurs semaines, correspondant aux premières livraisons, la plateforme subit une charge importante de travail, l'entreprise se voit contrainte de recruter du

personnel intérimaire, ce qui augmente ses coûts opérationnels.

Le schéma des flux externes à la plateforme est présenté dans la figure 2.1. La structure des flux à l'intérieur de l'entrepôt, en début d'étude, est la suivante. Les livraisons fournisseurs arrivent dans des camions, qui sont déchargés et les produits déposés dans la zone de réception. Les produits sont ensuite transférés vers les tables de déballage où ils sont déballés (l'opération de déballage comprend aussi une vérification). Des caristes mettent ensuite les produits en rayon, à l'endroit qui leur est dédié, 20% des produits sont stockés pour une période plus longue que le pic de charge considéré et 80% repartent des rayons pour être envoyés aux magasins (qui sont les clients de la plateforme). Le picking consiste à prélever les produits du stock (les rayons) afin de constituer les commandes clients, et lorsque le picking est concentré sur certains rayons ou certaines étagères, le packing (dénomination propre à l'entreprise) intervient pour diminuer les vides entre les boîtes et réduire ainsi le temps de travail des agents de picking. Enfin, les produits sont déposés dans la zone de chargement où ils sont chargés dans les camions pour les livrer aux clients.

Les quantités et les dates des livraisons des fournisseurs sont négociées avec eux dans un niveau de granularité plus grand, ces livraisons peuvent éventuellement être modifiées dans la pratique selon les niveaux de tolérance des fournisseurs et des clients, et les besoins de la plateforme. Par ailleurs, cette entreprise supervise l'organisation des tournées de livraison vers les magasins.

L'objectif associé à cette problématique est de proposer un outil pour lisser la charge de la plateforme, de façon à minimiser les coûts de main d'œuvre et faire en sorte que le personnel permanent suffise à assurer le bon fonctionnement de celle-ci. Et ce en tenant compte de toutes les contraintes au niveaux des flux, des ressources et de la demande de la plateforme. L'outil d'aide à la décision peut aussi être utilisé pour comparer plusieurs agencements et organisations de travail de la plateforme, car l'audit a suggéré que d'autres agencements pourraient réduire le nombre de fois où un produit est manipulé pendant son passage par la plateforme.

2.3 Etat de l'art

La littérature concernée par notre problème de planification touche à différents sujets. D'abord à celui de l'optimisation des entrepôts que nous avons analysé lors de la présentation des entrepôts dans la section 1.1.3 du chapitre 1. Par ailleurs, nous nous sommes aussi intéressées aux mécanismes de coordination et aux types de négociations entre les entrepôts et leurs partenaires (section 1.1.3).

L'analyse faite sur l'optimisation des entrepôts nous a permis de constater que la plupart des travaux s'intéressent à la minimisation du débit de la plateforme selon sa structure et ses politiques de picking pour préparer les expéditions. Le problème de l'optimisation de la capacité de débit est très rarement considéré de façon globale. En effet, les articles traitent soit des politiques de picking ou de rangement des produits ou encore de l'agencement de l'entrepôt, mais sans se préoccuper de l'interaction entre ces différents facteurs sauf dans quelques modèles de simulation. De plus les phénomènes étudiés sont dans la plupart des cas considérés comme stationnaires (auquel cas les négociations avec les partenaires en amont et en aval pour lisser la charge deviennent inutiles), et des contraintes telles que la date de livraison au plus tard "date due", ou encore les pénalités de retard de livraison d'une commande, ne sont que très rarement prises en considération alors que la réalité du marché imposerait le contraire.

Par ailleurs, la littérature concernant les problèmes de coordination incluant les entrepôts et les plateformes logistiques s'est concentrée en général sur le calcul de stratégies de réappro-

visionnement et la gestion des stocks au sein des chaînes logistiques à plusieurs étages de type : fournisseurs (ou producteurs)-entrepôts-détaillants. Les problèmes traités prennent surtout en compte des caractéristiques associées à la distribution comme les temps de transport, parfois des caractéristiques associées à la production comme le temps et la capacité de production, et considèrent la capacité de stockage. Les modèles proposés dans la littérature pour ce type de problème prennent rarement en compte l'organisation du travail dans les entrepôts, leur organisation physique et la gestion de leurs ressources.

2.3.1 Gestion de personnel

Les ressources humaines sont la principale ressource des plateformes logistiques que nous étudions ; en particulier, la conception d'outils de lissage de charge pour la minimisation des coûts associés au personnel est l'objectif des travaux de ce chapitre. Pour cette raison, dans cette partie, nous présentons quelques travaux qui montrent la façon dont les ressources humaines sont traitées dans la littérature ainsi que les différentes contraintes et modes de gestion qui sont souvent considérés.

Pour la gestion de personnel à court terme, Billionnet [13], par exemple, étudie un problème où l'on prend en compte les compétences des différents ouvriers qui sont classés en catégories (un ouvrier plus qualifié peut remplacer un ouvrier moins qualifié, mais pas l'inverse), et des contraintes sociales où chaque ouvrier doit avoir un nombre minimal de jours libres par semaine. L'auteur suppose que la charge de travail peut changer pendant l'horizon temporel considéré, le nombre de tâches à exécuter chaque jour est connu et est donné par la planification de la production prévisionnelle. L'auteur propose un modèle en nombres entiers pour ce problème où l'objectif est de minimiser le coût de personnel et de calculer l'ordonnancement qui satisfait les exigences de travail, un solveur de programmation linéaire est utilisé pour la résolution de ce problème. L'auteur propose quelques extensions à son modèle, le modèle peut être adapté pour minimiser aussi le nombre d'ouvriers qui doivent effectuer des tâches pour lesquelles ils ont une qualification supérieure à celle exigée, ou pour trouver un planning dans lequel les jours libres de chaque ouvrier soient consécutifs.

Seçkiner *et al.* [132] pour sa part, reprend le problème étudié par Billionnet et suppose que les ouvriers sont en travail posté (du type 3/8 ou autre organisation) et peuvent être affectés durant la même semaine à différents postes, que nous désignerons par la notation anglaise de "shift" car le mot "poste" a trop de significations en français. L'idée de ce article est d'utiliser des semaines de travail condensées pour réduire les coûts. Les entreprises peuvent adopter une variété de politiques d'ordonnancement flexible pour les heures de travail d'une journée ouvrable. L'auteur suppose qu'une semaine de travail condensée est une semaine qui a moins de jours ouvrables avec des journées de travail plus longues. Le fait d'avoir des shifts variables, peut permettre de réduire les coûts de personnel car les ouvriers peuvent travailler moins de jours par semaine mais plus de temps par jour ou vice-versa. Les résultats expérimentaux de ce travail nous permettent de constater que les coûts sont réduits par rapport à ceux trouvés lorsqu'on considère un seul shift (Hung [85], Narasimhan [110]), la raison est qu'on peut trouver une solution pour satisfaire la demande avec moins de personnel.

Le problème d'embaucher du personnel pour des périodes indéterminées est abordé dans Wirojanagud *et al.* [154]. Ici les auteurs considèrent un atelier avec différents groupes de machines, où chaque ouvrier possède au moins un domaine de compétences et où ils peuvent être formés pour utiliser d'autres machines. L'objectif de cet article est de calculer combien d'ouvriers faut-il embaucher, former et licencier à chaque période pour satisfaire une demande donnée. Les

auteurs proposent un modèle en nombres entiers dont l'objectif est de minimiser les coûts de personnel sur l'ensemble des périodes. La résolution du modèle linéaire n'est pas envisageable sur des données de taille réelle, en conséquence, une méthode de décomposition d'ensembles de compétences est proposée.

Franchini *et al.* [59] expliquent que, dans le milieu industriel, la charge par groupe de compétences est calculée selon l'ordonnancement des ressources techniques (ressources critiques). Le problème traité est d'affecter les ressources humaines tout en respectant les exigences de compétences par période et les contraintes propres aux ressources humaines. Pour ce faire, il faut prendre en compte le cadre légal de l'entreprise. En général, les approches de planification et d'allocation des ressources humaines sont basées sur un inventaire de compétences et sont résolus en utilisant une approche multi objectif et de la programmation sous contraintes. Les auteurs de ce travail proposent une revue des techniques de gestion des ressources humaines. Il faut considérer les exigences de travail, les règles sociales ou les règles de l'entreprise, les réglementations légales et opérationnelles, la disponibilité et les congés des employés. L'approche de cet article considère les ressources techniques comme critiques, la principale donnée d'entrée est l'ensemble des ordonnancements des ressources techniques, à partir desquels on calcule la charge par ressource et par période et la charge nécessaire par compétence. Selon les compétences des opérateurs, on les affecte (selon leurs disponibilités) aux ressources et on adapte leur charge selon les lois. L'objectif est de minimiser les coûts de personnel (ou le personnel externe). On considère que l'on peut lisser la charge du personnel pour que les conditions de travail soient plus agréables mais pas pour réduire les coûts.

De manière générale, les documents trouvés traitent la gestion de personnel comme un problème d'ordonnancement (ou de planification) avec l'ordonnancement (ou la planification) d'activités préfixé, c'est-à-dire que la planification et ordonnancement du personnel est traité comme un problème à part. De ce fait, le problème de planification et d'ordonnancement de personnel n'est pas souvent inclut dans des modèles de prise de décisions intégrés comme par exemple, la planification de la production et la gestion de personnel. Nous conseillons les travaux de Gresh *et al.* [71] et Ernst *et al.* [53], en particulier ce dernier pour un état de l'art de la littérature concernant la planification et l'ordonnancement de la main d'œuvre dans différents secteurs d'activité.

Dans ce chapitre nous proposons de lisser la charge dans les plateformes, pour cela nous utilisons les négociations avec les partenaires de l'entreprise situés en amont et en aval de la plateforme et nous prenons en compte les ressources humaines de la plateforme. A notre connaissance, ce problème est nouveau et n'a pas été considéré auparavant. Vu le caractère moyen terme des décisions, nous avons développé un modèle de programmation linéaire pour résoudre ce problème. Dans ce chapitre nous proposons un modèle le plus générique possible afin de pouvoir l'appliquer à différentes configurations de plateformes logistiques, et à différentes organisations de flux, tout en prenant en compte plusieurs types de négociations, dans le but de fournir une solution générique du lissage de charge.

2.4 Formalisation du problème et hypothèses spécifiques

L'horizon de temps que nous considérons correspond à l'une des deux périodes où un pic de charge est constaté, c'est-à-dire entre 6 et 8 semaines. L'objectif est de gérer toutes les livraisons pendant cet horizon et de trouver une planification prévisionnelle des ressources de la plateforme (ou d'un centre de production).

Les produits de notre application industrielle sont des chaussures, ce sont des produits semi-périssables, c'est-à-dire des produits à durée d'existence limitée avec une date limite de consommation, dans notre cas cette date limite est donnée par la saisonnalité des chaussures. Nous avons rencontré d'autres gestions de plateformes correspondant à des produits semi-périssables (produits froids ou congelés, brochures à distribuer) pour lesquels les modèles proposés ici pourraient être adaptés.

Quant aux livraisons, pour chaque magasin et pour chaque fournisseur, il pourrait y avoir plus d'une livraison planifiée sur l'horizon temporel. Pour notre problème industriel, les quantités et les dates de ces livraisons sont prévues en avance, dans le but de satisfaire tous les partenaires (fournisseurs, transporteurs, plateforme et magasins) aussi bien que possible après négociations. Notre outil d'aide à la décision a pour but d'aider les négociations pour réduire les coûts de personnel. Dans notre modèle, nous considérons que les quantités et les dates de livraison choisies, dans la phase de planification préliminaire avant l'utilisation de notre outil d'aide à la décision, constituent des dates idéales pour l'ensemble des partenaires, mais pas pour les plateformes. Nous supposons que les fournisseurs et les clients autorisent des avances et des retards limités pour les livraisons (par rapport à la position idéale et par rapport aux dates limites de consommation des produits transportés), ce qui donne une légère flexibilité à la planification de la main d'oeuvre de la plateforme.

Les avances et les retards, par rapport à la date idéale, pénalisent les fournisseurs car ils doivent modifier leurs propres productions, et aussi les magasins car ils pourraient perdre des ventes. Dans notre modèle, ces pénalités sont représentées par des coûts fictifs. Ces coûts sont supposés être proportionnels à la longueur de l'écart entre les dates réelles des livraisons et les dates idéales préfixées. Ils sont calculés tout en prenant en compte les quantités prévues de chaque livraison et les perturbations que ces écarts sont sensés produire.

En plus des décalages temporels des livraisons, pour ajouter un degré de liberté pour le lissage de charge, nous supposons que les quantités associées à chaque livraison peuvent être également négociées. Tout comme dans la négociation des dates, pour chaque livraison et pour chaque fournisseur (ou magasin), il y a des pénalités associées pour les raisons décrites auparavant. Ces pénalités sont associées aux quantités qui sont en avance ou en retard par rapport aux courbes cumulées idéales, voir 2.5.1 et figure 2.2.

Quand l'audit de l'entreprise de chaussures a été mené, il a été constaté que dans la plateforme il y avait à peu près 20% de flux 1 (cross-docking) et 80% de flux 3, voir figure 1.3. Tous les produits qui ne sont pas traités par le cross-docking passent par la réserve. Il est à noter que le cross-docking, sans traitement sur la plateforme, où les colis destinés à chaque magasin sont préparés en amont par les fournisseurs, semble idéal, mais il augmente les coûts chez les fournisseurs et les volumes transportés. En outre, il diminue la flexibilité de la gestion de l'entreprise de chaussures.

Au départ, une des motivations de notre étude était de déterminer les pourcentages optimaux de chaque flux dans la plateforme pour minimiser les coûts en diminuant les passages par la réserve et non pas en augmentant le cross-docking, considéré à son optimum compte tenu des coûts.

Dans la plateforme de notre application, la principale ressource d'exécution d'opérations est constituée par la main d'œuvre. La plateforme est composée de personnel permanent, avec un contrat à durée déterminée ou indéterminé. Mais, comme nous l'avons déjà expliqué, pour assurer la satisfaction de la charge de travail pendant les périodes de pointe, la plateforme peut faire appel à du personnel intérimaire qui, dans notre modèle, sont embauchés par période et leur emploi du temps est préfixé (en dehors des limites de notre modèle) pour avoir assez de personnel à chaque période. La main d'œuvre est classée en catégories selon leurs efficacités moyennes et leurs compétences pour exécuter les opérations. L'efficacité d'une catégorie est donnée par un pourcentage qui représente un niveau de performance par rapport à la meilleure performance possible. Evidemment, les coûts d'embauche dépendent des efficacités du personnel visé. Par ailleurs, dans notre modèle, chaque ouvrier peut travailler une quantité maximale d'heures supplémentaires par période; le nombre d'heures supplémentaires et le coût de ces heures dépendent de chaque catégorie. Les heures supplémentaires coûtent plus cher à l'entreprise que les heures de travail normales.

Afin de rendre notre modèle suffisamment générique pour qu'il puisse s'adapter aussi à des structures de production, nous avons considéré l'existence d'opérations d'assemblage et de désassemblage et des nomenclatures associées¹. Pour cette raison, les familles de produits contiennent des produits simples et des produits composés qui sont le résultat de nomenclatures. Les activités d'assemblage, de désassemblage et de transformation sont différenciées dans le modèle. Quelques activités nécessitent un pourcentage minimal de travail exécuté par une personne plus qualifiée ou un "expert" à chaque période.

2.5 Modèles Linéaires proposés

Nous avons choisi la programmation linéaire plutôt que la simulation (comme souvent retrouvée dans la littérature sur des problèmes liés aux entrepôts et plateformes) en raison de notre choix délibéré de nous placer, dans ce chapitre, au niveau de la planification (moyen terme) et non pas au niveau opérationnel. Dans cette section, nous introduisons les modèles linéaires que nous proposons, ils sont suffisamment génériques pour être appliqués à plusieurs types d'entrepôts, pour représenter les différentes contraintes liées à ces derniers, et pour tenter de trouver une solution au problème de lissage de charge. Nous avons initié notre réflexion grâce au cas de SAVAT, entreprise de commercialisation de chaussures, et nous avons essayé de le généraliser à tous les entrepôts, voir même aux ateliers de production.

Dans cette section nous commençons par donner une description des différentes entités du modèle avec les hypothèses qui concernent chaque famille d'entités. Ensuite, dans la section 2.5.2, nous introduisons le premier modèle qui admet seulement des négociations sur les dates des livraisons. Enfin, dans 2.5.3, le deuxième modèle avec des négociations des dates et des quantités est présenté.

2.5.1 Éléments du modèle

Paramètres temporels : En raison du caractère moyen terme de notre modèle, nous avons choisi une unité de temps notée Δ . Selon la granularité temporelle du modèle, Δ peut être égal à une heure, une demi-journée ou une journée, voir Belvaux et Wosley [11]. L'horizon temporel,

1. Si une commande magasin doit être livrée en totalité de manière groupée dans la même livraison, on peut la considérer comme un assemblage, c'est notre hypothèse au chapitre 3 qui concerne le niveau opérationnel (ordonnancement). Par contre dans ce chapitre, certains éléments d'une commande pourraient être livrés en retard, ce qui relaxe la contrainte d'assemblage.

qui correspond aux périodes de pointe, est noté H et est défini par un nombre entier de périodes de durée Δ . Notre modèle évalue les niveaux de stock seulement au début et à la fin de chaque période. Nous supposons que Δ est assez petit pour que les variations de stocks ne soient pas très grandes à l'intérieur d'une période. Autrement, les capacités des zones de stockage devraient être sous-estimées dans le modèle pour éviter le sur-stockage.

Activités de la plateforme : Comme dans tout système de gestion à moyen terme, nous distinguons deux groupes d'entités : les zones de stockage et les activités qui déplacent les produits d'une zone de stockage à une autre. Des activités, comme le contrôle, le déballage, l'assemblage, le désassemblage, ..., donnent de la valeur ajoutée aux produits déplacés. Dans ce chapitre, nous considérons que toutes les livraisons des fournisseurs qui arrivent à la même période, représentent un seul stock de produits dans un seul camion ; ce camion doit être pris en charge par une seule activité fictive de déchargement dans le modèle. La même situation apparaît avec les livraisons vers les clients.

Dans nos expériences numériques la capacité de la plateforme logistique est illimitée car, à tout instant, elle peut stocker tous les produits arrivant pendant les périodes de pointe. Néanmoins, la capacité de chaque zone de stockage à l'intérieur de l'entrepôt est limitée, à exception de la réserve.

Pour certains cas de notre étude, parmi les activités de la plateforme, nous ajoutons une activité appelée "mise en réserve" qui absorbe le pourcentage de flux 3 (voir figure 1.3) qui doit aller à la réserve. Les produits dans la réserve n'abandonnent pas la plateforme avant la fin de l'horizon du modèle, car en réalité les magasins demandent encore des réassortiments après la fin de la période où le pic de charge est constaté. Nous supposons que l'activité "mise en réserve" est exécutée obligatoirement juste avant la fin de l'horizon.

Familles de produits : Rouwenhorst *et al.* [127] remarquent que le nombre de produits différents peut être très grand dans un entrepôt de distribution, alors que les commandes des clients sont typiquement composées de plusieurs produits différents mais en très petite quantité pour chacun, ce qui rend la logistique interne complexe. Au niveau tactique, en général, la planification agrège les produits similaires en familles, c'est pourquoi nous avons choisi d'avoir des familles de produits sans différencier les produits à l'intérieur de chacune (travailler au niveau des produits augmenterait considérablement le nombre de variables, mais ne modifierait pas notre modèle). Pour notre application industrielle, par exemple, nous ne faisons pas la différence entre les pointures des chaussures d'une même famille. Pour simplifier la rédaction, par la suite les différentes familles seront appelées simplement produits. La quantité de chaque produit dans un camion qui arrive ou dans un camion qui part est définie en unités de produit et non pas en paquets ou palettes (la remarque de Rouwenhorst *et al.* [127] le justifie), même si l'on manipule des groupes de produits. Nous distinguons les produits selon les caractéristiques physiques des produits ; pour nous il s'agit des poids et des tailles des paquets de chaque produit. Selon ces caractéristiques physiques, nous sommes en mesure de déterminer des délais de traitement pour les activités de chargement, déchargement, assemblage ou désassemblage de la plateforme.

Dans notre modèle, nous supposons qu'il y a des produits simples et des produits composés (SP et CP dans la figure 2.2). Les produits simples sont obtenus en désassemblant un produit composé, comme montré dans la figure 2.2. De la même façon, les produits composés peuvent être obtenus par une opération d'assemblage qui prendra plusieurs produits simples pour former un produit composé, par exemple, une commande d'un magasin. Dans la figure 2.2, les opérations de désassemblage, assemblage et transformation (tel que le contrôle) sont représentées avec des flèches continues, gras et pointillées respectivement. Dans un atelier de production, nous

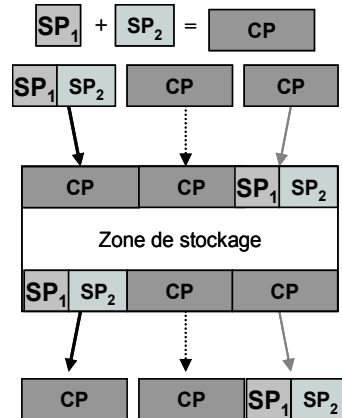


FIGURE 2.2 – Diagramme des opérations d'assemblage et de désassemblage

pouvons assimiler l'activité d'assemblage à l'activité de production où on utilise des composants pour obtenir un nouveau produit semi-fini. Par ailleurs, il n'est pas illogique de considérer des activités d'assemblage dans un entrepôt car dans certains cas industriels, l'assemblage final est fait dans les entrepôts et cela doit être pris en compte par le modèle.

Organisation des flux : La modélisation de l'organisation des flux est nécessaire quand plus d'un chemin possible existe dans la plateforme. Par exemple, une fois qu'une livraison des fournisseurs arrive et que le camion est déchargé, selon l'agencement de la plateforme, les produits peuvent aller à deux endroits : un pourcentage des produits va directement à la zone de cross-docking et le pourcentage restant va à la réserve. Pour modéliser l'organisation des flux, nous présentons deux possibilités. La première consiste à utiliser des contraintes de flux qui font qu'un pourcentage de produits aille à la zone que l'on souhaite dans la plateforme sur l'horizon temporel ; ces contraintes sont souvent redondantes avec les commandes des clients qui sont calculées en prenant en compte ces pourcentages et qui assurent l'équilibre des flux. La deuxième possibilité est d'introduire des contraintes pour modéliser le fait que certains stocks doivent être vides à certaines périodes, spécialement à la fin de l'horizon temporel. Ainsi, tous les produits qui restent dans la plateforme seront dans la réserve à la fin de l'horizon. Dans ce chapitre, nous proposons d'utiliser les deux types de modélisation des flux.

Négociations : Dans le but de donner de la flexibilité pour lisser la charge dans la plateforme et pour éviter, si possible, la main d'œuvre supplémentaire, nous autorisons des modifications limitées (que l'on appelle négociations) des dates d'arrivée et de départ des livraisons des fournisseurs et des clients. Les quantités prévues pour ces livraisons peuvent être modifiées légèrement également.

Pour les négociations des délais prévus, les retards et les avances tolérés des livraisons et les pénalités associées (réelles ou virtuelles), correspondant aux fournisseurs ou aux magasins sont supposés connues. Par ailleurs, pour gérer la négociation des quantités, nous définissons des courbes cumulées, par client (ou fournisseur) et par produit. Ces courbes seront utilisées soit comme des bornes supérieures et inférieures obligatoires ou comme des courbes cumulées idéales qui permettent de calculer des pénalités d'avance et de retard de l'écart entre ces courbes idéales et les courbes cumulées associées à une solution de planification, voir figure 2.3. Une courbe cu-

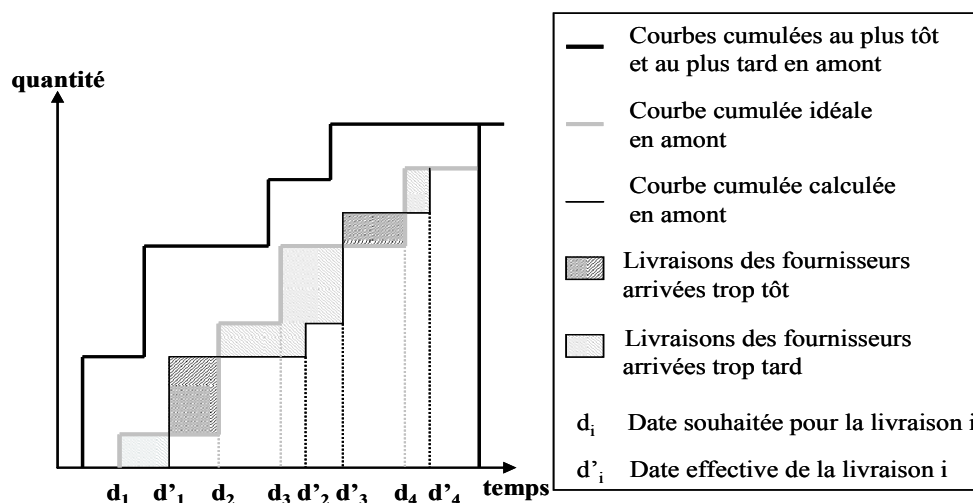


FIGURE 2.3 – Courbes cumulées en amont pour un produit

mulée, pour un produit, en amont (resp. en aval) est définie comme la somme cumulée des quantités livrées par les fournisseurs (resp. aux magasins).

Contrairement aux pénalités d'avance et de retard des livraisons, la pénalité de variation de quantités est plus directement associée à des coûts de production (et de stockage) en amont et en aval de la plateforme. Leur calcul peut néanmoins être difficile car il nécessite d'étudier les conséquences de ces avances/retards en utilisant, par exemple, des modèles d'optimisation à moyen terme. Le coût associé à chaque unité de surface en avance ou en retard de la courbe calculée par rapport à la courbe idéale, voir figure 2.3, est aussi supposé connu.

Ressources humaines : La plateforme logistique fonctionne essentiellement avec des ressources humaines. Il est nécessaire de prendre en compte leur savoir-faire dans l'efficacité avec laquelle chaque personne exécute les tâches qui lui sont attribuées. Ainsi, dans nos modèles, nous avons choisi de définir des catégories de personnel. Les personnes dans la même catégorie sont capables d'exécuter des activités avec la même efficacité. Selon la granularité du modèle, pour chaque produit et pour chaque activité, des temps de traitement minimaux sont définis. Ces temps de traitement correspondent au temps qu'un expert mettrait à exécuter la tâche sur la famille de produits considérée. Pour calculer le temps passé par les autres catégories, nous avons introduit une matrice d'efficacité par activité, par famille de produit et par catégorie de personnel. Les valeurs de cette matrice correspondent à des taux d'efficacité qui sont inférieurs ou égaux à 1. Nous prenons en compte d'autres contraintes relatives aux ressources humaines, telles que la possibilité de faire des heures supplémentaires ou d'imposer des niveaux d'expertise pour certaines activités.

2.5.2 Modèle avec les négociations des dates de livraison

Dans cette section, nous présentons le premier modèle qui permet les négociations des dates, dans la section suivante nous montrons comment étendre ce premier modèle pour qu'il prenne en compte les négociations des quantités.

Paramètres et Variables

Ce premier modèle a plusieurs paramètres. Aussi souvent que possible, nous utilisons la première lettre du nom de chaque famille de paramètres pour la caractériser ; nous donnons aussi le symbole qui identifie l'ensemble d'indices correspondant. Dans le tableau 2.1, la première colonne contient la notation la plus utilisée pour les indices, la deuxième colonne contient un sigle désignant une famille d'indices et la dernière colonne la description de cette famille.

TABLE 2.1 – Ensembles d'indices et notations

Indice	Ensemble	Description
Δ	NT	durée d'une période donnée en heures (granularité temporelle)
H		horizon temporel (entre 6 et 8 semaines)
t		indice du temps
nth		nombre de périodes dans l'horizon temporel
z	NZ	zones de stockage
w	NW	catégories de personnel
p	NP	familles de produits
o	NOA	opérations d'assemblage
	NOD	opérations de désassemblage
	NOT	opérations de transformation : contrôle, déplacement ou production en général
	NO	ensemble de toutes les opérations de la plateforme ($NO = NOA \cup NOD \cup NOT$)
o	OC	opérations de chargement des camions ($OC \subset NO$)
	OD	opérations de déchargement des camions ($OD \subset NO$)
		dans le modèle les ensembles OC et OD ont seulement un élément car nous avons considéré un seul quai de chargement et de déchargement
d_u	NDU	livraisons amont/fournisseurs
d_d	NDD	livraisons aval/clients
d	ND	ensemble d'indices de toutes les livraisons ($ND = NDU \cup NDD$)
a	NA	ensemble de toutes les activités de la plateforme. Chaque activité modifie l'état des zones de stockage ($NA = NO \cup ND$)

Les paramètres (connus) les plus importants sont données dans le tableau 2.2. Ces paramètres sont regroupés par familles de paramètres, les descriptions des variables et les familles de contraintes sont présentées par la suite.

Puisque dans cette sous-section nous négocions seulement les avances et les retards des livraisons, nous supposons que les quantités de tous les produits dans une livraison ont déjà été négociés et ne peuvent pas être changées. Elles font donc partie des paramètres connus.

TABLE 2.2 – Notations des Paramètres

Notation	Description
<i>Paramètres associés aux stocks et aux produits</i>	
VP_p	volume d'une unité de produit p
VZ_z	capacité en volume de la zone de stockage z
$SI_{p,z}$	stock initial du produit p dans la zone de stockage z (le stock est donné en unités de produit)
$LZE_{a,z}$	matrice qui définit les relations entre les opérations et les variations des stocks, selon que l'activité $a \in NA$ augmente (ou diminue) le stock z (0 s'il n'y a pas de relation entre a et la zone de stockage z , 1 si a augmente le stock et -1 si a réduit le stock)
PC	ensemble des produits composés
<i>Paramètres associés aux nomenclatures</i>	
$Pa(o)$	ensemble de produits qui sont assemblés par l'opération d'assemblage o
$Pd(o)$	ensemble de produits qui sont désassemblés par l'opération de désassemblage o
$A_{o,p}$	ensemble des produits nécessaires pour obtenir $p \in Pa(o)$ en appliquant l'opération $o \in NOA$
$D_{o,p}$	ensemble des produits obtenus en appliquant l'opération $o \in NOD$ sur le produit $p \in Pd(o)$
γ_{o,p,p_i}	matrice qui indique la quantité de produit p_i utilisée par l'opération o pour obtenir une unité de produit p
δ_{o,p,p_i}	matrice qui indique la quantité de produit p_i que l'on obtient par l'application de l'opération o sur le produit p
<i>Paramètres associés aux avances et aux retards</i>	
$QP_{d,p}$	quantité de produit p présent dans la livraison d
TS_d	date idéale pour la livraison d
$MAXE_d$	valeur maximale autorisée pour l'avance de la livraison d
$MAXT_d$	valeur maximale autorisée pour le retard de la livraison d
$EC\Delta_d$	pénalité d'avance par unité de temps Δ de la livraison d
$TC\Delta_d$	pénalité de retard par unité de temps Δ de la livraison d
<i>Paramètres sur l'organisation des flux : première possibilité</i>	
$nd(z)$	nombre de destinations possibles à partir de la zone de stockage z dans la plateforme
$Zd(z)$	ensemble des destinations directes depuis la zone de stockage z si $nd(z) > 1$
$Per_{z,z'}$	pourcentage de produit allant de z à $z' \in Zd(z)$
$O_{z,z'}$	ensemble d'opérations qui déplacent les produits de la zone z à la zone z'
<i>Paramètres sur l'organisation des flux : deuxième possibilité</i>	
TZ_z	indice de temps après lequel le stock de la zone z est fixé et maintenu à zéro
SZ	ensemble d'indices des zones de stockage qui doivent être vidées avant la fin de l'horizon de temps

Paramètres sur la main d'œuvre	
$E_{w,o,p}$, PES_o	efficacité de la catégorie w pour exécuter l'opération o sur le produit p pourcentage minimal de temps passé (par période) par un expert sur l'opération o
$MAXTW\Delta$	temps maximal de travail par période (payé au salaire normal)
$HSD_{w,t}$	nombre maximal d'heures supplémentaires que le personnel de catégorie w peut faire pendant la période t
$CUHS_w$	coût d'une heure supplémentaire pour la catégorie de personnel w .
$NORMnrh_{w,t}$	quantité initiale de personnel de catégorie w qui était prévue pour la période t (calculée dans une phase préliminaire)
$MAXnrh_{w,t}$	quantité maximale de personnel permanent et temporaire disponible à la période t pour la catégorie w
$CUnrh_{w,t}$	coût d'embauche d'une personne de catégorie w pendant la période t
Autres paramètres	
$TU_{o,p}$	durée de traitement minimale pour une unité de produit p par l'opération o , cette durée est 0 si le produit n'est pas traité par l'opération
M	est un très grand nombre caractérisant $+\infty$

Les variables du modèle sont présentées dans le tableau 2.3. Les variables auxiliaires sont des variables d'état, elles sont associées aux stocks ou à des variables intermédiaires qui simplifient le modèle.

TABLE 2.3 – Variables de décision et variables auxiliaires

Variable	Description
Variables de décision	
$Q_{a,p,t}$	quantité de produit p traitée (résultant ou subissant l'activité) par l'activité a pendant la période t
$TW_{w,o,p,t}$	temps (exprimé en heures) que le personnel de catégorie w passe sur l'opération o et sur le produit p pendant la période t
$Move_{d,t}$	variable booléenne égale à 1 si la livraison d arrive à la période t et 0 sinon
$nrh_{w,t}$	nombre de personnes de la catégorie w dans la plateforme pendant la période t
$HS_{w,t}$	quantité d'heures supplémentaires de travail du personnel de catégorie w pendant la période t
Variables auxiliaires	
Ch_t	charge de travail de la plateforme pendant la période t exprimée en heures de travail
$MoyCh$	charge moyenne sur l'horizon de temps
$MaxCh_t$	écart entre la charge moyenne et la charge à la période t quand cet écart est positif
$MinCh_t$	écart entre la charge moyenne et la charge à la période t quand cet écart est négatif

$S_{z,p,t}$	stock de produit p dans la zone de stockage z à la fin de la période t
T_d	date à laquelle la livraison d est effectivement livrée
DE_d	avance (exprimée en nombre de périodes) de la livraison d
DT_d	retard de la livraison d
$Peak$	charge maximum pendant l'horizon

Formalisation du modèle

Dans ce qui suit, nous présentons les familles de contraintes regroupées par type de contraintes. Des explications sont données après chaque famille. La formulation mathématique du modèle est la suivante :

Bornes pour les variables :

$\forall a, \forall t, \forall p$	$Q_{a,p,t} \geq 0$	(1)
$\forall o \in NOD, \forall p \notin Pd(o) \cup_{p' \in Pd(o)} D_{o,p'}, \forall t$	$Q_{o,p,t} = 0$	(2)
$\forall o \in NOA, \forall p \notin Pa(o) \cup_{p' \in Pa(o)} A_{o,p'}, \forall t$	$Q_{o,p,t} = 0$	(3)
$\forall w, \forall o, \forall p, \forall t$	$TW_{w,o,p,t} \geq 0$	(4)
$\forall z, \forall p, \forall t$	$S_{z,p,t} \geq 0$	(5)
$\forall d$	$0 \leq T_d \leq nth$	(6)
$\forall w, \forall t$	$NORMnrh_{w,t} \leq nrh_{w,t} \leq MAXnrh_{w,t}$	(7)
$\forall w, \forall t$	$0 \leq HS_{w,t} \leq HSD_{w,t}$	(8)
$\forall t$	$MaxCh_t \geq 0$	(9)
$\forall t$	$MinCh_t \geq 0$	(10)
$\forall d$	$0 \leq DE_d \leq MAXE_d$	(11)
$\forall d$	$0 \leq DT_d \leq MAXT_d$	(12)

Les familles de contraintes (1), (4), (5), (9) et (10) assurent la positivité des variables. Les familles (2) et (3) indiquent que seulement les produits qui doivent être assemblés ou désassemblés et leurs composants peuvent être traités par une opération d'assemblage ou de désassemblage. Les contraintes (6) établissent que les livraisons doivent être livrées dans l'horizon temporel ; (7) dit que le nombre de personnes dans chaque catégorie doit être supérieur au nombre de personnel fixe et inférieur au nombre maximal de personnel autorisé (y compris le personnel temporaire). La famille de contraintes (8) exprime le fait que les heures supplémentaires par catégorie et par période ne peuvent pas dépasser la quantité autorisée dans la plateforme. Les familles (11) et (12) contraignent les avances et les retards des livraisons au nombre de périodes d'avance et de retard toléré pour chaque livraison.

Variations des stocks et contraintes de capacité :

$\forall z \in NZ, \forall p \in NP$	$S_{z,p,0} = SI_{z,p}$	(13)
$\forall z \in NZ, \forall p \in PC, \forall t \in NT$	$S_{z,p,t} = S_{z,p,t-1} + \sum_d LZE_{d,z} Q_{d,p,t} + \sum_{o \in NOT} LZE_{o,z} Q_{o,p,t}$ $+ \sum_{o \in NOD: LZE_{o,z} = -1} LZE_{o,z} Q_{o,p,t} + \sum_{o \in NOA: LZE_{o,z} = 1} LZE_{o,z} Q_{o,p,t}$	(14)
$\forall z \in NZ, \forall p \in NP \setminus PC, \forall t \in NT$	$S_{z,p,t} = S_{z,p,t-1} + \sum_d LZE_{d,z} Q_{d,p,t} + \sum_{o \in NOT} LZE_{o,z} Q_{o,p,t}$	

$$+ \sum_{o \in NOD: LZE_{o,z}=1} LZE_{o,z} Q_{o,p,t} + \sum_{o \in NOA: LZE_{o,z}=-1} LZE_{o,z} Q_{o,p,t} \quad (15)$$

$$\forall z, \forall t \quad \sum_{p \in NP} S_{z,p,t} \times VP_p \leq VZ_z \quad (16)$$

La famille de contraintes (13) donne aux stocks leurs valeurs initiales connues. Les familles (14) et (15) sont des contraintes de conservation des flux pour les produits composés PC et pour les produits simples respectivement (figure 2.2). Ces contraintes représentent le fait que le stock d'un produit dans une zone de stockage, à la fin d'une période donnée, est égal au stock à la fin de la période précédente plus (ou moins) les quantités traitées par les opérations de transformation (flèches pointillées dans la figure 2.2), opérations d'assemblage (flèches continues en gras) et opérations de désassemblage (flèches continues simples) qui modifient cette zone de stockage. La famille (16) assure que la capacité physique d'une zone de stockage n'est pas dépassée.

Avance et retard des livraisons :

$$\forall d \quad \sum_{t \in NT} Move_{d,t} = 1 \quad (17)$$

$$T_d = \sum_{t \in NT} t \times Move_{d,t} \quad (18)$$

$$DE_d \geq TS_d - T_d \quad (19)$$

$$DT_d \geq T_d - TS_d \quad (20)$$

La famille (17) garantie que la livraison d est livrée en une seule fois pendant une seule période. Les contraintes (18) calculent la date de livraison retenue par la solution du programme linéaire ; les familles (19) et (20) déterminent l'avance et le retard effectif de chaque livraison.

Lien entre les livraisons et le flux :

$$\forall p, \forall d, \forall t \quad Q_{d,p,t} = QP_{d,p} \times Move_{d,t} \quad (21)$$

$$\forall p, \forall t \quad \sum_{o \in OD} Q_{o,p,t} = \sum_{d \in NDU} Q_{d,p,t} \quad (22)$$

$$\forall p, \forall t \quad \sum_{o \in OC} Q_{o,p,t} = \sum_{d \in NDD} Q_{d,p,t} \quad (23)$$

La famille (21) fait le lien entre les livraisons et les flux manipulés dans la plateforme. Les contraintes (22) et (23) indiquent que les camions des livraisons sont chargés et déchargés pendant une seule période.

Satisfaction de la charge :

$$\forall o, \forall t, \forall p \quad TU_{o,p} \times Q_{o,p,t} = \sum_{w: E_{w,o,p} \neq 0} TW_{w,o,p,t} \times E_{w,o,p} \quad (24)$$

$$\forall w, \forall t \quad \sum_o \sum_p TW_{w,o,p,t} \leq nrh_{w,t} \times MAXTW\Delta + HS_{w,t} \quad (25)$$

Les contraintes (24) établissent que, pour toute période t et pour tout produit p , le temps total passé par toutes les catégories de personnel sur une opération doit être supérieur ou égale à la charge associée à cette opération pour la période et pour le produit donnés. La famille de contraintes (25) est une manière simple de gérer les heures supplémentaires par catégorie de personnel : pour toute catégorie et pour toute période, la charge doit être inférieure ou égale au temps maximum travaillé par tout le personnel présent sur la plateforme plus les heures supplémentaires maximales autorisées du personnel permanent (de cette catégorie).

Contraintes de personnel :

$$\forall w, \forall o, \forall t, \forall p \quad TW_{w,o,p,t} \leq E_{w,o,p} \times M \quad (26)$$

$$\forall o, \forall t \quad \sum_p TW_{w',o,p,t} \geq \frac{PES_o}{100} \sum_w \sum_p TW_{w,o,p,t} \quad (27)$$

où $w' \in \operatorname{argmax}_{w \in NW} E_{w,o,p}$

Si l'efficacité d'une catégorie de personnel est nulle pour une opération, la famille de contraintes (26) interdit l'affectation d'une personne de cette catégorie à l'opération en question. La famille (27) (qui est optionnelle) dit que le temps passé par un expert sur une opération doit être supérieur ou égal au pourcentage de temps d'expert souhaité pour cette opération.

Calcul de la charge :

$$\begin{aligned} \forall t \quad Ch_t &= \sum_w \sum_o \sum_p TW_{w,o,p,t} & (28) \\ MoyCh &= \frac{1}{nth} \sum_{t \in NT} Ch_t & (29) \\ MaxCh_t &\geq Ch_t - MoyCh & (30) \\ MinCh_t &\geq MoyCh - Ch_t & (31) \\ Peak &\geq Ch_t & (32) \end{aligned}$$

Les contraintes de la famille (28) calculent la charge totale par période ; la famille (29) calcule la charge moyenne tandis que (30) et (31) calculent l'écart entre la charge de travail de chaque période par rapport à la charge moyenne. La famille (32) nous permet de calculer la charge maximale sur l'horizon temporel.

Contraintes d'organisation des flux :

- Première possibilité :

$$\begin{aligned} \forall p \in NP \setminus PC, \forall z \in NZ : nd(z) > 1, \forall z' \in Z_d(z) \\ \sum_t \sum_{o \in K_1} Q_{o,p,t} &= \frac{Per_{z,z'}}{100} \sum_t \sum_{o' \in NOTA:LZE_{o',z}=-1} Q_{o',p,t} & (33) \end{aligned}$$

où $K_1 = O_{z,z'} \cap (NOT \cup NOA)$ et $NOTA = NOT \cup NOA$

$$\begin{aligned} \forall p \in PC, \forall z \in NZ : nd(z) > 1, \forall z' \in Z_d(z) \\ \sum_t \sum_{o \in K_2} Q_{o,p,t} &= \frac{Per_{z,z'}}{100} \sum_t \sum_{o' \in NOTD:LZE_{o',z}=-1} Q_{o',p,t} & (34) \end{aligned}$$

où $K_2 = O_{z,z'} \cap (NOT \cup NOD)$ et $NOTD = NOT \cup NOD$

- Deuxième possibilité :

$$\forall z \in SZ, \forall t \geq TZ_z, \forall p \quad S_{z,p,t} = 0 \quad (33')$$

Les contraintes d'organisation des flux établissent que la quantité de produits sortant de la zone de stockage z et allant vers z' sur l'horizon de temps est égale à un pourcentage donné. Nous ne vérifions pas ces contraintes à chaque période mais seulement à la fin de l'horizon. Les familles de contraintes correspondantes sont (33) et (34). La famille de contraintes, (34), pour les produits composés (ceux de l'ensemble PC) et la famille, (33) pour les produits simples. Les contraintes (33') correspondent à la deuxième possibilité de gérer l'organisation des flux, ces contraintes indiquent que les stocks des zones de stockage intermédiaires $z \in SZ$ doivent être zéro après la période TZ_z .

Contraintes des nomenclatures :

$$\begin{aligned} \forall o \in NOD, \forall p \in Pd(o), \forall p' \in D_{o,p}, \forall t \\ Q_{o,p',t} &= \sum_{p_i \in Pd(o)} \delta_{o,p_i,p'} \times Q_{o,p_i,t} & (35) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \forall o \in NOA, \forall p \in Pa(o), \forall p' \in A_{o,p}, \forall t \\ Q_{o,p',t} &= \sum_{p_i \in Pa(o)} \gamma_{o,p_i,p'} \times Q_{o,p_i,t} & (36) \end{aligned}$$

Finalement, les contraintes associées aux nomenclatures sont données par les familles (35)

et (36), ces contraintes calculent les quantités de produits simples traitées par une opération d'assemblage ou une opération de désassemblage selon les quantités de produits à assembler ou à désassembler.

Indicateurs de performance

Toute entreprise concernée se voit contrainte à prendre des décisions multi-critères, pour cela elles utilisent des indicateurs de performance. Nous avons conçu des mesures de performance pour aider l'entreprise dans son processus de prise de décision. Comme le lissage de charge était à l'origine de notre travail de recherche, nous proposons une première mesure de performance (A), laquelle calcule l'écart entre la charge moyenne et la charge maximale et minimale.

$$\sum_t (MaxCh_t + MinCh_t) \quad (A)$$

Cette mesure permet de comparer le lissage global de deux solutions. Néanmoins, nous verrons dans les expériences numériques que minimiser cet indicateur de performance peut réduire les performances d'autres mesures importantes décrites plus bas, car pour améliorer ce critère, la charge moyenne (qui est exprimée en heures de travail quelles que soient les efficacités utilisées) est généralement augmentée.

Comme autre indicateur, nous considérons la minimisation de la variable "*Peak*" (définie dans (32)) comme un indicateur de performance alternatif de la charge.

Avant de proposer notre modèle, les dates de livraison étaient totalement imposées à la plateforme. Nous supposons que des modifications légères peuvent être négociées avec les fournisseurs et que des petites modifications peuvent être tolérées dans les livraisons vers les magasins. Il n'est pas possible de modéliser précisément les vraies conséquences de ces modifications légères. Nous proposons donc des pénalités fictives pour représenter le niveau d'impact des négociations. Ici nous utilisons une pénalité proportionnelle à la déviation de temps (en nombre de périodes). N'importe quelle fonction linéaire de pénalité peut remplacer la fonction (B).

$$\sum_d [(DE_d \times EC\Delta_d) + (DT_d \times TC\Delta_d)] \quad (B)$$

Beaucoup d'indicateurs de performance peuvent être associés au coût de la main d'œuvre. Dans (C), nous nous intéressons à la quantité de personnel de chaque catégorie disponible à chaque période. Dans (D), nous considérons le coût des heures supplémentaires par période et par catégorie. Ces coûts représentent des dépenses directes pour l'entreprise.

$$\sum_t \sum_w (nrh_{w,t} - NORMnrh_{w,t}) \times CUnrh_{w,t} \quad (C)$$

$$\sum_t \sum_w HS_{w,t} \times CUHS_w \quad (D)$$

A part les deux dernières mesures, les autres mesures sont seulement des indicateurs de tendance, en conséquence, déterminer le front de Pareto n'a pas de sens. Aussi, pour donner de la flexibilité aux décideurs et pour qu'ils puissent donner plus ou moins d'importance à chaque indicateur, nous utilisons l'approche traditionnelle d'agrégation. Pour construire la fonction objectif (OBJ), l'utilisateur doit choisir cinq paramètres : α , β , κ , λ et σ .

$$\alpha(A) + \beta(B) + \kappa(C) + \lambda(D) + \sigma(Peak) \quad (OBJ)$$

Pour chaque recherche de solutions, les cinq indicateurs de performance présentés ci-dessus seront fournis par les décideurs.

2.5.3 Modèle avec négociations des délais et des quantités

Paramètres et Variables

Pour intégrer les négociations des quantités au modèle que nous venons d'introduire 2.5.2, nous devons ajouter de nouveaux paramètres et variables. Le tableau 2.4 contient ces variables et paramètres. La série de paramètres associée aux livraisons représente les conséquences que les modifications des dates ont sur les courbes cumulées des quantités livrées et les modifications des quantités de chaque livraison. Il est nécessaire d'ajouter quelques variables d'état au modèle, elles sont introduites dans le tableau 2.5.

TABLE 2.4 – Paramètres associés aux négociations des quantités

Notation	Description
<i>Paramètres associés aux produits</i>	
QPU_p	quantité totale de produit p livrée par les fournisseurs dans l'horizon de temps
QPD_p	quantité totale de produit p livrée aux clients dans l'horizon de temps
$QLL_{d,p}$	borne inférieure pour la quantité de produit p présente dans la livraison d
$QUL_{d,p}$	borne supérieure pour la quantité de produit p présente dans la livraison d
<i>Paramètres associés aux livraisons</i>	
$EUCC_{p,t}$	courbe cumulée au plus tôt en amont (fournisseurs) pour le produit p
$EDCC_{p,t}$	courbe cumulée au plus tôt en aval (clients) pour le produit p
$LUCC_{p,t}$	courbe cumulée au plus tard en amont pour le produit p
$LDCC_{p,t}$	courbe cumulée au plus tard en aval pour le produit p
$NUCC_{p,t}$	courbe cumulée idéale en amont négociée pour le produit p
$NDCC_{p,t}$	courbe cumulée idéale en aval négociée pour le produit p
MC_p	coût associé à chaque unité de surface en avance entre la courbe cumulée idéale pour le produit p et la courbe cumulée associée aux livraisons prévisionnelles
LC_p	coût associé à chaque unité de surface en retard entre la courbe cumulée idéale pour le produit p et la courbe cumulée associée aux livraisons prévisionnelles

TABLE 2.5 – Variables associées à la négociation des quantités

Variable	Description
<i>Variables Auxiliaires</i>	
$UDCC_{p,t}$	courbe cumulée des livraisons en amont pour le produit p
$DDCC_{p,t}$	courbe cumulée des livraisons en aval pour le produit p
$NUE_{p,t}$	quantité de produit p livrée en avance à la période t pour les livraisons des fournisseurs

$NUT_{p,t}$	quantité de produit p livrée en retard à la période t pour les livraisons des fournisseurs
$NDE_{p,t}$	quantité de produit p livrée en avance à la période t pour les livraisons aux clients
$NDT_{p,t}$	quantité de produit p livrée en retard à la période t pour les livraisons aux clients

Formalisation et indicateurs de performance

Quelques modifications doivent être apportées au modèle avec les négociations des délais, et quelques contraintes doivent être ajoutées pour avoir le cas général avec les deux négociations. Toutes les contraintes de (1) à (36) sont utilisées dans le modèle des négociations des quantités, à l'exception de la famille de contraintes (21) qui doit être généralisée comme suit :

$$\forall p, \forall d, \forall t \quad QLL_{d,p} \times Move_{d,t} \leq Q_{d,p,t} \leq QUL_{d,p} \times Move_{d,t} \quad (21')$$

On remarque que si le produit p n'est pas concerné par la livraison d , alors les bornes $QLL_{d,p} = QUL_{d,p} = 0$. Ces bornes peuvent prendre la même valeur seulement si les dates peuvent être négociées et non les quantités. Notamment, si l'on fixe $QLL_{d,p} = QUL_{d,p} = QP_{d,p}$ on retrouve l'ensemble de contraintes (21).

Les familles de contraintes (37) à (46) doivent être ajoutées au modèle. Les contraintes (37) et (42) nous permettent de calculer les courbes cumulées en amont et en aval respectivement. Les quantités de produit arrivées en avance ou en retard avec une livraison en amont (respectivement en aval) sont calculées par (39 et 40)(respectivement (44 et 45)). Les contraintes (38) et (43) sont des contraintes de respect des bornes pour les quantités en avance et en retard à chaque période pour chaque produit. Finalement, les familles de contraintes (41) et (46) établissent que, pour chaque produit, la quantité totale planifiée de produit doit être livrée sur l'horizon temporel.

Pour les fournisseurs :

$$\forall p, \forall t \quad UDCC_{p,t} = \sum_{\tau=1}^t \sum_{d_u \in NDU} Q_{d_u,p,\tau} \quad (37)$$

$$EUCC_{p,t} \leq UDCC_{p,t} \leq LUCC_{p,t} \quad (38)$$

$$NUE_{p,t} \geq UDCC_{p,t} - NUCC_{p,t} \quad (39)$$

$$NUT_{p,t} \geq NUCC_{p,t} - UDCC_{p,t} \quad (40)$$

$$\sum_{d \in NDU} \sum_{t \in NT} Q_{d,p,t} = QPU_p \quad (41)$$

Pour les clients :

$$\forall p, \forall t \quad DDCC_{p,t} = \sum_{\tau=1}^t \sum_{d_d \in NDD} Q_{d_d,p,\tau} \quad (42)$$

$$EDCC_{p,t} \leq DDCC_{p,t} \leq LDCC_{p,t} \quad (43)$$

$$NDE_{p,t} \geq DDCC_{p,t} - NDCC_{p,t} \quad (44)$$

$$NDT_{p,t} \geq NDCC_{p,t} - DDCC_{p,t} \quad (45)$$

$$\sum_{d \in NDD} \sum_{t \in NT} Q_{d,p,t} = QPD_p \quad (46)$$

En plus, on peut remarquer que $QPU_p = \sum_{d \in NDU} QP_{d,p}$ et $QPD_p = \sum_{d \in NDD} QP_{d,p}$. Nous pouvons dire que le modèle avec les négociations des dates est un cas particulier du modèle avec les deux négociations que nous venons de voir. Par ailleurs, puisque les quantités en avance et en retard des produits livrés sont pénalisées, nous intégrons un dernier indicateur de performance à l'objectif. Les pénalités associées aux quantités livrées en avance et en retard sont calculées dans le critère (E) qui est ajouté aux autres critères proposés pour le modèle de la section 2.5.2. Dans ce modèle nous voulons minimiser (OBJ').

$$\sum_{p \in NP} \sum_{t \in NT} MC_p \times (NUE_{p,t} + NDE_{p,t}) + LC_p \times (NUT_{p,t} + NDT_{p,t}) \quad (E)$$

$$\alpha(A) + \beta(B) + \kappa(C) + \lambda(D) + \eta(E) + \sigma(Peak) \quad (OBJ')$$

2.6 Expérimentations et Résultats

Dans ce qui suit, nous commençons par introduire, dans 2.6.1, les agencements de plateforme simplifiés que nous avons utilisé pour notre étude. Dans 2.6.2, nous présentons les caractéristiques des données utilisées pour les expériences. Ensuite, dans 2.6.3 nous expliquons la méthodologie d'évaluation utilisée. Finalement, les résultats, pour les modèles avec négociation des dates de livraisons et avec les négociations des dates et des quantités, sont présentés dans les sections 2.6.4 et 2.6.5 respectivement.

2.6.1 Agencements de plateforme testés

Après l'audit de l'entreprise, on s'est rendu compte que des gains plus importants sur le coût de la main d'œuvre pouvaient être faits si l'agencement de la plateforme était modifié. Au départ, notre objectif était de construire un outil d'aide à la décision qui permette de comparer les performances de différents agencements de plateforme avec ou sans négociations des dates de livraison. La compagnie de chaussures nous a fourni les données correspondant à l'agencement de plateforme existant. Il faut remarquer que la modification de la configuration physique et des processus de la plateforme induit aussi des changements importants sur une partie des activités que les employés exécutent. Ainsi, il n'était pas possible de modéliser un générateur valide des temps de traitement pour les nouveaux agencements. En conséquence, nous avons choisi de présenter dans ce travail des agencements simplifiés et de nous concentrer sur l'intérêt des négociations pour chaque agencement de manière indépendante, sachant que la modification inconnue des temps de traitement rendait la comparaison impossible.

Dans cette section, nous décrivons les trois agencements de plateforme que nous avons considéré pour nos expérimentations, ils représentent la situation actuelle de la plateforme et deux autres situations hypothétiques. Nous les présentons dans l'ordre croissant de leur complexité.

Premier agencement

Le premier agencement testé correspond à une plateforme où les camions arrivent avec les livraisons, ensuite les produits sont déchargés dans la zone de réception. Le seul flux possible pour les produits est le "cross-docking" (flux de type 1 dans la Figure 1.3). Ainsi, les produits passent à travers la plateforme directement vers la zone d'expédition où ils sont chargés dans des camions et sont livrés aux clients. C'est l'agencement le plus intéressant en termes de coût de transport et de stockage pour la plateforme. En fait, il déplace les coûts de préparation des commandes chez les fournisseurs qui ne sont pas forcément équipés pour cela. Il faut en outre leur transmettre les informations associées et, par ailleurs, le remplissage des camions fournisseurs peut être sous-optimisé.

Cet agencement est représenté dans la figure 2.4(a). C'est le cas le plus simple au niveau des flux, puisqu'il y a un seul parcours de flux possible dans la plateforme, la modélisation de l'organisation de l'éclatement des flux n'est donc pas nécessaire. Par ailleurs, nous ne considérons que des opérations de déplacement des colis qui sont triés pour être envoyés vers les clients concernés.

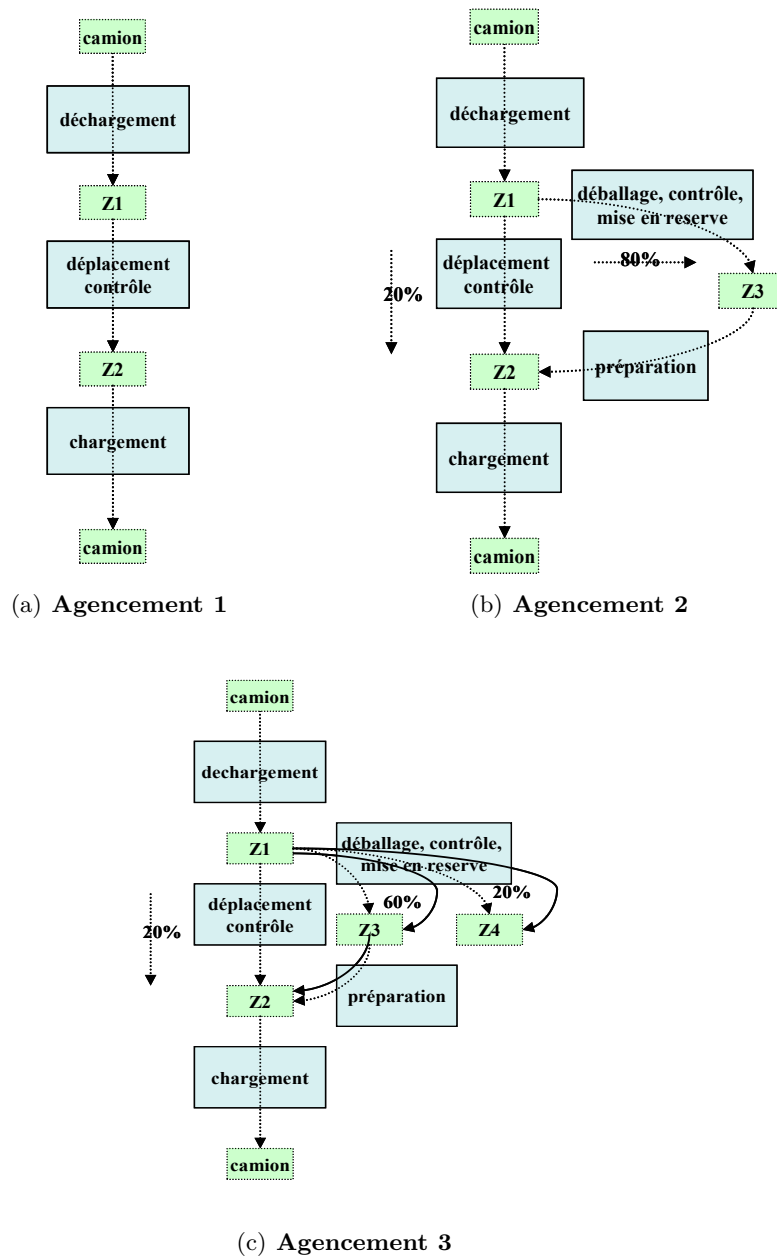


FIGURE 2.4 – Agencements de plateforme

Deuxième agencement

Le deuxième agencement testé, représenté dans la figure 2.4(b), s'approche plus de l'agencement de la plateforme de notre application industrielle au moment de l'audit. Il prend en compte deux possibilités de flux dans la plateforme. La première possibilité des flux est le cross-docking comme dans la figure 1.3. La deuxième possibilité, consiste à stocker les produits dans la réserve (Z3 dans la figure 2.4(b)) une fois qu'ils ont été déchargés. Nous supposons que la capacité de la réserve est illimitée car elle peut stocker la totalité des produits arrivant à la plateforme à n'importe quel instant. Les flux observés dans cet agencement correspondent aux flux 1 et 2 de

la figure 1.3. Dans ce cas, des contraintes d'organisation des flux ((33) et (34) ou (33')) sont nécessaires. Nous supposons encore qu'il n'y a ni assemblages, ni désassemblages possibles dans cette configuration de plateforme.

Troisième agencement

Ce troisième agencement est représenté dans la figure 2.4(c). Dans ce cas, en plus des flux considérés dans le deuxième agencement, il y a une troisième possibilité de flux de produits, cette possibilité consiste à faire passer les produits de la zone de réception vers une zone de stockage (Z4 dans la figure) qui peut avoir une capacité limitée ou illimitée. Dans ce cas, les produits ne quittent la zone Z4 qu'après la fin de l'horizon temporel de notre étude pour des raisons que nous avons déjà exposé. La principale caractéristique de cet agencement est l'existence d'opérations de type assemblage ou désassemblage (représentées par les flèches continues dans la figure 2.4(c)). Cette fois-ci, il est nécessaire d'ajouter au modèle des contraintes d'organisation des flux (comme pour le cas précédent) mais aussi des contraintes des nomenclatures ((35) et (36)) associées aux produits. Cet agencement représente des situations réelles dans la plateforme de SAVAT, comme le fait qu'une partie des produits arrivés ne sorte qu'après la fin de l'horizon et le fait qu'il y ait des opérations de constitution de commandes (assemblage et désassemblage).

2.6.2 Mise en œuvre et données utilisées

Nous avons généré de manière aléatoire 44 instances pour le modèle avec des négociations de dates (générateur aléatoire programmé en Visual C++). Avec quelques modifications, ces instances ont été généralisées dans la section 2.6.5 pour être utilisées avec le modèle de négociations des dates et des quantités. Plus de détail sur la génération des données peut être trouvé dans l'annexe 1. Dans le tableau 2.6, nous présentons : le code choisi pour dénommer chaque famille d'instances, le type d'agencement de plateforme associé, la durée (en journées) d'une période de planification (correspondant au paramètre Δ) et le nombre d'instances générées dans chaque famille.

TABLE 2.6 – Paramètres considérés

Code de famille	Agencement de plateforme	Δ (jours)	Nombre d'instances
C1	1	random (1, 1/2)	10
C2	2	random (1, 1/2)	18
C3	3	random (1, 1/2)	16

Nous considérons un horizon temporel de 6 semaines (correspondant à 30 périodes d'une journée ou 60 périodes d'une demi-journée). Cette durée correspond à la durée du pic de charge de la plateforme que nous étudions. Le nombre de familles de produits est généré de manière aléatoire entre 6 et 10.

Les instances sont générées en deux étapes. Dans la première étape, toutes les données sont générées de manière homogène (aléatoirement choisies dans un intervalle réel connu pour chaque paramètre). Par exemple, les caractéristiques des produits (poids, volume) sont générées aléatoirement entre 0.2 et 1 (unités de poids ou de volume), par exemple 0.2 m^3 pour le volume du

paquet d'un produit où m^3 est l'unité de volume choisie. Ensuite, la deuxième étape consiste à transformer les données déjà générées dans le but d'obtenir des instances hétérogènes. Nous avons fait le choix de travailler sur des instances hétérogènes car dans la réalité les caractéristiques des produits, et d'autres données, peuvent avoir des écarts types importants qui sont souvent mal reflétés par la génération aléatoire, uniforme dans un intervalle. Nous procédons comme suit : pour les caractéristiques des produits, nous calculons l'écart type de chaque caractéristique, et nous modifions, de manière aléatoire, quelques unes d'entre elles pour intensifier l'écart type. Toutes les données qui dépendent des caractéristiques des produits, comme les temps de traitement et les efficacités, sont générées seulement quand la deuxième étape de consolidation est finie.

Pour le troisième agencement de plateforme, quand il y a des opérations d'assemblage et de désassemblage, les produits qui sont assemblés ou désassemblés sont créés lors de la deuxième étape de traitement. Les livraisons sont générées seulement après que les caractéristiques des produits sont fixées. Pour tous les produits, le générateur assure l'équilibre global des flux entre les entrées, les sorties et le stockage dans la réserve. Les livraisons des fournisseurs arrivent principalement pendant la première partie de l'horizon temporel H , tandis que les livraisons aux clients sont expédiées pendant tout l'horizon temporel.

TABLE 2.7 – Catégories de personnel

				Niveau d'expérience		
				Débutant (D)	Moyen (M)	Expert (E)
Habileté	nh	Force	f	nh.f.D	nh.f.M	nh.f.E
			nf	nh.nf.D	nh.nf.M	nh.nf.E
	h	$F = \text{rand}(f, nf)$		h.F.D	h.F.M	h.F.E

Le nombre de catégories de personnel est 6 ou 9 selon les caractéristiques de personnel considérées. La première caractéristique que nous prenons en compte est le niveau d'expérience ; il y a trois niveaux d'expérience : débutant, moyen et expert. La deuxième caractéristique est la force physique, la raison est que, dans l'application d'une plateforme logistique, la force est un facteur à prendre en compte pour l'exécution de certaines opérations non automatisées. Ainsi, les hommes sont plus efficaces pour le chargement et le déchargement de camions par exemple. La troisième caractéristique considérée est l'habileté, cette caractéristique est nécessaire pour des opérations qui doivent être exécutées soigneusement, comme la préparation de commandes ou le picking. Dans les entrepôts, il a été constaté que les femmes font moins d'erreurs dans ce type de tâches.

Les catégories de personnel que nous considérons sont présentées dans le tableau 2.7. Les niveaux d'expérience sont représentés dans les trois dernières colonnes du tableau (D, M et E pour débutant, moyen et expert respectivement), la force (f et nf pour fort et non fort respectivement) et l'habileté (h et nh pour habile et non habile respectivement) sont représentées dans les lignes.

Quand nous avons 6 catégories de personnel, nous prenons en compte seulement deux caractéristiques du personnel : la force et le niveau d'expérience, alors toutes les catégories sont considérées non habiles (nh). Nous générons donc deux catégories pour chaque niveau d'expérience (avec et sans force), par exemple des débutants forts et des débutants faibles, notés respectivement nh.f.D et nh.nf.D dans la table 2.7. Nous procédons de la même manière pour

les travailleurs d'expérience moyenne (nh.f.M et nh.nf.M) et les experts (nh.f.E et nh.nf.E) pour obtenir 6 catégories.

Pour avoir 9 catégories, nous considérons, en plus de l'expérience et de la force, l'habileté. Il est clair que si nous considérons toutes les combinaisons possibles des trois caractéristiques nous aurions 12 catégories de personnel, mais comme le nombre de catégories a un impact important sur la taille des modèles linéaires, nous avons choisi de réduire artificiellement à 9 le nombre de catégories. Pour ce faire, nous avons une seule catégorie habile par niveau d'expertise en plus des deux non habiles décrites ci-dessus. Cette nouvelle catégorie peut être forte ou pas forte et cela est déterminé de manière aléatoire. Par exemple, pour les débutants nous avons déjà les nh.f.D (débutants forts et non habiles) et les nh.nf.D (débutants non forts et non habiles), la nouvelle catégorie peut être soit h.f.D ou h.nf.D (débutants forts et habiles ou débutants non forts et habiles). La même procédure est appliquée pour les autres niveaux d'expérience pour obtenir 9 catégories.

Les temps de traitement, par opération et par produit, sont générés aléatoirement selon les caractéristiques des produits. Quant aux efficacités de chaque niveau d'expérience, elles sont générées aléatoirement dans un intervalle $[a, b]$ ($a \geq 0, b \leq 1$). Selon les caractéristiques supplémentaires de chaque niveau d'expérience, force et habileté, les efficacités sont générées dans $[\omega_1 * a, \omega_2 * b]$ où ω_1 et ω_2 sont des paramètres qui dépendent du niveau d'expérience. Ceci est fait pour s'assurer que, par exemple, pour le même niveau d'expérience (disons moyen), pour une opération qui nécessite un effort physique important, la catégorie qui a la force est plus efficace que celle qui est plutôt faible.

Le modèle a été implémenté en Visual C++ ; notre programme utilise le solveur de programmation linéaire CPLEX pour résoudre le problème. Pour les agencements deux et trois, le temps de calcul a été limité à 900 secondes, la raison est que nous avons noté qu'après ce temps, le solveur n'arrive plus à améliorer la meilleure solution trouvée. Nous supposons que la meilleure solution connue est probablement près de l'optimum et que le solveur essaie de prouver son optimalité.

Taille des modèles linéaires

La taille des modèles que nous cherchons à résoudre dépend des valeurs de paramètres des instances de données que nous générons. Ces paramètres sont : le nombre de familles de produits, le nombre de périodes, le nombre de livraisons et le nombre de catégories de personnel. D'autres paramètres comme le nombre d'activités et le nombre de zones de stockage dépendent de l'agencement de la plateforme que nous considérons lors de l'application des modèles. Dans le tableau 2.8, nous donnons le nombre de variables de décision et le nombre de contraintes pour chaque agencement (indiqué dans la première colonne du tableau) et pour les deux modèles : "Négociation des dates" et "Négociation des dates et des quantités".

Deux valeurs sont indiqués dans chaque case du tableau 2.8. Ces valeurs (calculées théoriquement à partir des valeurs de génération des instances) correspondent aux nombres minimaux et maximaux des variables de décision et des contraintes pour chaque famille d'instances et pour chaque modèle. Les valeurs minimales sont calculées avec les plus petites valeurs de génération pour tous les paramètres mentionnés précédemment. Par exemple, le nombre de produits est généré entre 6 et 10, le nombre de livraisons entre 30 et 40 ; le calcul du nombre minimal de contraintes et de variables suppose qu'il y a 6 familles de produits et 30 livraisons. La même procédure est appliquée pour le calcul du nombre maximal mais avec les valeurs maximales des

TABLE 2.8 – Taille des modèles (min - max)

Agencement	Nég. Dates		Nég. Dates et Quantités	
	Variables	Contraintes	Variables	Contraintes
1	5040 - 21480	16404 - 69820	10440 - 45480	29364 - 125020
2	7560 - 33480	21912 - 95390	12960 - 57480	34872 - 150590
3	12240 - 56760	32397 - 147070	18000 - 80760	45417 - 202270

paramètres.

2.6.3 Expériences numériques

Nous avons réalisé des expériences de manière indépendante pour les trois agencements de plateforme présentés dans 2.6.1. Pour chaque agencement, 4 (resp.6) hypothèses de fonctionnement de la plateforme sont considérées selon que les heures supplémentaires sont autorisées ou non (o ou n) et selon que le nombre maximal de périodes d’avance ou de retard associés aux livraisons est 0 ou 1 (resp. 0, 1 ou 2) pour le tableau 2.9 (resp. 2.10). Chaque hypothèse correspond à une ligne pour chaque agencement dans les tableaux. Pour quelques expériences présentées ultérieurement, plus d’hypothèses sont considérées.

Les tableaux 2.9 à 2.14 sont composés de trois familles de colonnes séparées par des traits doubles. La première famille, appelée “Paramètres”, indique les 4 (ou 6) hypothèses de fonctionnement considérées (indiquées par u dans les formules de calcul). La deuxième famille, appelée “Lissage de Charge”, contient les colonnes *mesures de charge*, *coût de personnel* et *pénalités*. La troisième famille de colonnes est consacrée à des mesures d’écart constaté sur les dates de livraison (“Ecart des livraisons”).

Les valeurs présentées dans les colonnes de “Lissage de Charge” correspondent à des moyennes des valeurs de mesures de performance. Les moyennes sont calculées à l’intérieur de chaque ensemble d’instances C1, C2 ou C3. Ici, les moyennes ne sont pas appliquées directement sur les mesures elles-mêmes, mais sur l’écart entre la meilleure performance obtenue parmi toutes les hypothèses de fonctionnement et la performance de l’hypothèse en question. Plus précisément, pour chaque famille d’instances C_j ($j \in \{1, 2, 3\}$), pour chaque hypothèse ($u \in \{1, \dots, 6\}$); si $VAL_{i,u}$ est la valeur obtenue pour une colonne pour la mesure correspondante notée “VAL” pour l’instance i avec l’hypothèse de fonctionnement u , la valeur dans le tableau correspond à :

$$VAL_u = \frac{1}{|C_j|} \times \sum_{i \in C_j} \frac{VAL_{i,u} - BVAL_i}{\max(1, BVAL_i)} \times 100\% \quad (F)$$

où $BVAL_i = \min_u VAL_{i,u}$ est la meilleure performance, nous divisons par $\max(1, BVAL_i)$ pour éviter une division par zéro si jamais $BVAL_i$ est égal à 0. Nous rappelons que notre objectif est de tester les 4 (ou 6) possibilités et d’analyser leur impact sur les mesures considérées.

Lorsque l’hypothèse de fonctionnement interdit l’utilisation des heures supplémentaires ou des négociations des délais, alors les coûts des heures supplémentaires et les pénalités d’avance et de retard sont nuls; dans ces cas il n’y a pas de sens de les évaluer par rapport aux autres hypothèses de fonctionnement ni de les considérer dans l’évaluation des autres hypothèses de fonctionnement. Nous représentons cela en mettant “—” dans les cases concernées dans les tableaux. Autrement dit, si “VAL” égal aux mesures “Heures Sup.” (resp. “Pénalités de délai”) alors $BVAL_i = \min_u VAL_{i,u}$ pour les hypothèses de fonctionnement u qui n’interdisent pas les

heures supplémentaires (resp. les négociations des délais).

Pour les mesures d'évaluation de la charge (*Mesures de Charge*) les critères que nous analysons sont : “Moyenne” qui représente la charge moyenne sur l’horizon temporel (correspond à la valeur de la variable $MoyCh$ dans le modèle, nous rappelons que la charge moyenne, exprimée en heures varie en fonction de l’efficacité des personnes qui exécutent les opérations) ; “Peak” qui est la charge maximale atteinte sur l’horizon temporel et qui correspond à : $\max_{t \in NT} Ch_t$; “Ecart” qui est l’écart maximal par rapport à la moyenne (critère (A) dans la section 2.5.2).

Pour les colonnes du *coût de personnel* les critères sont : “Intérimaires” qui représente le coût total de personnel embauché (critère (C)) ; “Heures Sup.” qui est le coût total d’heures supplémentaires (critère (D)) ; et “Total” égal au coût total associé à la main d’œuvre. Des colonnes correspondant aux pénalités de Délai et des Quantités (critères (B) et (E)) sont ajoutés à cet ensemble de colonnes selon le modèle (négociations des dates ou négociation des dates et des quantités) que nous évaluons.

Pour la dernière famille de colonnes appelée “Ecart des livraisons”, on ne compare plus les hypothèses entre elles, mais on fournit des statistiques sur l’utilisation ou non de la potentialité de décaler les livraisons de 1 ou 2 périodes. Les moyennes sont calculées sur des pourcentages ; ces pourcentages représentent le nombre de livraisons décalées (avec décalage d’une ou deux périodes) par rapport au nombre total de livraisons considérées pour les fournisseurs et pour les clients.

2.6.4 Résultats obtenus avec les négociations des délais

Dans cette partie nous analysons les expériences réalisées pour tester le modèle de lissage de charge avec des négociations des dates présenté dans la section 2.5.2.

Nous commençons par faire une remarque sur l’impact que l’utilisation du critère de lissage de charge (A), avec un poids α non négligeable dans la fonction objectif globale (OBJ), a sur les autres indicateurs de performance établis pour ce premier modèle. Ensuite, nous analysons l’impact des six hypothèses de fonctionnement de la plateforme (décrites dans 2.6.3) sur les autres indicateurs, à savoir : les critères (B) les coûts d’avance et de retard ; et (C) et (D) représentant les coûts de personnel. Enfin, dans le but d’évaluer l’effet des négociations, nous regardons comment varient les résultats quand nous donnons plus ou moins d’importance (en augmentant ou en diminuant le poids (β) du critère (B)) aux pénalités d’avance et de retard dans la fonction objectif (OBJ).

Remarque sur le critère de “Lissage de Charge”

Des expériences préliminaires, où l’on avait comparé les résultats obtenus avec et sans le critère de lissage de charge dans la fonction objectif (OBJ), ont montré que le fait de considérer le critère de lissage de charge explicitement dans la fonction objectif pénalise les valeurs des autres critères qui mesurent le vrai intérêt économique de l’entreprise et de ses partenaires. Premièrement, ce critère va à l’encontre des pratiques classiques face aux périodes de pointe, si l’on connaît à l’avance les variations de la charge pendant l’horizon temporel, les gestionnaires de la plateforme peuvent utiliser des ordonnancements dynamiques pour avoir plus de personnel ou des heures supplémentaires pendant les périodes de pointe.

Deuxièmement, le critère de lissage de charge est redondant avec l’utilisation des négociations et le fait de considérer le coût de personnel dans la fonction objectif. En effet, lorsqu’on introduit de la flexibilité dans le modèle, qu’elle soit au niveau de l’utilisation des ressources (heures

supplémentaires, main d'œuvre temporelle) ou au niveau des négociations des dates, la charge est automatiquement lissée en utilisant au maximum cette flexibilité grâce à la minimisation des coûts réels de l'entreprise. Il n'est donc pas nécessaire d'ajouter un terme de lissage de charge dans l'objectif.

Puisque notre objectif est de lisser la charge pour réduire les coûts de main d'œuvre nous concluons que le critère de lissage de charge est inutile quand on autorise les négociations des dates. Pour cette raison, dorénavant, nous avons choisi d'affecter un petit poids à ce critère de lissage de charge dans la fonction objectif, et à tout autre critère qui ne représente pas des coûts réels pour la plateforme. Nous fixons $\alpha = 0.01$ et $\sigma = 0.02$ (respectivement les poids du critère de lissage de charge (A) et de la variable "*Peak*" dans les fonctions objectifs (section 2.5.2)) dans (OBJ) et (OBJ') pour toutes les expériences à partir de maintenant.

Critères de "Pénalités de délai" et de "Coût de personnel"

Ici nous voulons évaluer l'influence que les négociations ont sur les critères économiques de la fonction objectif (OBJ). Nous présentons les résultats obtenus pour le modèle avec des pénalités de délai (critère (B)) et le coût de personnel (critères (C) et (D)) quand le paramètre β , associé aux avances/retards, est égal à 1 dans la fonction objectif (OBJ). Pour chaque famille d'instances C1, C2 et C3, nous testons 4 ou 6 hypothèses de fonctionnement de la plateforme (Tableau 2.9 et 2.10 respectivement) : heures supplémentaires autorisées ou non (o/n dans la colonne "Heures supplémentaires") et 1 période de négociation maximum dans le tableau 2.9 et 2 périodes de négociation maximum dans le tableau 2.10. Nous avons séparé les résultats en deux tableaux, un avec 1 période de négociation maximum (tableau 2.9) et l'autre avec 2 périodes de négociation maximum (tableau 2.10) pour pouvoir observer l'évolution des résultats quand on passe d'aucune flexibilité à 1 période de négociation, et d'aucune flexibilité ou 1 période à 2 périodes.

Nous analysons l'effet des négociations des dates, ensuite celui de la possibilité d'utilisation des heures supplémentaires dans les coûts de l'entreprise et sur la charge de la plateforme. Nous terminons par l'analyse de l'utilisation effective des négociations sur les livraisons des fournisseurs et celles allant vers les clients.

Les valeurs présentées dans les tableaux 2.9 et 2.10 correspondent, comme nous l'avons expliqué dans 2.6.3, à la relation donnée par (F). De manière générale, pour la famille de colonnes "Lissage de Charge", les valeurs présentées dans les tableaux 2.9 et 2.10 sont meilleures quand elles sont plus petites.

Influence des négociations des dates

Les négociations des dates ont un impact très positif sur les coûts de main d'œuvre. Nous pouvons voir que la valeur du coût total de main d'œuvre décroît quand les périodes de négociation autorisées augmentent. Dans les tableaux 2.9 et 2.10, ceci est reflété par les grands pourcentages d'écart observés dans les colonnes "Total" du coût de personnel. Les meilleures valeurs sont obtenues lorsque le nombre maximal de périodes de négociation est autorisé. C'est le cas dans le tableau 2.9, le meilleur résultat apparaît lorsqu'on autorise 1 période de négociation ; à titre d'exemple pour la famille C1 la valeur obtenue pour le coût total (sans négociation) est 27.9% plus grand que la valeur minimale (obtenue avec 1 période de négociation et quand les heures supplémentaires sont autorisés). De même, l'utilisation de 2 périodes de négociation donne le meilleur résultat dans le tableau 2.10. Par exemple, le coût total obtenu sans négociation, pour la famille C1, est 47.2% plus grand que le coût minimal obtenu avec une négociation de deux périodes. Ces différences sont moins importantes pour les autres deux familles. La différence est

peut-être due à la complexité des agencements des familles C2 et C3 où l'organisation des flux, et donc du travail, limite les réductions de charge.

TABLE 2.9 – Résultats des Négociations des Dates (Vd $MAXE_d = MAXT_d = 1, \beta = 1$)

	Lissage de Charge										Ecart des livraisons			
	Paramètres	Mesures de Charge					Coût de Personnel		Fournisseurs				Clients	
		Négociations	Heures Sup.	Moyenne	Peak	Ecart	Total	Temporaire	Heures Sup.	Pénalité de délai		0 périodes	1 période	0 périodes
C1	0	n	1.75	22.7	37.6	27.9	45.1	—	—	100	—	100	—	—
	1	n	1.66	22.2	33.7	26.7	29.9	5.55	—	100	—	100	—	—
C2	0	n	0.30	0.50	4.53	1.22	15.7	—	0.82	77.4	22.6	53.3	46.7	—
	1	n	0.19	0.31	0.13	0	0	5.39	0.97	76.8	23.2	53.8	46.2	—
C3	0	n	1.35	33.1	42.8	21.3	49.6	—	—	100	—	100	—	—
	1	n	1.11	32.7	34.2	19.7	25.8	1.78	—	100	—	100	—	—
C3	0	n	0.42	2.19	6.64	1.71	26.2	—	1.15	81.7	18.3	62.5	37.5	—
	1	n	0.11	1.19	0.39	0	0	12.0	36.2	79.8	20.2	62.2	37.8	—
C3	0	n	1.18	33.1	82.3	20.9	89.3	—	—	100	—	100	—	—
	1	n	1.01	32.2	51.4	18.2	35.1	0.51	—	100	—	100	—	—
C3	0	n	0.46	3.06	33.7	4.12	65.5	—	19.6	79.8	20.2	66.1	33.9	—
	1	n	0.37	2.64	2.78	0	0	18.2	14.8	80.4	19.6	62.4	37.6	—

TABLE 2.10 – Résultats des Négociations des Dates ($\forall d \text{ } MAXE_d = MAXT_d = 2, \beta = 1$)

Agencements	Paramètres		Lissage de Charge						Ecart des livraisons							
			Mesures de Charge			Coût de personnel			Fournisseurs		Clients					
			Moyenne	Peak	Ecart	Total	Temporaire	Heures Sup.								
Négociations	Heures Sup.	0	n	2.36	35.7	65	47.2	70.9	—	—	0 périodes	1 période	2 périodes	0 périodes	1 période	2 périodes
C1		0	n	2.36	35.7	65	47.2	70.9	—	—	100	—	—	100	—	—
			o	2.27	35.2	60.5	45.9	53.4	11.6	—	100	—	—	100	—	—
		1	n	0.89	9.32	24.3	15.4	34.9	—	2.05	77.4	22.6	—	53.3	46.7	—
			o	0.78	9.04	19.2	13.9	17	10.1	2.19	76.8	23.2	—	53.8	46.2	—
		2	n	0.22	2.56	4.19	1.44	18.9	—	87.2	72.1	15.6	12.3	43.1	31.3	25.6
			o	0.12	0.19	0.12	0	0	14.8	88.5	74.4	11.7	13.9	40.3	37.1	22.6
C2		0	n	1.87	46.6	75.7	37.6	75.6	—	—	100	—	—	100	—	—
			o	1.63	46.1	64.9	35.8	48.2	2.92	—	100	—	—	100	—	—
		1	n	0.93	11.2	30.9	14.8	47.2	—	1.15	81.7	18.3	—	62.5	37.5	—
			o	0.62	10	23.1	12.9	16.9	13.2	36.2	79.8	20.2	—	62.2	37.8	—
		2	n	0.44	1.79	9.11	1.97	31.3	—	94.2	77.4	16.9	5.7	55.7	24.4	19.9
			o	0.04	0.56	0.12	0	0	15.1	74.4	77.6	17	5.4	50.9	28.4	20.7
C3		0	n	1.43	43.5	126	37.3	132	—	—	100	—	—	100	—	—
			o	1.26	42.7	90	34.4	67.3	0.79	—	100	—	—	100	—	—
		1	n	0.70	10.4	60.7	16.6	101	—	19.7	79.8	20.2	—	66.1	33.9	—
			o	0.61	9.94	23.9	12.2	22.2	18.4	14.9	80.4	19.6	—	62.4	37.6	—
		2	n	0.36	6.2	45.3	3.69	82.8	—	94.1	75.5	17.3	7.2	60.7	20.6	18.7
			o	0.31	3.06	1.26	0	0.49	23.1	110	76.8	14.6	8.6	53.2	21.5	25.3

Une autre remarque intéressante est que le pourcentage de réduction des coûts de personnel (par rapport à la situation sans négociation) sont situées entre 20% et 30% quand il y a 1 période de négociation et entre 37% et 47% quand il y a 2 périodes. C'est à dire, que selon l'agencement de la plateforme, l'amélioration potentielle avec les négociations des délais peut aller jusqu'à 47% quand on autorise 2 périodes de négociation.

Nous pouvons voir aussi que le coût minimal est obtenu, pour toutes les instances de C1, C2 et C3, quand les heures supplémentaires sont autorisées et avec 1 période de négociation dans le tableau 2.9 ; et avec 2 périodes de négociation pour les expériences du tableau 2.10 pour toutes les instances. Ainsi, les résultats obtenus quand nous autorisons les négociations nous permettent de quantifier l'intérêt économique des négociations des dates des livraisons.

Par ailleurs, nous voyons que pour tous les problèmes étudiés, quand les négociations sont autorisées, le lissage de charge, représenté par la colonne "Ecart", s'améliore. Par exemple, pour la famille d'instances C2, la meilleure valeur pour le lissage de charge est donnée par la valeur minimale de la colonne "écart" : 0.39 (resp. 0.12) dans le tableau 2.9 (resp. tableau 2.10). Cette valeur correspond à l'approche de résolution qui permet les négociations les plus grandes dans les deux cas (1 (resp. 2) périodes de négociation et avec heures supplémentaires). Nous observons la même situation pour les familles C1 et C3. Les résultats pour le lissage de charge, confirment que la charge ne fait que se lisser quand les négociations sont introduites au modèle. De plus, avec les négociations la charge moyenne n'augmente pas, ce qui était le cas quand le poids de (A) n'était pas négligeable.

Influence des heures supplémentaires

L'intérêt économique d'utiliser les heures supplémentaires est étroitement lié aux valeurs numériques utilisées dans les instances générées pour les coûts unitaires des heures supplémentaires, d'embauche des intérimaires et des pénalités d'avance et de retard. C'est pour cette raison, qu'essayer de quantifier l'impact économique de l'utilisation des heures supplémentaires n'est pas vraiment pertinent dans ce contexte.

Néanmoins, nous pouvons faire quelques remarques sur le comportement groupé des mesures de "coût de personnel" quand les heures supplémentaires sont autorisés et quand elles ne le sont pas. De manière générale, l'utilisation d'heures supplémentaires entraîne une diminution du coût de personnel temporaire et donc des coûts totaux de personnel. Ce comportement est observé quel qu'il soit le nombre de périodes de négociation maximal autorisé, dans les tableaux 2.9 et 2.10. Et ce malgré le fait qu'une heure supplémentaire soit plus chère qu'une heure de travail d'un intérimaire, une explication possible est que quand on embauche un intérimaire il faut le payer pour une période complète même s'il ne travaille qu'une heure, ce qui n'est pas le cas pour l'utilisation des heures supplémentaires. Ou alors, les heures supplémentaires changent la distribution des catégories de personnel embauché (moins d'experts et plus de débutants par exemple) et ainsi le coût total.

Nous ne pouvons pas tirer de conclusion concernant la relation entre le nombre de négociation et l'utilisation des heures supplémentaires, il n'y a pas de raison pour qu'il y ait une tendance. Avec nos jeux d'essais, cependant, il semblerait que la plus grande utilisation d'heures supplémentaires se fasse quand le nombre maximal de périodes de négociation est autorisé.

Ecart des livraisons

Ici nous voulons constater la façon dont les négociations sont utilisées pour les livraisons en amont et en aval selon les périodes de négociation autorisées. Les résultats associés aux livraisons en avance ou en retard (présenté dans les colonnes "Ecart des livraisons"), compte tenu des valeurs choisies pour les pénalités fictives d'avance/retard, montrent que les avances et

les retards sont utilisés de manière limitée par le modèle, voir tableau 2.10 : entre 18.3% (cas de la famille d'instances C2 sans heures supplémentaires et avec 1 période de négociation) et 27.9% (cas de la famille C1 sans heures supplémentaires et avec 2 périodes de négociation) pour les fournisseurs et entre 33.9% (cas de la famille C3 sans heures supplémentaires et avec 1 période de négociation) et 59.7% (cas de la famille C1 avec heures supplémentaires et 2 périodes de négociation) pour les clients.

Si nous observons ce qui se passe lorsqu'on passe de 1 période de négociation maximum à 2 périodes, on peut voir que le pourcentage de livraisons décalées d'une période (dans le tableau 2.9) est redistribué entre les livraisons décalées d'une période et de deux périodes (dans le tableau 2.10). C'est-à-dire qu'il n'y a presque pas de nouvelles livraisons décalées, à part celles qui l'étaient déjà, ce qui veut dire qu'il existe des livraisons qui sont planifiées à des moments très contraignants pour la charge ce qui induit les coûts de personnel : des heures supplémentaires ou des intérimaires.

Logiquement, les pénalités d'avance et de retard (résultats de la colonne "Pénalité de délai") sont plus grandes quand le pourcentage de livraisons décalées est plus grand.

Autres valeurs pour β (poids des pénalités d'avance/retard)

Les résultats que nous venons de présenter dépendent du poids du critère de pénalités d'avance et de retard dans la fonction objectif, critère (B). Ce poids est donné par le paramètre β que nous avons fixé à 1 au début de cette section. Pour cette raison, nous avons voulu vérifier l'influence de la valeur de β sur l'utilisation des avances et des retards autorisés et aussi sur les autres mesures de performance.

Comme nous l'avons déjà expliqué, le choix d'autoriser les heures supplémentaires est un mode de fonctionnement de la plateforme toujours gagnant, car il s'agit d'une relaxation. Par simplicité, nous avons décidé de comparer les résultats obtenus quand $\beta = 0.5$, $\beta = 1$ et $\beta = 1.5$ quand les heures supplémentaires sont toujours permises et avec toutes les familles d'instances confondues. Le tableau 2.11 montre l'évolution des livraisons décalées pour les trois valeurs de β . Les valeurs présentées dans la famille de colonnes "Lissage de charge" correspondent à la relation donnée par (F) dans la section 2.6.3, ici les approches de résolution u sont déterminées par la valeur de β (0.5, 1 ou 1.5) et le nombre maximal de périodes de négociation autorisées 0, 1 ou 2. Nous pouvons voir que quand la négociation de délai n'est pas autorisé n'importe quelle valeur de β donne le même résultat car il n'y a pas d'avance ni de retard possible si les négociations ne sont pas autorisées. Nous comptons donc 7 hypothèses de fonctionnement que nous allons évaluer.

Comme attendu, les résultats du tableau 2.11 montrent que, en moyenne, les meilleures solutions, pour le coût de personnel et pour les mesures de charge, sont obtenues avec l'hypothèse de fonctionnement avec 2 périodes de négociation et quand le poids des pénalités dans l'objectif (OBJ) est le moins important ($\beta = 0.5$). Cependant, pour le même nombre de périodes de négociation, l'augmentation attendue du coût total de personnel lorsque l'on donne plus d'importance au critère avance/retard (en augmentant β) est peu important. Nous pouvons aussi voir que la différence entre le pourcentage de livraisons décalées quand $\beta = 0.5$ et $\beta = 1.5$ est inférieur à 10%. Plus précisément, quand 1 période de négociation est autorisée, 25.2% des livraisons venant des fournisseurs sont décalées d'une période pour $\beta = 0.5$ tandis que 18% le sont pour $\beta = 1.5$ et l'impact sur le coût total de personnel est quasiment négligeable, tout comme pour les autres mesures de charge.

TABLE 2.11 – Résultats de Négociation des délais toutes instances confondues

Paramètres		Lissage de charge						Ecart de livraison							
		Mesures de charge	Coût de personnel	Pénalité de délai	Fournisseurs			Clients							
					0 périodes	1 période	2 périodes	0 périodes	1 période	2 périodes					
Beta	Négociations	Moyenne	Peak	Ecart	Total	Temporaire	Heures Sup.								
—	0	1.61	46.1	78	37.8	56.9	4.44	—	100	—	—	—	100	—	—
0.5	1	0.59	9.39	23.7	13	19.4	13.5	58.7	74.8	25.2	—	—	55.4	44.6	—
	2	0.15	2.49	2.29	0	0.53	18.4	169	70.7	17.3	12	45.8	26.7	27.5	
1	1	0.64	12.5	25.7	13.1	19.3	14.7	27.9	79.3	20.7	—	60.4	39.6	—	
	2	0.11	4.88	3.17	0.18	0.59	18.3	103	76.6	14.9	8.5	49.3	27.9	22.8	
1.5	1	0.66	14.6	26.1	13.2	19.7	14	1.54	82	18	—	63.7	36.3	—	
	2	0.15	8.05	6.35	0.26	1.35	17	84.9	79.1	13.4	7.5	54.2	24.8	21	

2.6.5 Résultats obtenus avec les négociations des délais et des quantités

Dans cette section nous analysons les résultats obtenus pour le modèle de lissage de charge avec deux types de négociations, délais et quantités, présenté dans la section 2.5.3.

Nous commençons la présentation en expliquant comment nous avons généralisé les données, initialement générées dans 2.6.2, pour pouvoir les utiliser dans cette série d'expériences. Nous introduisons aussi les nouveaux indicateurs présentés dans les tableaux de résultats concernant cette partie. Ensuite, nous évaluons l'impact de la prise en compte des négociations des quantités en plus de celle des dates de livraison en analysant les résultats des expérimentations.

Remarques préliminaires

Données

Pour effectuer les expériences du modèle 2.5.3, nous avons généralisé les instances utilisées pour le première modèle avec les négociations des délais seulement. La généralisation consiste à calculer des courbes cumulées en amont et en aval des quantités livrées de chaque famille de produits à partir des données initialement générées. Ainsi, nous avons calculé des courbes cumulées idéales des livraisons en amont et en aval avec les quantités idéales pré-négociées. Ensuite, nous donnons de la flexibilité pour les quantités livrées (pour chaque livraison pré-négociée) en introduisant des écarts autorisés par rapport aux quantités idéales de livraison. En prenant en compte les écarts maximaux et minimaux des quantités de livraison et la flexibilité sur les dates de livraison, nous sommes en mesure de calculer des courbes cumulées des livraisons au plus tôt et au plus tard en amont et en aval. Plus de détail sur la généralisation des instances est donné dans l'annexe 1.2.

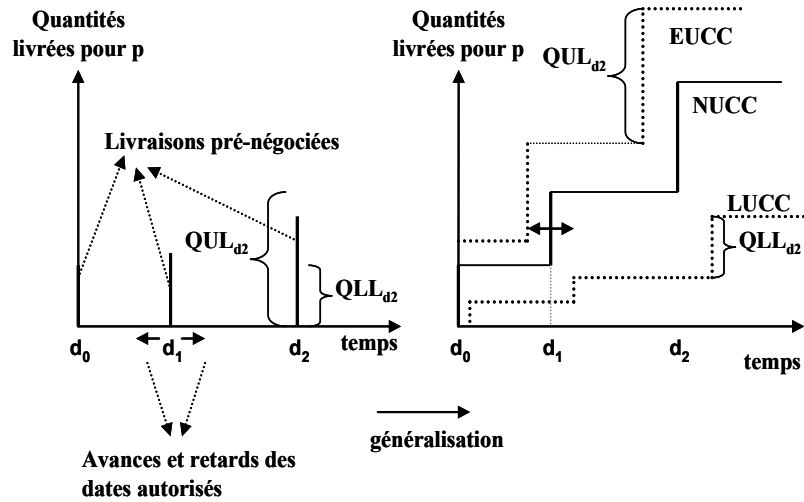


FIGURE 2.5 – Construction des courbes cumulées en amont pour un produit p

Indicateurs

Pour mieux évaluer le modèle avec les négociations des quantités, nous avons ajouté de nouveaux indicateurs aux tableaux 2.12 à 2.14. Dans ces tableaux nous présentons les résultats associés aux mêmes ensembles de critères que dans les sections précédentes, nous trouvons les mêmes familles de colonnes introduites dans la section 2.6.3. Cependant, nous avons ajouté une colonne “Pénalité des quantités” associée aux quantités de produits qui arrivent tôt ou tard par rapport aux quantités idéales qui sont données par la courbe cumulée idéale pour chaque produit. Cette pénalité est donnée par la relation (E) de la section 2.5. Dans les tableaux 2.12 à 2.14, nous avons aussi ajouté deux colonnes à la famille de colonnes “Ecart des livraisons”. La colonne “Taux de quantité” (une pour les fournisseurs et une deuxième pour les clients) donne le pourcentage moyen (sur l’ensemble de produits) de produits arrivées en avance et en retard par rapport aux courbes cumulées idéales de chaque produit, pour les 6 hypothèses de fonctionnement de la plateforme décrites dans 2.6.3.

Résultats

Il est à noter que les négociations de dates changent les courbes cumulées idéales d’arrivée et de départ des produits, même si on ne négocie pas les quantités. Cela peut être observé dans la figure 2.5, si une livraison est avancée ou retardée alors la courbe cumulée obtenue sera différente de la courbe cumulée idéale (*NUCC* dans la figure).

L’écart entre les courbes idéales et les courbes obtenues par une solution, est pénalisée dans la fonction (OBJ’) du modèle avec les négociations des dates et des quantités, mais pas dans l’objectif (OBJ) du modèle avec les négociations des dates seulement. De ce fait, nous ne pouvons pas comparer les résultats obtenus quand nous autorisons les deux types de négociations 2.5.3 avec les résultats du modèle avec la négociation des délais seulement 2.5.2.

Ainsi, pour pouvoir évaluer l’impact que la négociation des quantités a sur les différents critères économiques et sur le lissage de charge, il faut comparer le modèle avec des négociations des quantités avec le même modèle sans négociations des quantités. Pour ce faire, nous avons fait deux séries d’expériences avec les mêmes familles d’instances et avec le modèle de négociation des délais et des quantités 2.5.3.

Dans la première série d’expériences, voir tableau 2.12, nous fixons à zéro les négociations des quantités, pour cela nous avons fixé $QLL_{d,p} = QUL_{d,p} = QP_{d,p} \forall d, \forall p$ (bornes supérieures des quantités livrées égales aux bornes inférieures pour tout produit et pour toute livraison), mais nous avons toujours les courbes cumulées au plus tôt, au plus tard et idéales pour les fournisseurs et les clients. Quand une livraison arrive en avance ou en retard, la courbe cumulée négociée est différente de la courbe cumulée idéale et cela induit des pénalités d’écart des quantités livrées dans la fonction objectif (OBJ)’. Dans la deuxième série d’expériences, voir tableau 2.13, nous introduisons les négociations des quantités en vérifiant l’inégalité suivante pour au moins un produit et une livraison : $QLL_{d,p} < QP_{d,p} < QUL_{d,p}$.

Négociation des quantités non autorisée ($QLL_{d,p} = QUL_{d,p} = QP_{d,p}$)

Les résultats du tableau 2.12 (avec zéro négociation de quantités) montrent que pour n’importe quel agencement la meilleure hypothèse de fonctionnement de la plateforme est celle avec deux périodes de négociation de délai et avec les heures supplémentaires, pour les coûts de personnel et pour les indicateurs de charge. Dans ce cas, les pourcentages donnés dans la colonne “Taux de quantités” sont seulement associés aux décalages des livraisons dans le temps. Cela veut dire que plus de livraisons sont décalées, plus grand est le pourcentage de décalage des quantités par rapport aux courbes cumulées idéales.

TABLE 2.12 – Résultats des négociations de délais et de quantités ($\forall d, \forall p \quad QLL_{d,p} = QUL_{d,p} = QP_{d,p}$, $\beta = 1, \eta = 1$)

Agencements	Paramètres		Lissage de charge					Pénalité de délai	Pénalité de quantité	Ecart des livraisons								
	Négociations	Heures Sup.	Mesures de charge		Ecart	Coût de personnel				Fournisseurs			Clients					
			Moyenne	Peak		Total	Temporaire			Heures Sup.	0 périodes	1 période	2 périodes	Taux de quantité	0 périodes	1 période	2 périodes	Taux de quantité
C1	0	n	2.52	22.9	61.9	46.4	68.9	—	—	—	100	—	—	—	100	—	—	—
		o	2.41	22.4	57.3	45.0	51.5	9.50	—	—	100	—	—	—	100	—	—	—
	1	n	0.86	5.39	23.5	15.8	34.6	—	5.22	5.49	76.9	23.1	—	0.75	65.3	34.7	—	1.42
		o	0.76	5.31	18.5	14.4	16.6	10.1	2.48	3.49	77.5	22.5	—	0.74	64.5	35.51	—	1.45
	2	n	0.30	3.76	4.46	1.47	18.3	—	133	138	71.6	12.9	15.5	1.35	48.7	29.2	22.1	3.17
		o	0.21	0.64	0.19	0.01	0	8.62	86.5	103	74.7	13.4	11.9	1.19	54.8	25.6	19.6	2.99
C2	0	n	1.95	33.0	64.3	36.4	70.9	—	—	—	100	—	—	—	100	—	—	—
		o	1.68	32.9	53.9	34.6	44.4	4.24	—	—	100	—	—	—	100	—	—	—
	1	n	1.04	10.3	26.3	14.6	44.5	—	26.1	11.3	83.9	16.1	—	0.41	74.8	25.2	—	1.13
		o	0.66	9.55	17.1	13.1	15.8	14.7	7.31	6.99	84.5	15.5	—	0.39	76	24	—	1.09
	2	n	0.67	7.58	11.5	4.51	32.4	—	199	147	77.2	17.1	5.7	0.74	65.6	18.5	15.9	2.11
		o	0.14	4.49	1.39	0.31	0	12.3	83.7	79.6	82.4	12.3	5.3	0.61	70.9	16.2	12.9	1.99
C3	0	n	1.39	20.7	89.6	28.2	111	—	—	—	100	—	—	—	100	—	—	—
		o	1.14	19.9	56.5	25.3	48.3	8.56	—	—	100	—	—	—	100	—	—	—
	1	n	0.73	4.37	60.9	12.8	89.6	—	68.8	14.7	86.3	13.7	—	0.36	80.1	19.9	—	0.74
		o	0.48	4.14	13.9	7.85	13.2	24.7	96.0	41.6	84.3	15.7	—	0.42	75.6	24.4	—	0.86
	2	n	0.34	3.36	46.6	5.3	79.6	—	96.5	107	81.4	13.4	5.2	0.67	71.8	13.3	14.9	1.56
		o	0.26	2.89	1.07	0.83	2.22	18.8	181	143.8	79.1	16.4	4.5	0.68	67.1	18.4	14.5	1.73

Nous pouvons aussi observer que, comme dans les résultats précédents avec négociation des dates seulement, les pourcentages de livraisons décalées est plus grand pour les clients que pour les fournisseurs, mais cela est sûrement associé aux pénalités d'avance/retard. Quand nous n'autorisons pas la négociation des quantités livrées, nous pouvons voir que l'écart des quantités par rapport aux courbes cumulées idéales, est inférieur à 1.35% pour les fournisseurs et à 3.17% pour les clients, les deux valeurs sont obtenues pour le premier agencement et avec l'approche de résolution avec négociation de délais de deux périodes maximum et sans heures supplémentaires.

Les négociations de délais sont utilisées entre 13.7% (cas de la famille d'instances *C3* avec une période de négociation de délai maximum et sans heures supplémentaires) et 28.4% (famille *C1* avec deux périodes de négociation de délai et sans heures supplémentaires) pour les fournisseurs et entre 19.9% (famille *C3* avec une période de négociation de délai et sans heures supplémentaires) et 51.3% (famille *C1* avec deux périodes de négociation et sans heures supplémentaires) pour les clients. Le fait de pénaliser les avances et les retards des livraisons non seulement en temps de retard mais aussi en quantités, provoque une chute de l'utilisation des négociations des délais si on la compare aux taux d'utilisation du tableau 2.10.

Négociation des quantités autorisée ($QLL_{d,p} < QP_{d,p} < QUL_{d,p}$)

Quand la négociation des quantités est autorisée, résultats du tableau 2.13, nous pouvons toujours dire que la meilleure hypothèse de fonctionnement, pour les mesures de charge et pour les coûts de personnel, est celle avec 2 périodes de négociation de délais maximum et avec heures supplémentaires, et ce pour toutes les familles d'instances.

Le pourcentage (colonne taux de quantités) d'écart des produits par rapport aux courbes cumulées idéales reste très limité, 3.47% (famille *C1* pas de négociation de délai et avec heures supplémentaires) pour les fournisseurs et 8.58% (famille *C1* avec une période de négociation de délai maximum et avec heures supplémentaires) pour les clients, mais ces pourcentages sont plus grands que ceux obtenus quand les négociations des quantités ne sont pas permises, à savoir 1.35% et 3.17% (voir tableau 2.12); nous pouvons conclure que des variations limitées des quantités en plus des variations des délais peuvent induire des réductions importantes des coûts.

Le pourcentage d'utilisation des négociations de délais est situé entre 7.3% (famille *C3* avec deux périodes de négociation et avec heures supplémentaires) et 24.7% (famille *C1* avec une période de négociation et avec heures supplémentaires) pour les fournisseurs et entre 16.2% (famille *C3* avec deux périodes de négociation et avec heures supplémentaires) et 51.1% (famille *C1* avec deux périodes de négociation et avec heures supplémentaire) pour les clients. Ces pourcentages ne varient pas beaucoup par rapport à ceux obtenus avec les négociations des délais seulement, voir tableau 2.12. la flexibilité apportée par les négociations des quantités ne vient pas remplacer celle donnée par la négociation des délais, notre modèle utilise tous les moyens mis à sa disposition pour réduire les coûts.

Impact des négociations des quantités

Puisque les approches de résolution quand les heures supplémentaires sont permises donnent toujours les meilleurs résultats, nous avons décidé de fixer le paramètre "Heures supplémentaires" à 'oui' (o) pour les résultats présentés dans le tableau 2.14. A lieu du paramètre "Heures Supplémentaires" nous ajoutons le paramètre "Quantités" à la famille de colonnes "Paramètres". Ici nos 6 hypothèses de fonctionnement sont données par les valeurs des négociations des délais 0, 1 ou 2 et par les négociations des quantités qui sont autorisées ou non.

TABLE 2.13 – Résultats des négociations de délai et de quantités ($\forall d, \forall p \quad QLL_{d,p} \leq QP_{d,p} \leq QUL_{d,p}$, $\beta = 1, \eta = 1$)

Agencements	Paramètres		Lissage de charge						Pénalité de délai	Ecart des livraisons							
	Négociations	Heures Sup.	Mesures de charge			Coût de personnel				Fournisseurs			Clients				
			Moyenne	Peak	Ecart	Total	Temporaire	Heures Sup.		0 périodes	1 période	2 périodes	Taux de quantité	0 périodes	1 période	2 périodes	Taux de quantité
C1	0	n	1.56	23.1	81.1	37.8	92.9	—	21.9	—	100	—	—	3.37	100	—	7.31
		o	1.42	21.7	65.4	35.7	58.1	15.3	39.2	—	100	—	—	3.47	100	—	7.68
	1	n	0.59	8.27	38.3	13.8	55.7	—	66.9	5.33	80.1	19.9	—	2.82	59.2	40.8	7.85
		o	0.49	5.74	18.8	11.3	19.4	24.6	98.4	12.5	75.3	24.7	—	3.02	56.6	43.4	8.58
	2	n	0.34	4.55	24.2	5.93	43.9	—	178	75.6	74.4	15.9	9.7	3.16	58.7	25.3	8.82
		o	0.17	1.96	1.84	1.19	3.66	15.2	269	102	77.2	12.6	10.2	3.44	49.9	27.4	9.69
C2	0	n	1.34	26.2	102	30.4	113	—	9.85	—	100	—	—	1.39	100	—	2.20
		o	1.04	22.3	67.1	27.7	52.4	3.36	21.7	—	100	—	—	1.47	100	—	2.48
	1	n	0.79	10.9	47.3	16.2	84.5	—	96.5	255	77.7	22.3	—	1.45	70.5	29.5	3.58
		o	0.48	3.99	13.4	8.37	11.0	12.2	117	35.4	85.9	14.1	—	1.70	78	22	3.94
	2	n	0.50	7.39	31.2	2.64	66.4	—	109	209	81.8	12.3	5.9	1.55	70.8	16.7	3.72
		o	0.21	3.48	3.72	2.63	1.96	19.4	176	58.5	87.6	10.2	2.2	1.85	78.1	13	4.38
C3	0	n	0.62	31.4	105	17.2	160	—	9.53	—	100	—	—	0.51	100	—	2.56
		o	0.61	25.1	29.0	12.9	25.3	6.56	98.8	—	100	—	—	0.66	100	—	3.08
	1	n	0.50	15.6	80.7	10.8	153	—	56.7	142	81.6	18.4	—	0.82	81	19	2.71
		o	0.28	6.71	10.9	5.32	10.2	10.8	107	34.4	89.7	10.3	—	0.78	82.5	17.5	3.21
	2	n	0.39	12.9	72.8	4.02	144	—	71.9	171	87.9	7.83	4.29	0.90	78.2	13.4	3.10
		o	0.27	0.79	0.25	0.26	0	16.8	117	132	92.7	6.4	0.9	0.85	83.8	11.6	3.69

TABLE 2.14 – Résultats des négociations de délai et de quantités ($\beta = 1, \eta = 1$)

	Lissage de charge						Ecart des livraisons											
	Paramètres	Mesures de charge	Coût de personnel		Pénalité de délai	Pénalité de quantité	Fournisseurs				Clients							
	Négociations	Quantités	Moyenne	Peak			Ecart	Total	Temporaire	Heures Sup.	0 périodes	1 période	2 périodes	Taux de quantité				
C1	0	n o	3.18 1.48	61.9 19.5	200 65.4	120 35.7	184 58.1	20.2 27.3	— —	— 513	100 100	— —	— —	— —	— —	— 7.68		
	1	n o	1.42 0.55	41.3 3.81	126 18.8	73.8 11.4	117 19.4	22.2 36.4	19.2 27.5	2.65 510	77.5 75.3	22.5 24.7	— —	0.74 3.02	64.5 56.6	35.5 43.4	— —	1.46 8.58
	2	n o	0.87 0.23	36.1 0.11	87.5 1.84	50.9 1.22	83.2 3.66	21.7 26.9	112 141	102 644	74.7 77.2	13.4 12.6	11.9 10.1	1.19 3.44	54.8 49.9	25.6 27.4	19.6 22.7	2.99 9.69
C2	0	n o	2.37 0.99	55.7 23.3	206 66.1	84.2 27.6	199 52.4	6.65 34.6	— —	— 275	100 100	— —	— —	— 1.47	100 100	— —	— —	— 2.48
	1	n o	1.34 0.43	30.8 4.89	135 12.6	53.0 8.29	135 11.0	17.4 45.3	125 57.1	20.5 398	84.5 85.9	15.5 14.1	— —	0.39 1.70	76 78	24 22	— —	1.09 3.94
	2	n o	0.82 0.15	24.5 4.41	90.8 2.96	32.8 2.56	89.2 1.96	15.0 53.9	241 93.5	94.4 471	82.4 87.6	12.3 10.2	5.3 2.2	0.61 1.85	70.9 78.1	16.2 13	12.9 8.9	1.99 4.38
C3	0	n o	1.72 0.43	53.5 27.3	116 29.0	50.1 12.9	117 25.3	12.1 36.0	— —	— 250	100 100	— —	— —	— 0.66	100 100	— —	— —	— 3.08
	1	n o	1.06 0.10	35.1 8.96	57.9 10.9	28.6 5.34	66.6 10.2	28.3 41.9	293 29.2	5.03 264	84.3 89.7	15.7 10.3	— —	0.42 0.78	75.6 82.5	24.4 17.5	— —	0.86 3.21
	2	n o	0.84 0.09	33.2 3.05	38.4 0.25	17.9 0.29	46.3 0	22.5 50.4	516 86.3	98.0 305	79.2 92.7	16.3 6.4	4.5 0.9	0.68 0.85	67.1 83.8	18.4 11.6	14.5 4.6	1.74 3.69

Nous notons que l'hypothèse de fonctionnement avec deux périodes de négociation de délai et avec des négociations des quantités donne les meilleurs résultats pour les mesures de charge et les coûts de personnel pour les trois agencements de plateforme. La négociation des quantités a un impact non négligeable sur le coût de personnel. Par exemple, pour la famille d'instances *C2*, quand aucun type de négociation n'est permis, l'écart entre la valeur du coût total et la valeur minimale obtenue entre les 6 hypothèses de fonctionnement est égal à 84.2%. Cette valeur décroît à 27.6% quand la négociation des quantités est autorisée, ce qui veut dire que le fait d'autoriser la négociation des quantités réduit considérablement le coût total de personnel. Par ailleurs, le pourcentage d'écart des volumes des produits (entre les courbes cumulées) est relativement petit (1.47% pour les fournisseurs et 2.48% pour les clients). Pour les familles *C2* et *C3*, quand la négociation des quantités est autorisée, le pourcentage de livraisons décalées diminue ainsi que la pénalité de délai. Par exemple, pour la famille *C2* avec une période de négociation de délai et quand la négociation des quantités n'est pas permise, pour les fournisseurs le pourcentage de livraisons non décalées est 84.5% et il est 85.9% quand la négociation des quantités est autorisée.

Par ailleurs, quand les négociations des quantités sont permises, le taux de quantités décalées ainsi que leur pénalité augmente en considérant les mêmes modèles. En conclusion, la négociation des quantités a un effet très positif dans le lissage de charge et sur le coût de personnel, ceci est intéressant quand on constate que seulement un petit pourcentage de produits est décalé (moins de 8.58%).

2.7 Conclusion du chapitre

L'étude d'un problème industriel, qui consiste à mieux organiser le travail pendant les périodes de pointe pour réduire les coûts de personnel, nous a permis de mettre en place des approches de résolutions génériques pour des structures de production et de plateformes logistiques où le lissage de charge s'avère nécessaire. Dû au caractère moyen terme de notre problème décisionnel, ces approches de résolution sont des modèles linéaires génériques qui peuvent être résolues avec des solveurs de programmation linéaire du marché comme CPLEX.

Nos modèles linéaires admettent des négociations des dates et des quantités des livraisons en amont et en aval de la plateforme, et ils ont été évalués avec différentes hypothèses de fonctionnement de la plateforme. Pour l'ensemble d'instances que nous avons généré, l'évaluation expérimentale montre l'intérêt des négociations dans l'amélioration du lissage de charge et dans la réduction du coût de personnel. Les résultats ont aussi montré que dans les solutions, les négociations étaient utilisées de manière limitée (i.e. des variations raisonnables des dates de livraison et des quantités livrées sont utilisées par le modèle). Les hypothèses de fonctionnement de la plateforme incluent différentes hypothèses sur le type de négociations qui sont admises par les partenaires et des hypothèses sur la manière de gérer le travail des ressources humaines.

L'analyse de la littérature, concernant l'optimisation des plateformes logistiques (dans la section 1.1.3 du chapitre 1) et le lissage de charge dans des centres de production, montre que ce type de problème, qui combine le lissage de charge avec des négociations et la gestion de l'organisations du travail, n'a pas été traité auparavant à notre connaissance.

Nos modèles peuvent être considérés comme des outils d'aide à la décision efficaces pour les managers des plateformes logistiques qui peuvent comparer différents agencements et organisations du travail dans la plateforme. Ils peuvent aussi évaluer la réduction potentielle des coûts associés à différentes valeurs des paramètres comme le nombre maximal de périodes d'avance

et de retard pour les livraisons. Malheureusement, pour l'entreprise de chaussures considérée, SAVAT, il n'a pas été possible de faire une comparaison convenable des agencements de plateforme, la raison est qu'une modification d'agencement entraîne la modification des durées de traitement des opérations ainsi que des coûts et des niveaux d'efficacité associés et nous n'avons pas les connaissances nécessaires pour générer des durées opératoires réalistes pour les différents agencements associés à notre plateforme d'application soumise aux mêmes contraintes de charge.

Finalement, nous pouvons noter que nos modèles pour le lissage de charge peuvent aussi être utilisés pour des sites de production, éventuellement des versions simplifiées. Ainsi, notre modèle peut être adapté pour les négociations de dates et des quantités à l'intérieur de la chaîne logistique avec des nœuds productifs et des plateformes logistiques.

Chapitre 3

Ordonnancement pour plateforme de préparation de commandes

Dans ce chapitre nous étudions un problème d'ordonnancement qui nous a été inspiré par la plateforme de l'entreprise SAVAT mais aussi par une plateforme de préparation d'expédition de magazines. Au niveau de la chaîne logistique, ce problème se trouve dans les plateformes de préparation de commandes où des arrivées de produits sont prévues à des dates connues et où de nombreuses façons d'effectuer les livraisons sont identifiées. Dans cette partie d'ordonnancement, nous faisons plusieurs hypothèses pour les départs des livraisons aux clients et nous cherchons à minimiser des critères associés à chacune de ces hypothèses ; notre problème consiste à ordonnancer les activités de préparation de commandes en respectant les contraintes induites par les arrivées de produits et les départs des camions.

Ce problème d'ordonnancement combine deux hypothèses qui ont déjà été étudiées dans la littérature et qui sont NP-difficiles : l'ordonnancement avec des ressources consommables et l'ordonnancement avec des dates de livraison fixes. A notre connaissance, la combinaison de ces deux hypothèses n'a pas été traitée auparavant. Cela constitue l'originalité de notre problème.

Nous développons une Procédure par Séparation et Evaluation utilisant un schéma de branchement classique pour résoudre ces nouveaux problèmes. Des bornes inférieures ainsi que des méthodes approchées polynomiales sont conçues.

Dans ce chapitre, nous commençons par donner la description du problème d'ordonnancement que nous étudions. Ensuite, nous analysons les travaux de la littérature concernant les problèmes d'ordonnancement avec des ressources consommables et/ou avec des dates de livraison fixes. Nos approches de résolution sont données ensuite. Enfin, les résultats de nos expérimentations sont présentés.

Les travaux de ce chapitre ont été présentés à deux conférences internationales Carrera *et al.* [32] et Carrera *et al.* [31]

Contents

3.1	Introduction	79
3.2	Motivation industrielle	79
3.3	Etat de l'art	80
3.3.1	Ordonnancement sous contrainte de ressources consommables	81
3.3.2	Ordonnancement avec des dates de livraison fixes	82
3.4	Définition du problème	82
3.5	Méthodes de résolution	84
3.6	Modèle de programmation linéaire mixte	84

3.7	Procédure par Séparation et Evaluation (PSE)	87
3.7.1	Présentation générale des Procédures par Séparation et Evaluation	87
3.7.2	Méthodes approchées polynomiales	88
3.7.3	Bornes inférieures	96
3.7.4	Schéma des Procédures par Séparation et Evaluation proposées	110
3.7.5	Règles de dominance	112
3.8	Expériences	115
3.8.1	Génération de données	115
3.8.2	Etude comparative des bornes inférieures et des méthodes approchées rapides	116
3.8.3	Résultats des méthodes de résolution exactes	119
3.9	Conclusion du chapitre	123

3.1 Introduction

L'étude bibliographique concernant les plateformes logistiques dans la section 1.1.3 du Chapitre 1, montre que la plupart de problèmes décisionnels, traités dans la littérature, concernant les plateformes logistiques et les entrepôts se centrent autour de quatre problématiques : l'organisation interne de l'entrepôt, la politique de rangement, la politique de picking et la politique de regroupement des commandes ou batching. Cependant, d'autres problèmes peuvent être traités dans ces structures. Dans le chapitre 2, nous avons étudié des problèmes de planification rencontrés dans les plateformes logistiques, ces problèmes concernent la planification de l'utilisation des ressources humaines dans les entrepôts, les négociations avec les partenaires en amont et en aval, et le lissage de charge.

Dans les entrepôts, au niveau opérationnel, en général les problèmes d'ordonnancement consistent à déterminer les politiques optimales de picking (des fois combiné à la détermination de politiques de réapprovisionnement) et le regroupement de commandes selon différents critères. On pourrait penser à ce qui se passe une fois que le batching de commandes et le picking respectif a été fait, il faut trier et regrouper les produits pour chaque commande et organiser la livraison des commandes dans les délais. Pour ce dernier problème, il est nécessaire de prendre en compte la disponibilité des ressources (humaines ou matérielles) qui sont chargées de préparer les commandes quand les produits (composants) sont disponibles.

Dans ce chapitre, nous nous plaçons dans le contexte d'une plateforme de préparation de commandes, cette plateforme a des arrivées de composant déjà prévues au niveau de la planification. La manière de travailler de la plateforme, quant au personnel et aux machines de préparation des commandes, est connue. Les politiques de distribution de la plateforme ainsi que les demandes des magasins (en termes de quantités de chaque composant, des durées de préparation et des pénalités de retard), sont aussi connues. Le problème que nous étudions dans ce chapitre est celui de l'ordonnancement de la préparation des commandes, tout en prenant en compte la disponibilité des composants, les caractéristiques techniques de la plateforme et la façon dont la distribution est organisée. Ce problème combine deux caractéristiques qui n'ont pas été traitées conjointement dans la littérature pour des problèmes d'ordonnancement.

Nous imaginons différentes façons d'organiser la distribution dans la plateforme, les critères que nous cherchons à optimiser dépendent de la politique de livraison adoptée dans chaque cas. Nous proposons et testons des méthodes approchées et exactes pour ces problèmes d'ordonnancement.

3.2 Motivation industrielle

Notre étude a été motivée par une plateforme logistique de distribution. Il s'agit de l'entreprise de distribution de chaussures SAVAT qui a inspiré nos travaux de planification prévisionnelle dans le chapitre 2 et dont la structure a déjà été décrite dans la section 2.2.

Dans le niveau tactique, nous avons considéré les flux en amont (livraisons des fournisseurs) comme étant légèrement flexibles, mais au niveau opérationnel, les flux en amont sont fixés et les arrivées des produits peuvent être représentées par des courbes cumulées en forme d'escalier qui sont connues, voir figure 3.1. Par ailleurs, l'entreprise de chaussures possède les magasins et gère complètement l'organisation des tournées de distribution entre la plateforme et les magasins. Dans le but d'optimiser le coût des tournées de véhicule associées à la distribution, des tournées optimisées peuvent être calculées pour des sous-ensembles de magasins (regroupés par régions, par exemple), des dates et des quantités idéales, supposées connues, peuvent être associés aux

tournées planifiées.

Notre problème concerne la préparation des commandes des magasins. Dans la plateforme de notre application, nous distinguons deux types d'opérations associées à la préparation d'une commande : le premier type est le cross-docking quand les produits passent par la plateforme sans aucun conditionnement ; le deuxième type correspond à l'assemblage qui consiste à regrouper différents produits avant de les livrer ensemble au même magasin. Les commandes préparées doivent être livrées selon les dates de livraison préfixées qui correspondent aux tournées optimisées.

Dans notre problème d'ordonnancement, chaque commande représente un job à ordonnancer. Une commande contient une liste de produits. Une liste de paramètres est associée à chaque type de produit, par exemple la quantité du produit contenue dans la commande. L'objectif est d'ordonnancer la préparation des commandes des magasins sous contraintes en amont et en aval. En amont, on doit considérer la contrainte de disponibilité des composants, c'est-à-dire que les courbes cumulées d'arrivée de composants ne doivent pas être dépassées par l'utilisation des composants pour constituer les commandes. En aval, les dates idéales des tournées imposent des instants de livraison de commandes bien précis.

On peut trouver d'autres applications industrielles qui induisent des problèmes d'ordonnancement similaires à celui que nous venons de décrire. Par exemple, un petit atelier, localisé près de Nancy, reçoit des magazines et des documents de publicité ; ces articles doivent être regroupés et enveloppés dans du plastique, éventuellement complétés avec des gadgets et des étiquettes avec les adresses de destination (magasins ou consommateurs privés) avant d'être livrés par des camions. Chaque jour, un camion de la poste effectue une livraison à une heure fixe (16h00) ; une deuxième livraison est effectuée par un camion privé pour les commandes qui n'ont pas pu partir à 16h00, ce deuxième camion quitte l'atelier à une heure flexible qui dépend de la date de fin du dernier job urgent de la journée. Quelques jobs associés seulement à des documents de publicité ont un délai relativement long entre l'arrivée des composants nécessaires pour sa constitution et leurs dates dues, tandis que d'autres jobs, associés aux magazines ont des dates de livraison optimales bien déterminées. Cet atelier possède quatre machines parallèles très complexes qui exécutent de manière synchronisée une série d'opérations sur des lots de produits.

3.3 Etat de l'art

La littérature associée à notre problème concerne les études au niveau de l'ordonnancement dans les plateformes logistiques et les entrepôts, en particulier les plateformes qui prennent en compte les activités de préparation de commandes ou d'assemblage. Nous nous intéressons aussi aux études d'ordonnancement menées avec les hypothèses que nous étudions dans notre problème, à savoir l'ordonnancement avec des ressources consommables ou non-renouvelables et l'ordonnancement avec des dates de livraison fixes.

Dans cette section, nous ne parlons pas des problèmes d'ordonnancement des plateformes logistiques en général car cela a déjà été rappelé dans le premier chapitre de cette thèse 1.1.3. Nous avons vu que cela concerne surtout l'ordonnancement des activités de picking et batching, mais aussi l'ordonnancement des tâches de plateformes qui pratiquent le cross-docking mais qui ne prennent pas en compte des activités de composition de commandes ni les caractéristiques des arrivées et ni celles concernant les départs des tournées d'expédition.

Dans cette partie, nous présentons dans un premier temps les aspects étudiés dans la litté-

rature concernant le type de plateformes auxquelles nous nous intéressons. Puis, nous analysons les travaux de la littérature qui intègrent les hypothèses de nos problèmes d'ordonnancement.

3.3.1 Ordonnancement sous contrainte de ressources consommables

Dans la plupart de problèmes d'ordonnancement avec des contraintes de ressources, deux types de ressources sont distinguées : ressources renouvelables et non-renouvelables (ou consommables). Puisque les composants dans le nœud de la chaîne logistique sont considérés comme consommables, nous nous concentrons sur ce type de ressources dans notre analyse bibliographique. Blazewicz *et al.* [14] et Blazewicz *et al.* [16] ont identifié deux problèmes où l'allocation de ressources contraignantes a été considérée, ces problèmes sont : l'ordonnancement de projet avec des contraintes associées aux ressources (RCPSP, Brucker *et al.* [23]) et l'ordonnancement de machine.

Les travaux de Carlier et Rinnooy Kan [28] et Carlier [26] associent les ressources consommables aux ressources financières en raison des similarités observées dans les contraintes de disponibilité que ces deux types de ressources induisent. Carlier [26] prouve que le problème d'ordonnancement de projet (RCPSP) avec des ressources financières et avec des contraintes de précedence arbitraires est polynomial si l'on ne considère pas de machine (ou autre ressource renouvelable) ; Carlier [26] démontre que ce problème devient NP-difficile si l'on admet la production et la consommation de ressources. Patterson *et al.* [116] proposent une procédure exacte pour résoudre le problème d'ordonnancement de projet avec des hypothèses d'interruptibilité des opérations, des contraintes de précedence et de ressources qui peuvent être produites et consommées. Carlier *et al.* [27] ont étudié le problème d'ordonnancement de projet où des unités de ressource peuvent être produites et consommées lors de l'exécution de certains événements. Les auteurs proposent un algorithme de liste pour minimiser la durée totale d'ordonnancement (makespan).

Carlier [26] fournit plusieurs résultats de complexité pour le problème d'ordonnancement non interruptible d'une machine avec des contraintes financières. Il montre que ce problème est NP-difficile quand les temps de traitement des jobs ne sont pas tous égaux à 1. Slowinski [136] traite l'ordonnancement interruptible dans un environnement de machines parallèles avec des contraintes financières. Dans ce papier, l'auteur suppose que le taux de consommation des ressources financières est constant pendant le traitement des jobs ; l'auteur propose une procédure exacte à deux phases utilisant la programmation linéaire pour minimiser la durée totale de l'ordonnancement (notée C_{max}).

Cochand *et al.* [44] considèrent des ressources consommables dont l'approvisionnement varie avec le temps (i.e. en escalier ou linéaire par morceaux), les auteurs généralisent l'algorithme à deux-phases pour machines parallèles, avec l'hypothèse de splitting et pour ce type de ressources. Toker *et al.* [146] étudient l'ordonnancement d'une machine avec une seule ressource financière dont l'approvisionnement est continu à un taux constant. Toker *et al.* montrent que ce problème est équivalent à un flowshop à deux machines sans ressources financières, ils résolvent le problème avec l'algorithme de Johnson [86]. Xie [156] généralise le résultat précédent au problème d'ordonnancement à une machine avec plusieurs ressources financières, où chaque ressource arrive de manière continue avec un taux d'arrivée différent.

Gafarov et Lazarev [62] étudient le problème d'ordonnancement de machine avec une ressource consommable dans le cadre de la minimisation de la somme des retards. Ils fournissent des résultats de complexité pour différentes variantes de ce problème.

3.3.2 Ordonnancement avec des dates de livraison fixes

Matsuo [104] a introduit un environnement où les dates de livraison sont fixées et données *a priori* et ne dépendent pas des jobs à ordonnancer. Matsuo a montré que les problèmes d'ordonnancement qui minimisent la somme pondérée des retards et le retard total, avec des dates d'expédition fixes, sont NP-difficiles. Dans Hall *et al.* [77], pour toute une variété d'objectifs, les auteurs fournissent soit un algorithme polynomial ou une preuve de complexité de problèmes NP-difficiles au sens fort, des problèmes avec des dates de livraison fixes. Chhajer [42] étudie le problème où il y a deux dates de livraison fixes qui sont données à des intervalles égaux. Chhajer montre que ce problème est NP-difficile quand l'objectif est de minimiser la somme des pénalités d'avance ou l'avance maximale. Des bornes inférieures et supérieures sont développées et testées pour ce problème. Yang [157], pour sa part, étudie le problème où des dates de livraison de batches sont fixées *a priori*. Les batches sont constitués des jobs qui sont déjà finis et qui attendent d'être livrés à la prochaine tournée. L'auteur minimise la somme pondérée des temps écoulés entre la fin d'exécution des jobs et l'instant où ils sont livrés. Il montre que ce problème est NP-difficile au sens fort.

Notre travail propose de combiner ces trois problèmes d'ordonnancement : ordonnancement avec des contraintes de ressources financières, ordonnancement de préparation de commande et ordonnancement avec des dates de livraison fixes. A notre connaissance, ce problème n'a pas été traité auparavant. Une synthèse des résultats de complexité pour ces problèmes est présentée dans l'annexe 2.

3.4 Définition du problème

Un ensemble N de n jobs indépendants, qui correspondent à des préparations de commandes, doit être traité par la plateforme. Nous supposons que l'interruptibilité des jobs n'est pas permise. Toutes les ressources de la plateforme, humaines ou matérielles comme les machines, peuvent gérer seulement un job à la fois. Chaque job est considéré comme prêt pour être traité quand tous les composants nécessaires pour l'exécution du job sont disponibles. Ces composants sont alors consommés par l'exécution du job. Nous notons p_j (> 0) le temps de traitement du job j . Chaque job $j \in N$ consomme $a_{j,k}$ (≥ 0) unités de composant k au début de l'exécution du job j . Les composants arrivent à des dates différentes avec les livraisons des fournisseurs, nous notons $T_{h,k}$ la h -ième arrivée du composant k . L'arrivée de chaque composant peut être représentée comme une courbe cumulée en forme d'escalier notée CCA_k et où $CCA_{t,k}$ indique la quantité totale de composant k arrivée jusqu'à l'instant t , incluant les éventuelles arrivées de composant en t . Dans la notation $\alpha/\beta/\gamma$ (c.f. Graham *et al.* [70]), nous désignons cette contrainte par $Stairs(nc)$, où nc ressources consommables sont définies par des courbes cumulées d'arrivées en forme d'escalier, voir figure 3.1.

Dans ce chapitre, nous faisons plusieurs hypothèses pour les livraisons des commandes. Dans le cas le plus général, nous avons des dates de livraison fixes D_1, D_2, \dots, D_f , chacune de ces dates correspond à une tournée optimisée associée à un sous-ensemble de consommateurs (clients). Eventuellement, à une dernière date (flexible) de livraison, après D_f , les jobs restants pourraient être distribués à la fin de l'ordonnancement ($Cmax$). A chaque date de livraison D_d , toute commande déjà préparée, et qui est destinée au sous-ensemble de clients desservis par la tournée de livraison, est chargée dans les camions qui font la livraison à cet instant. Nous ne considérons pas de limite de capacité pour chaque livraison, ceci sera discuté dans les perspectives de cette thèse. Comme dans Hall *et al.* [77], nous notons \hat{C}_j la date à laquelle le job j est livré. Cette

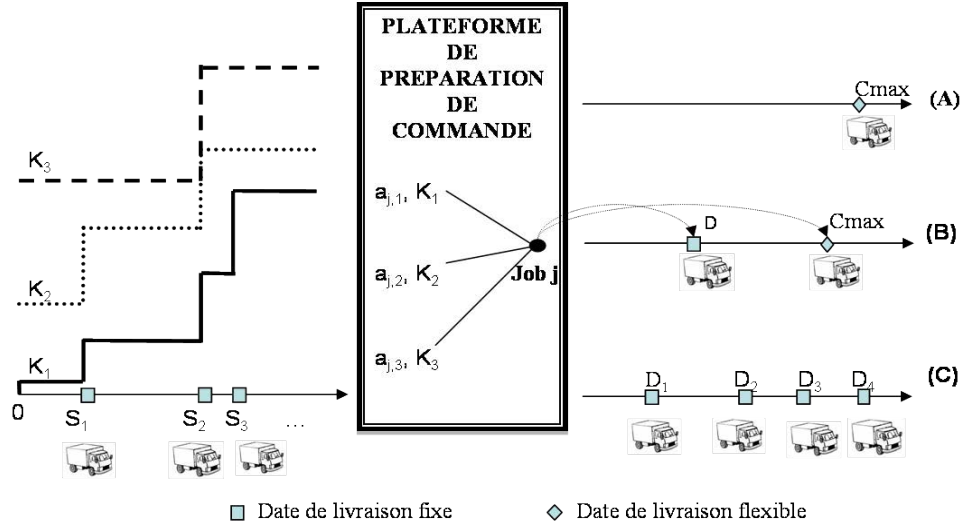


FIGURE 3.1 – Flux externes d'un nœud de la chaîne logistique

date correspond à la première date de livraison qui suit la fin de l'exécution du job, C_j . Une pénalité w_j est associée à chaque job j , elle représente une estimation de la perte de ventes par unité de temps quand la commande arrive en retard chez le magasin.

Dans ce chapitre, nous supposons que chaque tournée visite tous les clients et nous considérons trois hypothèses pour les dates de livraison, voir figure 3.1.

Avec l'hypothèse (A), il y a une seule date de livraison flexible à la fin de l'exécution du dernier job (alors le nombre de tournées fixes, f est égal à 0). En fait, cette date correspond au critère $Cmax$ (ici, $\hat{C}_j = Cmax$ pour tout j). Ainsi, tous les jobs sont considérés en retard et le coût total de retard est proportionnel au $Cmax$. Le critère à minimiser est alors le $Cmax$.

Avec l'hypothèse (B), il y a deux livraisons de commandes, la première à une date fixe notée D_1 ($f = 1$) et la deuxième à la fin de l'ordonnancement ($Cmax$). La date D_1 peut être considérée comme une date due fixe et commune pour tous les jobs. Ainsi, tous les jobs qui ne sont pas envoyés à la date D_1 sont considérés en retard (cela correspond au problème industriel des magazines, par exemple). Pour chaque job j , nous définissons la variable \hat{u}_j , $\hat{u}_j = 1$ si le job j est en retard et $\hat{u}_j = 0$ sinon. Le critère utilisé pour l'hypothèse (B) est proportionnel à la pénalité w_j et à $Cmax - D_1$, qui correspond au retard des jobs qui ne sont pas livrés avec la première livraison. Puisque D_1 est une constante, le terme $Cmax - D_1$ peut être remplacé par $Cmax$ dans le critère. En plus, $\hat{C}_j = D_1$ si $C_j \leq D_1$ et $\hat{C}_j = Cmax$ sinon.

Pour l'hypothèse (C), $f \geq 2$ et nous supposons que D_f est suffisamment grand pour que la dernière livraison soit après la fin de l'exécution de tous les jobs ($D_f \geq Cmax$). Ici, $\hat{C}_j = D_d$ où D_d est la première livraison après la fin d'exécution de j , C_j . Sous cette hypothèse, tous les jobs sont considérés en retard, nous voulons minimiser le retard des jobs, ils doivent donc être livrés aussi tôt que possible.

Dans la suite du chapitre nous allons travailler sur ces problèmes d'ordonnancement à une machine. Les notations $\alpha|\beta|\gamma$ (voir Graham *et al.* [70]) correspondantes, pour nos problèmes d'ordonnancement NP-difficiles, sont :

$$(A) : 1/Stairs(nc), a_{j,k}/Cmax$$

- (B) : $1/Stairs(nc), a_{j,k}, D_1/(1 + \sum w_j \hat{u}_j) Cmax$
 (C) : $1/Stairs(nc), a_{j,k}, D_1, \dots, D_f / \sum w_j \hat{C}_j$

L'objectif est de déterminer, pour chaque problème, la séquence des jobs $\sigma = (j_1, j_2, \dots, j_n)$ qui minimise l'objectif. A notre connaissance, à exception de l'hypothèse (A), ces problèmes d'ordonnancement n'ont pas été considérés dans la littérature.

3.5 Méthodes de résolution

Pour résoudre des problèmes NP-difficiles d'ordonnancement, comme les nôtres, il y a le choix entre deux possibilités. La première est de les résoudre avec des méthodes approchées (aussi appelées heuristiques) qui fournissent des bonnes solutions, pas forcément optimales. La deuxième possibilité est de chercher à résoudre les problèmes à l'optimalité, avec des méthodes exactes de complexité exponentielle. Ces méthodes exactes peuvent avoir des temps de calcul importants et dépendent fortement de la taille des problèmes traités, principalement du nombre de jobs à ordonnancer. Les méthodes exactes comme la procédure par séparation et évaluation sont, en général, consacrées à la résolution d'instances de petite taille. Tandis que pour des instances de taille industrielle, les méthodes approchées sont le plus souvent utilisées en raison de leur facilité d'implémentation et de leurs temps de calcul réduits. Cependant, il est toujours nécessaire d'évaluer la qualité des solutions que les méthodes approchées fournissent. Pour cela, souvent on compare les solutions soit avec des bornes inférieures, soit avec la solution optimale (pour des instances de taille raisonnable pour lesquels le calcul de la solution optimale peut se faire rapidement), soit avec des solutions obtenues avec des algorithmes à performance garantie, comme les procédures par séparation et évaluation tronquées. Ce qui montre que la conception de méthodes exactes n'est pas inintéressante.

Puisque nos problèmes d'ordonnancement, à exception de l'hypothèse (A), n'ont pas été étudiés auparavant dans la littérature, dans ce chapitre nous avons choisi de fournir une première approche de résolution exacte pour ces problèmes d'ordonnancement. L'utilisation de propriétés de dominance laisse espérer que pour certaines familles d'instances, intéressantes pour notre application industrielle, on pourrait résoudre des problèmes de taille supérieure (en particulier pour les hypothèses (A) et (B)). Dans un premier temps nous avons conçu une procédure par séparation et évaluation. Ensuite nous avons voulu comparer les performances de notre PSE avec celles des solveurs commercialisés pour l'hypothèse (A).

Dans la suite du chapitre, nous commençons par présenter le modèle de programmation linéaire en nombres entiers pour l'hypothèse (A) dans la section 3.6. Les procédures par séparation et évaluation sont détaillées dans la section 3.7. Les résultats expérimentaux sont présentés dans la section 3.8.

3.6 Modèle de programmation linéaire mixte

Dans cette partie, nous proposons un modèle linéaire en nombres entiers pour la minimisation du $Cmax$. Il n'était pas possible de formuler un modèle linéaire pour (B), car son critère est par nature quadratique. Par ailleurs, pour l'hypothèse (C), les modèles essayés nous ont toujours également conduit à une formule quadratique de l'objectif.

Il existe différentes façons de modéliser un problème d'ordonnancement (Blazewicz *et al.* [15], Hatfield et Pierce [81]) à une machine : avec des variables de position indiquant si un job est à une position v dans l'ordonnancement ou pas ; avec des variables de précédence qui indiquent si

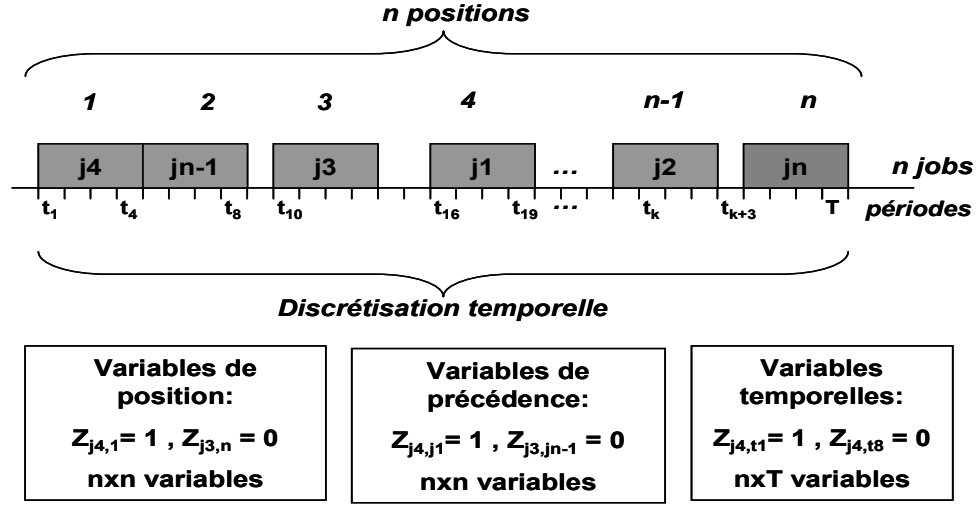


FIGURE 3.2 – Types de modélisation en ordonnancement avec exemples de valeurs pour les variables

un job j est avant un job i dans l'ordonnancement ; ou avec des variables associées à une discrétisation du temps, indiquant si un job j est en train d'être exécuté à un instant t , voir la figure 3.2.

Pour éviter la grande quantité de variables et de contraintes indexées par le temps, nous avons choisi d'utiliser des variables de position. Ces variables indiquent si un job j est à une position v dans l'ordonnancement ou non. Le tableau 3.1 présente les variables, qui sont toutes positives. Il est à noter que les variables auxiliaires $Y_{v,t}$ sont liées au temps, c'est nécessaire pour vérifier la faisabilité de la consommation des ressources, néanmoins un nombre restreint d'indices de temps est considéré, ceux liés aux événements correspondant aux arrivées de composants.

TABLE 3.1 – Variables de décision et variables auxiliaires

Variable	Description
<i>Variables de décision</i>	
$Z_{j,v}$	variable de positionnement des jobs, égale à 1 si le job j est en position v et 0 sinon
cp_v	date de fin de traitement du job en position v
<i>Variables auxiliaires entières</i>	
pp_v	temps de traitement du job en position v
$ap_{v,k}$	quantité de ressource k que le job en position v consomme
sp_v	date de début de traitement du job en position v
$Y_{v,t}$	variable booléenne égale à 1 ou à 0 si $sp_v \geq t$ et 0 sinon

Minimisation de la durée totale (C_{max})

La formulation mathématique du problème sans livraison fixe ($f = 0$) et une seule livraison flexible à la fin de l'ordonnancement (hypothèse (A)), est la suivante :

Contraintes d'affectation

$\forall v$	$\sum_j Z_{j,v} = 1$	(1)
$\forall j$	$\sum_v Z_{j,v} = 1$	(2)

Les familles de contraintes (1) et (2) indiquent qu'un job doit être affecté à une seule position de l'ordonnancement et que chaque position n'est affectée qu'à un job.

Calcul des temps de traitement

	$cp_0 = 0$	(3)
$\forall v$	$cp_{v-1} + pp_v \leq cp_v$	(4)
	$C_{max} \geq cp_n$	(5)

La famille de contraintes (3) dit que le début de l'ordonnancement est à l'instant 0, la famille (4), permet de calculer les temps de fin de traitement des jobs à chaque position v . La famille de contraintes (5) établit que le C_{max} doit être plus grand ou égal à la date de fin de traitement du dernier job de l'ordonnancement.

Calcul des variables auxiliaires

$\forall v$	$\sum_j p_j * Z_{j,v} = pp_v$	(6)
$\forall v, \forall k$	$\sum_j a_{j,k} * Z_{j,v} = ap_{v,k}$	(7)
$\forall v$	$sp_v = cp_v - pp_v$	(8)

Les familles de contraintes (6) et (7) permettent de faire le lien entre les caractéristiques des jobs, durée de traitement et consommation de chaque composant respectivement, et les positions qu'ils occupent dans l'ordonnancement. La famille (8) calcule la date de début du job en position v .

Contraintes de ressources

$\forall k, \forall u = 1, \dots, n$	$\sum_{v=1}^u ap_{v,k} \leq \sum_{t=T_1}^{T_h} CCA_{t,k}(Y_{u,t} - Y_{u,t+1})$	(9)
$\forall v, \forall t = T_1, \dots, T_h, T_{max}$	$M * (Y_{v,t} - 1) \leq sp_v - t$	(10)
$\forall v, \forall t = T_1, \dots, T_h$	$Y_{v,t} - Y_{v,t+1} \geq 0$	(11)

$T_{max} = T_{h+1}$ est un instant suffisamment grand où tous les composants sont déjà arrivés et l'ordonnancement est déjà fini et M est un nombre positif très grand. T_{max} peut être par exemple la date de la dernière arrivée sur l'ensemble de composants plus la somme des durées de traitement de tous les jobs ($T_{max} = \max_p T_{h,p} + \sum p_j$).

La famille de contraintes (9) vérifie, pour chaque composant k et pour chaque position de l'ordonnancement u , que la consommation totale du composant à l'instant de début d'exécution du job en position u ne dépasse pas ce qui est arrivé à la plateforme jusqu'à cet instant sp_u . Cette vérification est nécessaire seulement aux instants où les jobs commencent à être exécutés, nous évitons ainsi l'explosion du nombre de variables de la discrétisation temporelle. Les familles de contraintes (10) et (11) permettent de faire le lien entre la variable $Y_{v,t}$ et les instants de début d'exécution du job en position v .

Fonction objectif

$$\text{Min } (C_{max})$$

Dans le problème sans date de livraison fixe, tous les jobs sont supposés en retard. Ainsi, nous voulons minimiser la pénalité totale de retard qui est proportionnelle à la date effective de livraison C_{max} .

3.7 Procédure par Séparation et Evaluation (PSE)

Dans cette partie nous détaillons la procédure par séparation et évaluation que nous avons conçue pour résoudre de manière exacte les problèmes des hypothèses (A), (B) et (C).

Nous commençons la section en faisant une présentation des PSE en général. Ensuite nous introduisons un à un les éléments nécessaires pour notre PSE, nous commençons par les méthodes approchées pour obtenir des bornes supérieures dans 3.7.2, puis par les bornes inférieures obtenues pour les trois problèmes, dans 3.7.3. Le schéma général de la procédure ainsi que les règles de dominance sont présentés dans 3.7.4 et 3.7.5 respectivement.

3.7.1 Présentation générale des Procédures par Séparation et Evaluation

Nous donnons ici une description générale de l'objectif et du fonctionnement des PSE.

Comme nous l'avons dit dans la section 1.2.3 du chapitre 1, les Procédures par Séparation et Evaluation font partie des méthodes par construction exactes pour des problèmes d'optimisation combinatoire. Il s'agit d'une méthode qui énumère toutes les solutions et garde la meilleure pour le critère que l'on minimise (resp. maximise). L'énumération faite par les PSE ne consiste pas à énumérer explicitement toutes les solutions réalisables et à les évaluer une à une pour en choisir la meilleure. Il faut noter que les PSE sont aussi une méthode qui est capable de décomposer l'espace de solutions et d'éliminer les sous-espaces qui ne fournissent pas des solutions potentiellement meilleures que la meilleure solution connue. Ainsi, l'énumération faite par une PSE est implicite.

La procédure de décomposition de l'espace de solutions est une procédure arborescente qui décompose l'ensemble de solutions S considéré à chaque nœud en sous-ensembles, les fils du nœud en question, S_1, S_2, \dots, S_ℓ (généralement disjoints mais pas exclusivement) recouvrent S , celle-ci correspond à l'étape de séparation de la PSE. Si on est en mesure de déterminer, pour un problème de minimisation (resp. un problème de maximisation), une borne inférieure (resp. supérieure) pour la meilleure solution de chaque sous-ensemble, on peut éliminer les sous-ensembles S_q de solutions dont la meilleure solution serait plus grande (resp. plus petite) que la meilleure solution connue ou qu'une borne supérieure (resp. inférieure) de la solution optimale, on dit alors que les sous-ensembles S_q sont dominés et sont éliminés de l'arbre de recherche (et donc non explorés ainsi que tous ses enfants). Ceci est effectué grâce à l'étape d'évaluation de la PSE. En suivant cette procédure itérative, on arrive soit à un ensemble dont on peut déterminer facilement une solution, soit à un sous-ensemble de solutions dominées que l'on élimine. La solution optimale correspond à la meilleure solution réalisable obtenue, incluant les solutions données par des heuristiques, utilisées pour obtenir les bornes supérieures (resp. inférieures). Le premier nœud de l'arbre d'exploration représente l'ensemble de toutes les solutions réalisables.

Pour toute conception de PSE, la qualité des bornes supérieures et inférieures est un facteur déterminant dans le temps d'exploration de l'arbre de recherche. Plus proches sont les bornes de la solution optimale, plus d'ensembles de solutions seront éliminés dans l'arbre d'exploration. Pour cette raison, une grande partie du travail dans l'élaboration des procédures par séparation et évaluation est la conception de bornes efficaces.

Une PSE est caractérisée par les éléments suivants : le *schéma de séparation* qui explique la manière de déterminer les ensembles et sous-ensembles de solutions ; la ou les *bornes inférieures* (resp. supérieures) utilisées pour éliminer des sous-ensembles de solutions qui correspondent à des branches de l'arbre de recherche ; la ou les *bornes supérieures* (resp. inférieures) correspondant aux meilleures solutions réalisables connues ; les *règles de dominance* éventuelles qui dépendent des caractéristiques du problème et qui permettent d'identifier des ensembles de solutions dominants (i.e. qui contiennent au moins une solution optimale), on peut alors éliminer les sous-ensembles de solutions qui ne contiennent pas de solution ayant cette propriété ; la *stratégie d'exploration* qui indique l'ordre suivant lequel on explore l'arbre des sous-ensembles de solutions.

Dans les sections qui suivent, nous caractérisons un à un les différents éléments pour définir notre PSE. Pour plus de détail sur les PSE nous renvoyons le lecteur vers Lawler et Wood [94].

3.7.2 Méthodes approchées polynomiales

Notre objectif dans cette partie est de concevoir des méthodes approchées rapides, qui sont incluses dans notre procédure par séparation et évaluation dans la section 3.7.4. Notre choix a été d'utiliser des algorithmes de listes basés sur des règles de priorité pour construire des ordonnancements actifs et/ou sans délai. Cette section est divisée en quatre parties. Dans la première nous rappelons quelques définitions concernant l'ordonnancement. Dans la deuxième nous rappelons comment construire des ordonnancements actifs et sans délai dans le cadre des problèmes d'ordonnancement considérés. Dans la troisième partie, nous proposons une série de règles de priorité que nous utilisons pour trier les jobs. Dans la dernière partie nous expliquons comment nous combinons les règles de priorité que nous avons conçu.

Définitions

Ici nous donnons quelques définitions concernant les ordonnancements, ces définitions sont basées sur celles proposées par Baker [5], Brucker [22] et Conway *et al.* [45].

Ordonnancement valide : Un ordonnancement est dit valide si toutes les contraintes de précédence entre les opérations et toutes les contraintes de ressources sont satisfaites.

Ordonnancement semi-actif (HSA) : Un ordonnancement est dit semi-actif s'il est valide et s'il est impossible de translater une opération vers la gauche pour obtenir un nouvel ordonnancement valide tout en conservant le même ordre de succession des opérations sur les différentes ressources. Ces types d'ordonnements sont aussi dits *calés à gauche*.

Ordonnancement actif (HA) : Un ordonnancement est dit actif, s'il est valide et si on ne peut pas ordonnancer un job plus tôt sans retarder un autre job. Autrement dit, il n'existe pas de temps mort qui puisse contenir complètement une opération ordonnancée plus tard.

Ordonnancement sans délai (HND) : Un ordonnancement est dit sans délai, s'il est valide et si aucune machine ne reste inactive pendant qu'un job attend d'être traité (ici on suppose que les composants nécessaires sont disponibles).

$$HND \subset HA \subset HSA$$

Critère régulier : Un critère est dit régulier s'il est une fonction croissante des dates de fin des jobs. Les fonctions : $Cmax$, $\sum w_j \hat{u}_j$ et $\sum w_j \hat{C}_j$ sont des critères réguliers pour des problèmes d'optimisation.

Ensemble dominant : Un ensemble de solutions est dit dominant s'il contient au moins une solution optimale pour le critère considéré.

Générateurs de solutions

Pour construire des ordonnancements avec des algorithmes de listes, il est nécessaire de trier les jobs selon des ordres ρ avant de commencer la construction. Ces ordres représentent des règles de priorité. Par exemple, le job avec le plus petit temps de traitement est prioritaire; il suffit alors de trier les jobs dans l'ordre croissant de leurs temps de traitement, ensuite nous construisons des ordonnancements actifs (algorithme 1) et sans délai (algorithme 2) avec la liste L de jobs triés.

Générateur d'ordonnancements actifs (HA)

Soit L la liste des jobs triés selon l'ordre ρ ;
 $t = 0$;
pour chaque composant k **faire**
 calculer CCA_k = courbe cumulée d'arrivée du composant k ;
 initialiser $CCU_k = [0, 0, \dots, 0]$ = courbe cumulée d'utilisation du composant k ;
fin
tant que L n'est pas vide **faire**
 $MinC = +\infty$;
 pour pour chaque job j **faire**
 placer le job j aussi tôt que possible après l'instant t pour que les courbes
 modifiées de consommation CCU restent inférieures ou égales aux courbes des
 arrivées CCA ;
 calculer S_j et C_j les temps de début et de fin de traitement du job j
 respectivement;
 $MinC = \min(MinC, C_j)$;
 fin
 soit j_0 le premier job de la liste L tel que $S_{j_0} < MinC$;
 ordonnancer j_0 entre S_{j_0} et C_{j_0} ;
 actualiser les courbes de consommation CCU de tous les composants;
 retirer j_0 de la liste L ;
 $t = C_{j_0}$;
fin

Algorithm 1: Algorithme générique pour ordonnancement actif avec l'ordre ρ : $HA\rho$

Générateur d'ordonnancements sans délai (HND)

Note : L'algorithme pourrait fonctionner sans utiliser le booléen *no-idle-time*, sa présence permet d'écourter l'algorithme dès l'instant où on trouve un job qui ne crée pas de temps mort.

Soit L la liste des jobs triés selon l'ordre ρ ;

$t = 0$;

pour chaque composant k **faire**

 calculer CCA_k = courbe cumulée d'arrivée du composant k ;

 initialiser $CCU_k = [0, 0, \dots, 0]$ = courbe cumulée d'utilisation du composant k ;

fin

tant que L n'est pas vide **faire**

$MinS = +\infty$;

 No-idle-time = faux;

pour chaque job j de la liste L jusqu'à ce que no-idle-time == vrai **faire**

 placer le job j aussi tôt que possible après l'instant t pour que les courbes modifiées de consommation CCU restent inférieures ou égales aux courbes des arrivées CCA ;

 calculer S_j et C_j les temps de début et de fin de traitement du job j respectivement;

$MinS = \min(MinS, S_j)$;

si $MinS == t$ **alors**

 no-idle-time = vrai;

fin

fin

 soit j_o le premier job de la liste L tel que $S_{j_o} == MinS$;

 ordonnancer j_o entre S_{j_o} et C_{j_o} ;

 actualiser les courbes de consommation CCU pour tous les composants;

 retirer j_o de la liste L ;

$t = C_{j_o}$;

fin

Algorithm 2: Algorithme générique pour ordonnancement sans délai avec l'ordre ρ : $HND\rho$

Si l'on veut minimiser la durée totale de l'ordonnancement C_{max} de l'hypothèse (A), minimiser les temps morts apparaît comme une bonne idée, ce qui nous amène à préférer les ordonnancements sans délai, néanmoins un job ordonnancé plus tôt pour minimiser un temps mort peut consommer beaucoup de composants et créer des temps morts plus grands plus tard.

Règles de priorité associées

Pour obtenir de bons ordonnancements avec nos méthodes approchées, il convient de trier les jobs selon des ordres (ou règles de priorité) ρ que l'on considère comme intéressants. Nous présentons ici deux techniques intuitives et heuristiques, qui sont antagonistes, et qui peuvent être utilisées pour donner des priorités aux jobs. Quelques résultats concernant ces ordres sont données.

Ordre décroissant des temps de traitement et croissant de consommation

Pour toutes les hypothèses, les critères sont réguliers. En conséquence une bonne règle empirique doit éviter de créer des temps morts. Pour cela, il semble intéressant de placer en premier les jobs les plus longs qui consomment le moins possible des composants, de manière à placer les courbes cumulées de consommation en dessous des courbes des arrivées sans trop retarder les jobs.

Dans le cas d'un seul composant cet ordre est l'ordre décroissant de $p_j/a_{j,1}$. Dans le cas où il y a plusieurs composants, il faut plus ou moins arbitrairement pour obtenir un ordre, accorder des poids τ (importance relative) aux différents composants. Par exemple, un poids plus grand associé aux composants qui arrivent tardivement. Dans la thèse, nous nous sommes contentés (arbitrairement) de prendre des poids égaux. D'où l'ordre $\left(\frac{p_j}{\sum_k \tau_k a_{j,k}} \searrow \right)$.

Nous notons cet ordre $LPT - SCD$ (quand les poids sont égaux) ou $LPT - WSCD$. Nous présentons dans ce qui suit, quelques cas polynomiaux issus de l'application de cet ordre.

Lemme 3.7.1 *Quand tous les jobs nécessitent exactement la même quantité a_k de composant pour chaque composant k , alors placer les jobs dans l'ordre LPT (ordre décroissant des durées de traitement) minimise C_{max} .*

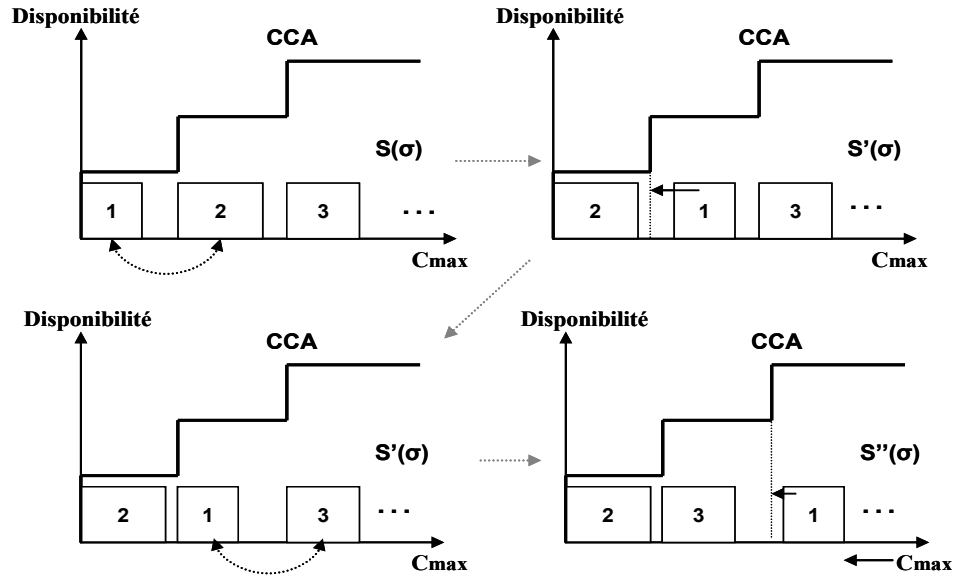


FIGURE 3.3 – Optimalité de LPT pour une ressource et consommations égales

Preuve Soit ρ un ordre quelconque des jobs, qui ne vérifie pas l'ordre LPT , et soit $S(\rho)$ l'ordonnancement calé à gauche associé à cet ordre. Il existe au moins deux jobs consécutifs i et j tels que le temps de traitement du deuxième job j est strictement plus grand que le temps de traitement du premier job i . Soit S' l'ordonnancement obtenu en échangeant les positions des deux jobs considérés. Dans cet ordonnancement, j commence à l'instant de début de i et i se termine à l'instant de fin d'exécution de j . S' est évidemment un ordonnancement réalisable, car les courbes cumulées d'utilisation associées à S' sont plus petites ou égales aux courbes cumulées d'utilisation de composants associées à $S(\rho)$. La fin de l'ordonnancement ne change

pas et $Cmax(S') \leq Cmax(S(\rho))$ (potentiellement $Cmax(S')$ peut être strictement plus petit en décalant à gauche i et tous les autres jobs qui suivent). En appliquant cet échange deux à deux sans détériorer la valeur du $Cmax$ on finit par obtenir l'ordonnancement qu'on obtiendrait avec l'ordre *LPT*. Voir figure 3.3 où dans un exemple à trois jobs, après une série de changements deux à deux et en plaçant les jobs au plus tôt, on retrouve l'ordonnancement qui minimise le $Cmax$. ■

Avec des hypothèses légèrement différentes : arrivées de composant uniformes et continues ; le lemme 3.7.1 a été proposé par Xie [156].

Lemme 3.7.2 *S'il y a un seul composant o et si les temps de traitement de tous les jobs sont identiques (égaux à p), alors l'ordre croissant des consommations de composant CC minimise le $Cmax$.*

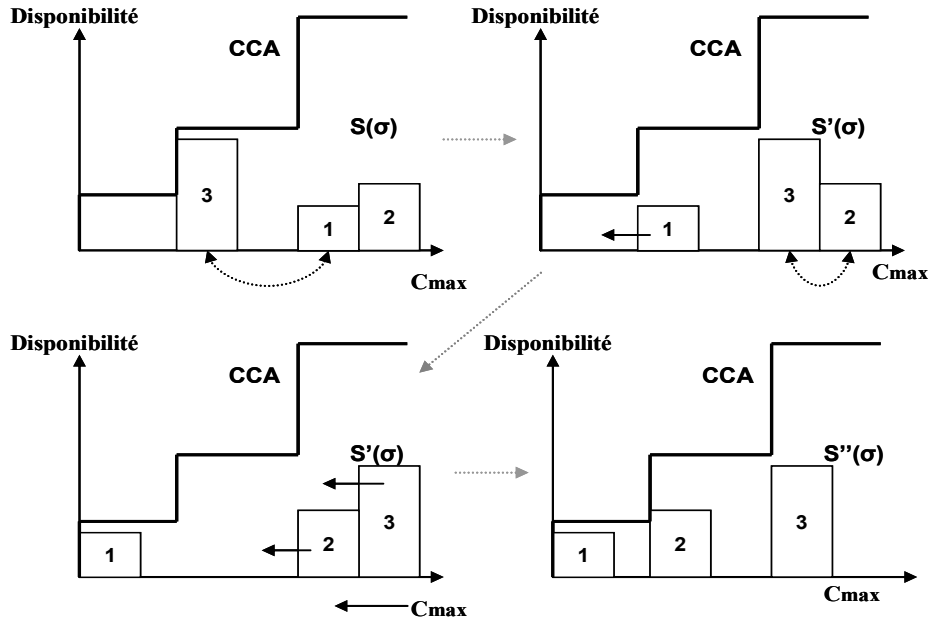


FIGURE 3.4 – Optimalité de CC pour une ressource et temps de traitement égaux

Preuve Soit ρ un ordre des jobs quelconque, qui ne vérifie pas l'ordre CC , et soit $S(\rho)$ l'ordonnancement calé à gauche associé à cet ordre. Il existe au moins deux jobs consécutifs i et j tels que la consommation de composant du deuxième job j est strictement plus petite que la consommation de composant du premier job i . Soit S' l'ordonnancement obtenu en échangeant les positions des deux jobs considérés (ceci est possible car la consommation de j est plus petite que celle de i , la disponibilité de la ressource est toujours respectée), dans cet ordonnancement j commence à l'instant de début de i et i se termine à l'instant de fin d'exécution de j . S' est évidemment un ordonnancement réalisable, car les courbes cumulées d'utilisation associées à S' sont plus petites ou égales aux courbes cumulées d'utilisation de composants associées à $S(\rho)$. La fin de l'ordonnancement ne change pas et $Cmax(S') \leq Cmax(S(\rho))$ (potentiellement $Cmax(S')$ peut être strictement plus petit en décalant à gauche i et tous les autres jobs qui

suivent). En appliquant cet échange deux à deux sans détériorer la valeur du C_{max} on finit par obtenir l'ordonnancement qu'on obtiendrait avec l'ordre CC . Dans la figure 3.4, nous montrons un exemple à trois jobs qui ont la même durée mais des consommations différentes, on constate qu'en effectuant des changements deux à deux et en plaçant les jobs au plus tôt à chaque fois, on trouve une séquence qui minimise le C_{max} . ■

Lemme 3.7.3 *Si pour un problème d'ordonnancement l'ordre décroissant des temps de traitement LPT est identique à l'ordre croissant des consommations de composant CC , alors les ordres sont "agréables" et minimisent le C_{max} .*

Preuve Ce lemme est une conséquence des lemmes 3.7.1 et 3.7.2. ■

Lemme 3.7.4 *Pour un problème d'ordonnancement avec un seul composant, si les ordres ne sont pas "agréables", la règle de priorité correspondant à placer les jobs selon l'ordre décroissant des temps de traitement divisés par la consommation de composant $(\frac{p_j}{a_j} \searrow)$ ne minimise pas le C_{max} .*

Preuve Comme on peut le voir dans le contre-exemple de la figure 3.5 avec un composant et deux jobs. Les deux jobs ont des caractéristiques telles qu'en suivant la règle $(\frac{p_j}{a_j} \searrow)$, il faudrait placer 1 avant 2, mais cette séquence est sous-optimale pour la minimisation du C_{max} . ■

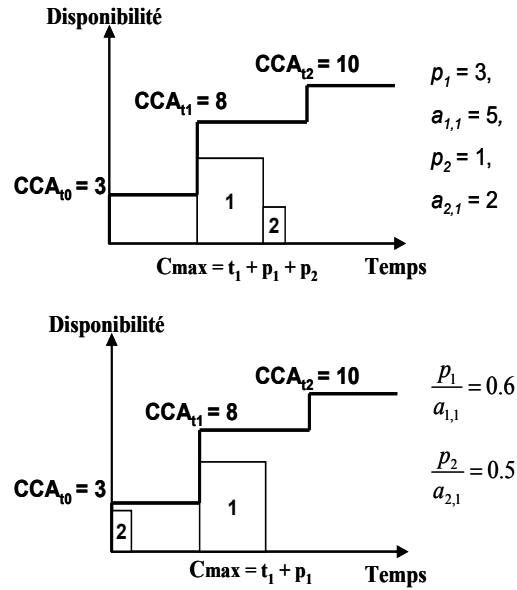


FIGURE 3.5 – Contre exemple d'optimalité de l'ordre $LPT - SCD$ pour minimiser le C_{max}

Ordre décroissant des pénalités de retard

Ces ordres sont intéressants essentiellement pour les hypothèses (B) et (C). Pour minimiser la somme des pénalités des jobs en retard, il est préférable de placer en priorité les jobs les

plus courts ayant les plus grandes pénalités $\left(\frac{w_j}{p_j} \searrow\right)$. Cette règle correspond à l'ordre *WSPT* bien connu. Sans prendre en compte ni les courbes cumulées de consommation ni celles des arrivées de composant, l'ordre *WSPT* fournit une bonne borne supérieure pour le problème de sac à dos sous-jacent (c.f. Dantzig [47]), cette borne peut être améliorée en choisissant de manière intelligente les deux derniers jobs placés juste avant le départ de la livraison fixe prévue à l'instant D_1 (c.f. Martello et Toth [102]). Comme le montre le lemme 3.7.5 cet ordre est optimal seulement s'il n'y a pas de contrainte de ressources et l'ordre $(w_i \searrow)$ est égal à l'ordre $(p_i \nearrow)$, c'est à dire quand les ordres sont agréables. Dans le cas contraire le lemme 3.7.6 montre que cet ordre n'est pas optimal pour minimiser la somme des pénalités des jobs en retard dans le cas général.

Lemme 3.7.5 *Si pour un problème d'ordonnancement l'ordre croissant des temps de traitement *SPT* est identique à l'ordre décroissant des pénalités de retard, alors les ordres sont agréables et l'ordre *WSPT* minimisent la somme des pénalités de retard $\sum w_j \hat{u}_j$.*

Preuve Sans contrainte de ressource, si la durée de traitement était identique pour tous les jobs $p_i = p$, placer les jobs dans l'ordre décroissant des pénalités minimise la somme des pénalités des jobs en retard. En effet, il suffit de placer les jobs avec les plus grandes pénalités au début de l'ordonnancement pour qu'ils soient à temps pour être livrés à l'instant D_1 .

Si par contre, toujours sans contrainte de ressource, les pénalités étaient identiques pour tous les jobs $w_i = w$, placer les jobs dans l'ordre croissant des temps de traitement minimise la somme des pénalités des jobs en retard. En effet, placer autant de jobs que possible avant D_1 minimise le nombre de jobs qui sont en retard et donc la somme de leurs pénalités. On peut faire cela en plaçant les jobs avec les plus petites durées avant D_1 .

Le lemme est une conséquence des deux remarques précédentes. ■

Lemme 3.7.6 *Même si une infinité de composants arrivait à l'instant 0 (correspondant à la relaxation des contraintes de disponibilité), l'ordonnancement sans délai correspondant à cet ordre n'est pas optimal pour la minimisation des pénalités des jobs en retard (sauf chance).*

Preuve Le contre-exemple de la figure 3.6 montre qu'en respectant l'ordre $\left(\frac{w_j}{p_j} \searrow\right)$, il se pourrait que l'on donne priorité à un job plus long et qui est en retard (c'est le cas de j dans le contre-exemple) et empêcher un job plus court ($j + 1$ dans la figure), et qui pourrait partir avec la livraison D_1 , d'être placé avant. Le principe est le même pour la minimisation de la somme pondérée des dates de livraison des jobs (critère de l'hypothèse (C)). ■

Ce résultat a été démontré dans Hall *et al.* [77], pour le cas avec des dates de livraison fixes.

Construction des méthodes approchées rapides

Nous insérons, au sein des algorithmes 1 et 2, les ordres que nous venons de décrire. Nous les utilisons de manière individuelle *Ordre*, ou hiérarchique *Ordre₁/Ordre₂* (le deuxième ordre est utilisé pour décider du job à placer en cas d'égalité pour le premier), ou encore dynamiquement (*Ordre₁ → Ordre₂*) :

L'utilisation dynamique des règles de priorité consiste à commencer par un ordre donné et continuer avec un autre lorsqu'une condition est vérifiée. La raison est que après certaines conditions, l'empirisme qui conduit à choisir un ordre peut disparaître. Par exemple quand $t \geq D_1$ pour le problème (B), ou quand t est plus grand que la date de la dernière arrivée de composant pour tous les problèmes. Nous avons distingué trois cas :

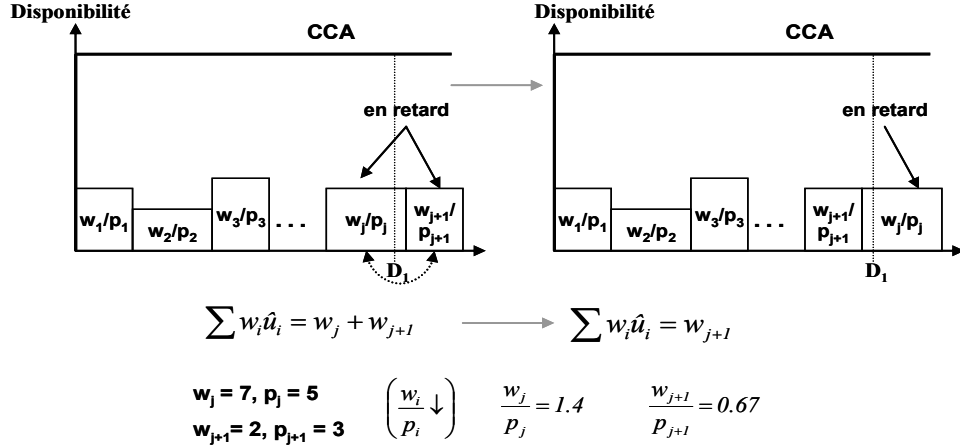


FIGURE 3.6 – Contre exemple d’optimalité de l’ordre *WSPT* pour minimiser la somme des pénalités des jobs en retard

1. l’ordre *LPT – WSCD* ou *LPT – SCD* devient inutile (pour les hypothèses (A) et (B)) après la date de la dernière arrivée de composant, car à cet instant tous les jobs peuvent être placés dans n’importe quel ordre sans modifier la durée totale de l’ordonnancement, on utilise alors l’ordre *WSPT* (cette règle dynamique est notée *LPT – WSCD* \rightarrow *WSPT*) ;
2. l’ordre *WSPT* est inutile (pour les hypothèses (B) et (C)) quand $t \geq D_1$ ou $\geq D_{f-1}$ car tous les jobs qui n’ont pas été livrés à cet instant sont en retard et alors il n’est plus nécessaire de continuer de chercher à minimiser les pénalités, on utilise alors l’ordre *LPT – WSCD* (cette règle dynamique est notée *WSPT* \rightarrow *LPT – WSCD*) ;
3. il faut remarquer que si les deux conditions $t \geq D_1$ (ou $\geq D_{f-1}$ pour l’hypothèse (C)) et t plus grand que la date de la dernière arrivée de composant alors n’importe quel ordre des jobs peut être utilisé pour compléter l’ordonnancement sans plus de contrôle pour n’importe quel hypothèse. Cette règle est appliquée lors de la construction des ordonnancements actifs et sans délai décrits précédemment, et ce pour n’importe quel ordre.

Nous construisons des ordonnancements actifs et sans délai avec les ordres (intéressants pour minimiser les critères de nos trois problèmes (A), (B) et (C)) suivants :

- $\rho = 1$: *LPT – WSCD/WSPT*,
- $\rho = 2$: *WSPT/LPT – WSCD*,
- $\rho = 3$: *DYN(LPT – WSCD \rightarrow WSPT)/WSPT*,
- $\rho = 4$: *DYN(WSPT \rightarrow LPT – WSCD)/LPT – WSCD*

Les ordres $\rho = 1, 2$ sont des ordres hiérarchiques. Les ordres 3 et 4 sont des ordres dynamiques correspondant aux conditions d’arrêt 1 et 2 respectivement. Dans nos expériences, nous

travaillons avec ces 4 ordres, lesquels combinés avec les deux générateurs d'ordonnancement nous fournissent 8 méthodes approchées polynomiales (on pourrait obtenir plus si l'on utilisait des ensembles de poids non unitaires pour les consommations des composants dans *WSCD*). Puisque le calcul des ordonnancements avec chaque méthode se fait rapidement, nous appliquons toutes les heuristiques au départ pour trouver des solutions pour nos problèmes et nous appelons *BESTH* l'heuristique globale qui consiste à appliquer successivement toutes les méthodes et à garder la meilleure solution obtenue.

Il faut remarquer que les ordres $\rho = 2$ et $\rho = 4$ ainsi que $\rho = 1$ et $\rho = 3$ sont identiques pour la minimisation du *Cmax* (hypothèse (A)). Pour les ordres 2 et 4, il n'y pas de tournée de livraison prévue, dans ce cas, le changement dynamique prévu à $t = D_1$ n'a pas lieu. Pour les ordres 1 et 3 le changement dynamique devrait arriver après la date de la dernière livraison de composant, mais à cet instant placer les jobs dans n'importe quel ordre fournit le même résultat pour la minimisation du *Cmax*. Nous avons donc 4 méthodes approchées pour la minimisation du *Cmax*.

3.7.3 Bornes inférieures

Pour pouvoir concevoir notre procédure de séparation et évaluation, il est nécessaire d'avoir des bonnes bornes inférieures de nos problèmes. Les trois problèmes (A), (B) et (C) que nous étudions ont pour critères *Cmax*, $(1 + \sum w_j \hat{u}_j)Cmax$ et $\sum w_j \hat{C}_j$ respectivement.

Nous sommes capables d'obtenir des bornes inférieures pour les problèmes (A) et (C) en travaillant directement sur leurs critères. Par contre, pour obtenir des bornes inférieures pour le problème (B) nous décomposons le critère $(1 + \sum w_j \hat{u}_j)Cmax$ en deux parties, nous calculons des bornes inférieures pour le *Cmax* d'une part, et des bornes inférieures pour la somme des pénalités des jobs en retard $\sum w_j \hat{u}_j$ d'autre part.

Dans cette section nous décrivons les trois techniques que nous avons utilisé pour concevoir des bornes inférieures pour nos différents critères : *Cmax*, $\sum w_j \hat{u}_j$ et $\sum w_j \hat{C}_j$. Nous introduisons une à une les techniques et expliquons comment elles sont utilisées pour chaque critère.

Bornes inférieures utilisant des ordres agréables

La technique des ordres agréables est une technique très utilisée pour obtenir des bornes en ordonnancement. L'idée de base est de construire la meilleure instance possible avec les données du problème original (caractéristiques des jobs, capacités des machines, etc.) et de résoudre le problème d'optimisation avec cette instance. Toute autre instance, obtenue avec une autre combinaison des mêmes données, incluant l'instance originale, donne des solutions moins bonnes pour le même problème d'optimisation.

Nous appliquons la technique des ordres agréables en construisant des pseudo-jobs avec les caractéristiques des jobs réels et en résolvant le problème d'ordonnancement avec ces pseudo-jobs. Par exemple, pour un problème de sac à dos, il serait idéale que les jobs avec les plus grands coûts ($c_1 \geq c_2 \geq c_3 \geq \dots \geq c_n$) aient les plus petits poids ($w_1 \leq w_2 \leq w_3 \leq \dots \leq w_n$), si c'était le cas, placer les jobs dans cet ordre dans le sac maximiserait le coût total. Si ce n'est pas le cas, on peut construire des pseudo-jobs de telle façon que le premier pseudo-job ait le plus grand coût et le plus petit poids (de tous les coûts et poids des jobs réels), le deuxième pseudo job aura le deuxième plus grand coût et le deuxième plus petit poids et ainsi de suite pour le reste de pseudo-jobs et des caractéristiques. Ainsi, avec cette nouvelle pseudo-instance il est facile de résoudre le problème à l'optimalité, cette solution constitue une borne supérieure pour le problème original, qui est ici un problème de maximisation.

Dans ce qui suit nous présentons des bornes inférieures obtenues en appliquant la technique des ordres agréables pour le $Cmax$, pour le temps mort total, pour la somme des pénalités des jobs en retard $\sum w_j \hat{u}_j$ et pour la somme pondérée des dates de livraison des jobs $\sum w_j \hat{C}_j$. La borne inférieure pour les temps morts est utilisée pour améliorer les bornes pour $\sum w_j \hat{u}_j$ et $\sum w_j \hat{C}_j$.

Borne inférieure pour le $Cmax$

Nous décrivons ici la borne obtenue pour la minimisation du $Cmax$ (concernant les hypothèses (A) et (B)) avec l'utilisation des ordres agréables. Nous avons vu dans le lemme 3.7.3 que si l'ordre décroissant des temps de traitement et l'ordre croissant des consommations de composant sont égaux alors placer les jobs dans cet ordre minimise le $Cmax$. En conséquence, il est pertinent d'utiliser la technique des ordres agréables, décrite avant, pour trouver une borne inférieure pour le $Cmax$.

S'il y a plusieurs composants, nous utilisons la technique des ordres agréables de manière indépendante pour chaque composant et nous retenons la plus grande valeur obtenue. Pour minimiser le makespan, la technique des ordres agréables doit être appliquée comme suit :

Pour chaque composant o , soit Π le problème de minimisation du $Cmax$ étudié dans ce chapitre, et soit $\Pi'(o)$ une relaxation du problème Π obtenue comme suit : le premier job de $\Pi'(o)$ se voit affecté le plus grand temps de traitement et la plus petite consommation de composant o , le deuxième job de $\Pi'(o)$ reçoit le deuxième plus grand temps de traitement et la deuxième plus petite consommation de composant o , etc. et ainsi de suite jusqu'au dernier job. Le résultat est tel que les jobs de $\Pi'(o)$ sont triés simultanément dans l'ordre décroissant de leurs temps de traitement ($p_i' \searrow$) et dans l'ordre croissant des consommations du composant o ($a_{i,o}' \nearrow$) dans ce cas, le lemme 3.7.3 peut être appliqué.

En appliquant les ordres agréables à chaque composant, nous avons une valeur différente du $Cmax$ pour chaque composant, la valeur que l'on retient est la valeur maximale parmi celles de tous les composants ($\max_k Cmax(\Pi'(k))$), elle est notée $LB|AGO|CT$ (borne inférieure avec les ordres agréables pour la durée totale de traitement).

Borne inférieure pour le temps mort total et/ou partiel (IT)

Pour calculer une borne inférieure du temps mort avec les ordres agréables, nous utilisons la borne obtenue pour le $Cmax$ avec cette technique. Il suffit d'appliquer les ordres agréables pour chaque composant et calculer le temps mort total. On garde comme borne inférieure de IT la valeur maximale obtenue parmi tous les composants : $\max_k IT(\Pi'(k))$, cette borne est notée $LB|AGO|IT$. Nous avons le lemme suivant :

Lemme 3.7.7 *Pour n'importe quel intervalle $[0, H]$, la somme des temps morts induits par n'importe quel ordonnancement construit en utilisant les ordres agréables du lemme 3.7.3, est une borne inférieure de la somme des temps morts inclus dans n'importe quel ordonnancement réalisable du problème Π dans l'intervalle $[0, H]$.*

Preuve Le lemme 3.7.7 est une conséquence du lemme 3.7.3. Soit UP/H une borne supérieure de la somme des temps de traitement des jobs qui peuvent être placés dans l'intervalle $[0, H]$ tout en prenant en compte les arrivées de composant. Elle est égale à la différence entre H , la longueur de l'intervalle et $LB|AGO|IT(H)$, la plus grande borne inférieure du temps mort total sur l'intervalle $[0, H]$. Voir figure 3.7 pour un exemple du calcul des bornes pour le temps mort total ou dans un intervalle. ■

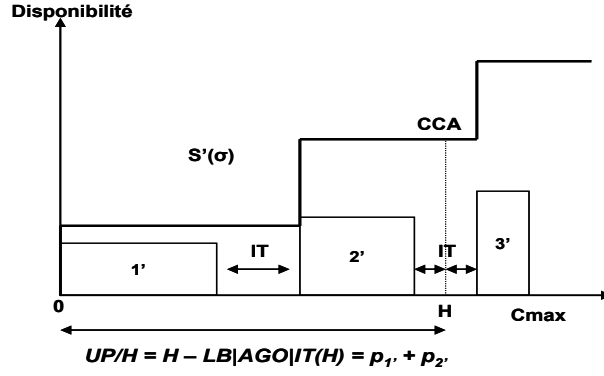


FIGURE 3.7 – Borne inférieure pour le temps mort total et/ou partiel

Borne inférieure pour la somme des pénalités des jobs en retard $\sum w_j \hat{u}_j$

Le problème de minimisation de la somme des pénalités des jobs en retard (considéré pour l'hypothèse (B)) est équivalent à un problème de maximisation de la somme des pénalités des jobs qui sont à temps. Notre premier réflexe pour trouver des bornes inférieures pour ce problème a été de résoudre le problème de sac à dos sous-jacent en relaxant les contraintes des arrivées des composants (i.e. la totalité des composants est disponible au début de l'ordonnancement, voir figure 3.8(b)).

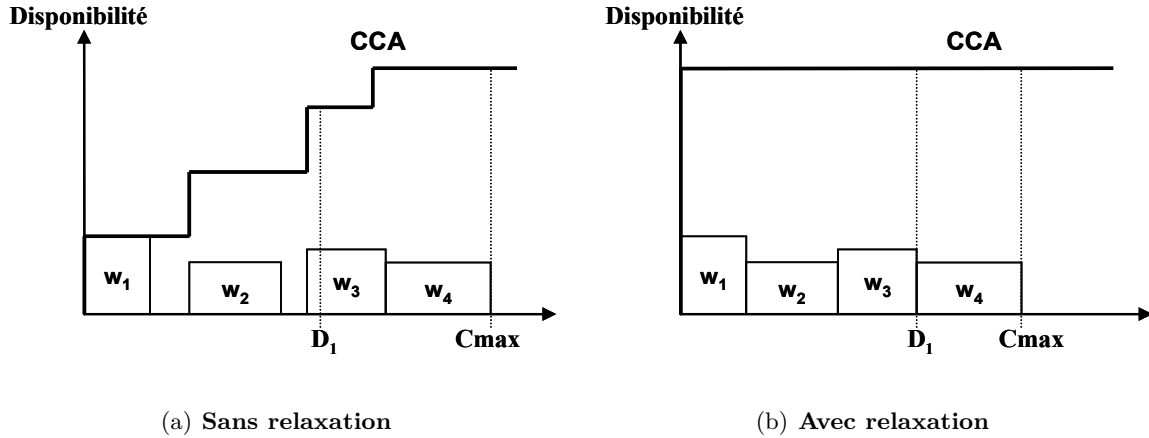


FIGURE 3.8 – Impact de la relaxation des contraintes de disponibilité des composants

En obtenant une borne supérieure du problème de la maximisation de la somme des pénalités des jobs à temps, on obtient automatiquement une borne inférieure de la somme des pénalités des jobs en retard. Pour obtenir une borne supérieure de la somme des pénalités des jobs à temps, nous devons placer dans l'intervalle $[0, D_1]$ un sous-ensemble de jobs (dont la durée totale est inférieure à D_1) qui maximise la somme des pénalités. Ce problème est équivalent à un problème de sac à dos, dans lequel les valeurs de satisfaction sont les pénalités de retard w_j , les poids correspondent aux temps de traitement des jobs p_j et la capacité du sac est égale à D_1 .

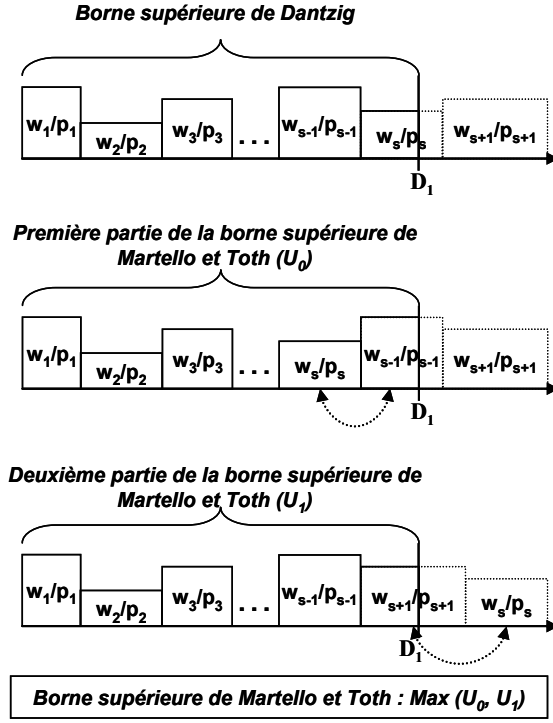


FIGURE 3.9 – Schéma de construction de la borne supérieure (Martello et Toth [102]) du problème de sac à dos

Pour obtenir une borne supérieure de ce problème, nous utilisons la borne supérieure proposée par Martello et Toth [102] (qui améliore celle de Dantzig [47]) pour le sac à dos. Cette borne consiste à trier les jobs dans l'ordre $(w_j/p_j \searrow)$, les placer dans cet ordre dans le sac jusqu'au job s qui n'entre pas complètement. Les auteurs évaluent les bornes obtenues quand des échanges des positions, entre les jobs s et $s - 1$ et entre s et $s + 1$ dans l'ordonnancement, sont faits et prennent la plus grande valeur. Voir le schéma de la figure 3.9.

Les premiers résultats expérimentaux nous ont montré que la relaxation des contraintes de disponibilité de composant est trop forte, et donc que la borne du sac à dos sous-jacent de capacité D_1 n'est pas bonne. En effet, cette relaxation élimine tout le temps mort associé aux ruptures de composant, les jobs peuvent aller dans le sac sans aucune contrainte (figure 3.8(b)), de ce fait, les pénalités des jobs en retard sont sous-estimées considérablement.

Pour pallier à ce problème, nous utilisons la borne supérieure des temps morts induits par les ruptures de composant dans l'intervalle $[0, D_1]$. Nous utilisons la borne inférieure $LB|AGO|IT(D_1)$ du temps mort et nous résolvons un nouveau problème de sac à dos de capacité UP/H en prenant $H = D_1$, comme montré dans la figure 3.10.

La borne inférieure pour la somme des pénalités des jobs en retard, notée $LB|AGOK|ST$ (borne inférieure de la somme des pénalités des jobs en retard en utilisant les ordres agréables et le problème de sac à dos relaxé), est égale à la différence entre la somme totale des pénalités de retard $\sum w_j$, et la borne supérieure du sac à dos de capacité UP/D_1 obtenue avec l'algorithme de Martello et Toth [102], notée UP/SW_1 .

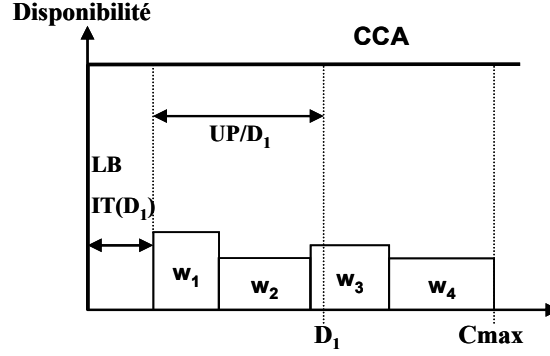


FIGURE 3.10 – Problème de sac à dos sous-jacent avec une borne supérieure de sa capacité

Borne inférieure pour la somme pondérée des dates de livraison des jobs $\sum w_j \hat{C}_j$

La procédure utilisée pour $\sum w_j \hat{u}_j$ (hypothèse (B)) peut être adaptée facilement pour le critère de l'hypothèse (C), en résolvant f problèmes de sac à dos, un pour chaque date de livraison fixe, voir figure 3.11.

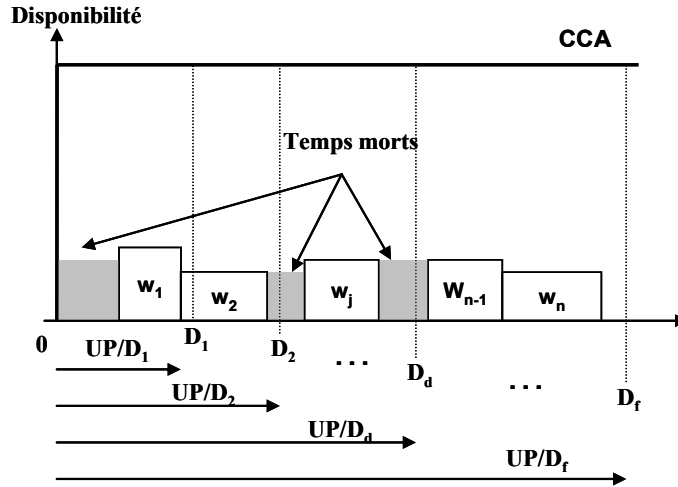


FIGURE 3.11 – Calcul de borne inférieure avec des ordres agréables et f sac à dos pour $\sum w_j \hat{C}_j$

Pour chaque intervalle $[0, D_d]$ nous pouvons calculer UP/D_d correspondant à la borne supérieure du temps utilisable dans cet intervalle en retirant la borne inférieure du temps mort de la durée de l'intervalle. Ensuite, nous pouvons calculer UP/SW_d , une borne supérieure de la somme des pénalités des jobs qui peuvent être placés dans l'intervalle $[0, UP/D_d]$ en utilisant la borne supérieure proposée par Martello et Toth [102] et déjà utilisée pour l'hypothèse (B). Ces bornes supérieures permettent de calculer la borne inférieure de $\sum w_j \hat{C}_j$ en appliquant le lemme 3.7.8.

Lemme 3.7.8 La somme $\sum_{d=1}^f (UP/SW_d - UP/SW_{d-1}) \times D_d$ est une borne inférieure de la somme pondérée des dates de livraison des jobs $\sum w_j \hat{C}_j$. Avec $UP/SW_0 = 0$ et $UP/SW_f = \sum_j w_j$.

Preuve Pour un ordonnancement σ quelconque, soit n_d la somme des pénalités des jobs dont la date de livraison est $\leq D_d$. La valeur de la somme pondérée des dates de livraison des jobs, $S(\sigma)$, est donnée par :

$$S(\sigma) = (n_f - n_{f-1})D_f + (n_{f-1} - n_{f-2})D_{f-1} + \dots + (n_d - n_{d-1})D_d + \dots + (n_2 - n_1)D_2 + n_1D_1$$

qui peut être réécrit comme suit :

$$S(\sigma) = n_f D_f - n_{f-1}(D_f - D_{f-1}) - \dots - n_d(D_{d+1} - D_d) - \dots - n_2(D_3 - D_2) - n_1(D_2 - D_1)$$

puisque $n_d \leq UP/SW_d$ pour tout d et $D_d - D_{d-1} \geq 0 \forall d$, on en déduit

$$S(\sigma) \geq UP/SW_f D_f - UP/SW_{f-1}(D_f - D_{f-1}) - \dots - UP/SW_d(D_{d+1} - D_d) - \dots - UP/SW_2(D_3 - D_2) - UP/SW_1(D_2 - D_1)$$

ou encore

$$\begin{aligned} S(\sigma) &\geq (UP/SW_f - UP/SW_{f-1})D_f + (UP/SW_{f-1} - UP/SW_{f-2})D_{f-1} + \dots + \\ &+ (UP/SW_d - UP/SW_{d-1})D_d + \dots + (UP/SW_2 - UP/SW_1)D_2 + UP/SW_1 D_1 \\ S(\sigma) &\geq \sum_{d=1}^f (UP/SW_d - UP/SW_{d-1})D_d \end{aligned}$$

et ce pour n'importe quel ordonnancement σ . Ainsi, $\sum_{d=1}^f (UP/SW_d - UP/SW_{d-1})D_d$ est une borne inférieure de la somme pondérée des dates de livraison des jobs. ■

Cette borne a été obtenue en utilisant les ordres agréables pour calculer une borne inférieure des temps morts et la borne supérieure de Martello et Toth [102] pour les problèmes induits de sac à dos. Nous la notons $LB|AGOK|\sum CT$.

Bornes inférieures à base de relaxation entière

Une relaxation de nos problèmes peut être obtenue en acceptant l'interruptibilité des jobs et en supposant que la consommation des composants se fait de manière continue et uniforme pendant le traitement des jobs et pas au début de l'exécution comme nous l'avons supposé jusqu'à maintenant.

Nous présentons ici des bornes inférieures pour les trois critères C_{max} (pour les hypothèses (A) et pour (B)), $\sum w_j \hat{u}_j$ (pour l'hypothèse (B)) et $\sum w_j \hat{C}_j$ (pour l'hypothèse (C)).

Borne inférieure pour le C_{max}

Le problème obtenu en utilisant cette relaxation est un cas particulier du problème considéré par Cochand *et al.* [44], qui cherchent à minimiser la durée totale de l'ordonnancement avec des arrivées de composant en forme d'escalier. Les auteurs utilisent la programmation linéaire pour résoudre ce problème.

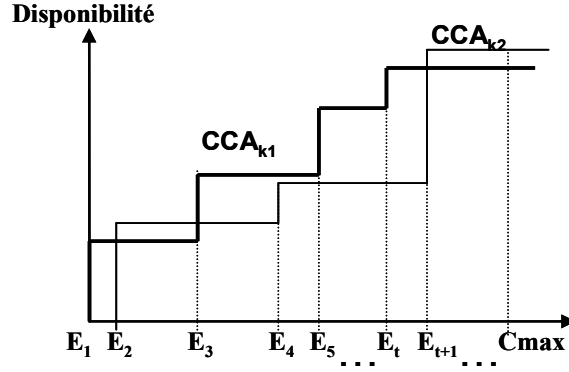


FIGURE 3.12 – Discretisation du temps par événements, minimisation du $Cmax$

Dans Cochand *et al.* [44], l'axe du temps est divisé en g périodes, le début et la fin de chaque période correspondent à des événements E_t . Pour la minimisation du $Cmax$, un événement correspond à une arrivée de composants (tous composants confondus), la première arrivée d'un des composants a toujours lieu à l'instant 0 (début de l'axe des temps si tout job nécessite au moins un composant). Le dernier événement, E_{g+1} , correspond à la fin de traitement du dernier job, sa date est inconnue. Aucun événement ne peut survenir dans une période, comme indiqué dans la figure 3.12.

Les auteurs ont conçu une procédure à deux phases, la première phase consiste à déterminer combien de chaque job est traité dans chaque période (en résolvant un programme linéaire), la deuxième phase consiste à trouver un ordonnancement réalisable dans chaque période avec l'algorithme de De Werra [51]. Seulement la première phase est utilisée ici car obtenir un ordonnancement réalisable pour leur problème est inutile pour calculer notre borne inférieure.

Le programme linéaire pour la première phase, correspondant à nos hypothèses, utilise les paramètres de la table 3.2.

TABLE 3.2 – Paramètres

Paramètre	Description
Γ_t	durée de la période t , qui correspond à $E_{t+1} - E_t$
$Q_{k,t}$	quantité de composant k arrivée à E_t
$a'_{j,k}$	consommation de composant k par unité de temps du job j . Pour chaque job j et chaque composant k , $a'_{j,k}$ est égal au rapport entre la consommation $a_{j,k}$ et la durée p_j .

Il y a deux ensembles de variables. La variable $X_{j,t}$ qui détermine la quantité de temps pendant laquelle le job j est traitée pendant la période t . Puis, E_{g+1} qui correspond à la date du dernier événement et donc à $Cmax$. Le modèle linéaire est formalisé comme suit :

Contraintes temporelles et d'exécution des jobs		
$\forall t$	$\sum_j X_{j,t} \leq \Gamma_t$	(1)
$\forall j$	$\sum_{t=1}^g X_{j,t} = p_j$	(2)

La famille de contraintes (1) limite la somme des temps de traitement associés à une période à la durée donnée de cette période ; la famille (2) assure que les jobs sont complètement exécutés.

Contraintes de composants		
$\forall \ell = 1, \dots, g, \forall k$	$\sum_{t=1}^{\ell} \sum_j X_{j,t} a_{j,k}^{\ell} \leq \sum_{t=1}^{\ell} Q_{k,t}$	(3)

La famille (3) implique que les courbes cumulées des consommations de composants sont toujours plus petites que les courbes des arrivées. L'objectif est de minimiser $E_{g+1} = \sum_t \Gamma_t$. Ce problème est résolu par programmation linéaire.

La borne inférieure pour le $Cmax$, obtenue en appliquant la méthode proposée par Cochand *et al.* [44] sur ce problème relaxé, est notée $LB|IR|CT$ (borne inférieure en utilisant la relaxation entière pour le $Cmax$).

On peut noter que, comme dans le cas des ordres agréables, la longueur de chaque intervalle $[0, E_t]$ peut être corrigée en prenant en compte une borne inférieure des temps morts dans cet intervalle. Il faut alors ajouter la famille de contraintes suivante qui limite l'utilisation des temps à la durée utilisable de l'intervalle (sans les temps morts).

Contraintes de temps morts		
$\forall \ell = 1, \dots, g$	$\sum_{t=1}^{\ell} \sum_j X_{j,t} \leq E_{\ell} - LB AGO IT(E_{\ell})$	(4)

En faisant cela, nous nous retrouvons avec des contraintes plus strictes pour la somme des temps de traitement dans chaque intervalle. La borne inférieure pour le $Cmax$ obtenue en introduisant la contrainte des temps morts, est notée $LB|IT \sim IR|CT$.

Lemme 3.7.9 *La borne $LB|IT \sim IR|CT$ domine la borne inférieure $LB|AGO|CT$ et la borne $LB|IR|CT$.*

Preuve En effet, la famille de contraintes (4) impose que le temps mort total du programme linéaire est supérieur ou égal à la borne inférieure du temps mort obtenue avec les ordres agréables $LB|IT \sim IR|IT(Cmax) \geq LB|AGO|IT(Cmax)$.

Nous supposons à présent que la borne $LB|IT \sim IR|CT$ ne domine pas $LB|AGO|CT$. Donc il existe au moins une instance pour laquelle :

$$LB|AGO|CT > LB|IT \sim IR|CT$$

hors $LB|AGO|CT = \sum p_j + LB|AGO|IT(Cmax)$ et $LB|IT \sim IR|CT = \sum p_j + LB|IT \sim IR|IT(Cmax)$, d'où

$$\sum p_j + LB|AGO|IT(Cmax) > \sum p_j + LB|IT \sim IR|IT(Cmax)$$

il s'en suit que

$$LB|AGO|IT(Cmax) > LB|IT \sim IR|IT(Cmax)$$

ce qui est une contradiction. On en conclut que $LB|IT \sim IR|CT \geq LB|AGO|CT$ pour toute instance.

Par ailleurs, $LB|IT \sim IR|CT$ domine $LB|IR|CT$ car on ajoute une famille de contraintes qui ne peut qu'augmenter les temps morts et donc la valeur de $Cmax$. ■

Lemme 3.7.10 La borne $LB|IT \sim IR|CT = \text{Max}(LB|AGO|CT, LB|IR|CT)$.

Preuve Si $LB|AGO|CT$ est inférieure à $LB|IR|CT$, ceci implique que la borne $LB|AGO|IT(Cmax)$ pour les temps morts (obtenue avec les ordres agréables) est inférieure à la borne $LB|IR|IT(Cmax)$ (obtenue avec la relaxation entière), alors la famille de contraintes (4) n'a aucun effet et $LB|IT \sim IR|CT = LB|IR|CT$.

Si, $LB|AGO|CT$ est supérieure à $LB|IR|CT$ alors la borne des temps morts $LB|AGO|IT(Cmax)$ (obtenue avec les ordres agréables) est supérieure à la borne $LB|IR|IT(Cmax)$ (obtenue avec la relaxation entière) et la famille de contraintes (4) implique que :

$$LB|IT \sim IR|IT(Cmax) = LB|AGO|IT(Cmax)$$

et donc $LB|IT \sim IR|CT = LB|AGO|CT$.

Nous pouvons conclure que $LB|IT \sim IR|CT = \text{Max}(LB|AGO|CT, LB|IR|CT)$. ■

Borne inférieure pour la somme des pénalités des jobs en retard $\sum w_j \hat{u}_j$

En utilisant la même relaxation entière que pour le $Cmax$, nous pouvons adapter le programme linéaire pour obtenir une borne supérieure de la somme des pénalités des jobs à temps. Nous ajoutons un événement pour la discrétisation du temps, à la date D_1 , comme dans la figure 3.13. Dans cette partie, nous supposons qu'il y a $g+1$ événements (et g périodes) où E_{g+1} correspond à l'instant D_1 , le départ du camion de livraison aux magasins.

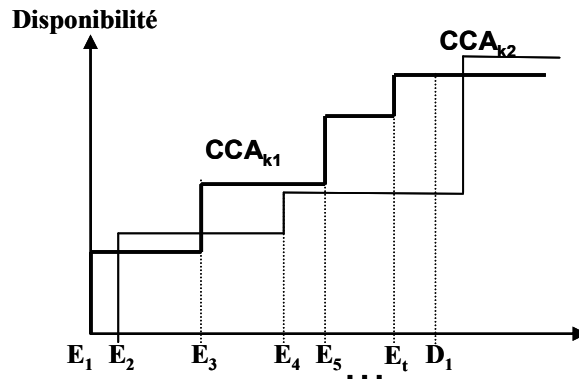


FIGURE 3.13 – Discretisation du temps par événements, hypothèse (B)

Nous conservons ici les mêmes paramètres que pour la borne du $Cmax$, ainsi que la variable $X_{j,t}$ et les familles de contraintes (1) et (3). La famille de contraintes (2) doit être modifiée comme suit :

Contraintes d'exécution des jobs

$$\forall j \quad \sum_{t=1}^g X_{j,t} \leq p_j \quad (2')$$

car en acceptant l'interruptibilité des jobs, les jobs peuvent très bien ne pas être terminés avant D_1 . Il est aussi nécessaire de modifier la fonction objectif, celle-ci consiste maintenant à maximiser les pénalités associées aux proportions des morceaux de jobs ordonnancés avant la date D_1 :

$$Max \sum_j \sum_{t=1}^g \frac{X_{j,t}}{p_j} w_j$$

Comme pour les ordres agréables, cette borne supérieure des pénalités des jobs à temps est transformée en une borne inférieure des pénalités des jobs en retard. La borne inférieure pour $\sum w_j \hat{u}_j$ est notée $LB|IR|ST$.

On peut remarquer que, comme nous l'avons fait pour le $Cmax$, il est possible d'ajuster les temps utilisables de chaque intervalle $[0, E_t]$ à l'aide des bornes inférieures des temps morts obtenues avec les ordres agréables. Il faudrait ajouter la famille de contraintes (4). On obtient alors autre nouvelle borne supérieure pour les pénalités des jobs à temps et ainsi une borne inférieure des pénalités des jobs en retard, que nous notons $LB|IT \sim IR|ST$ et qui est au moins aussi bonne que $LB|IR|ST$.

Borne inférieure pour la somme pondérée des dates de livraison des jobs $\sum w_j \hat{C}_j$

Pour appliquer la relaxation entière pour la somme pondérée des dates de livraison des jobs (hypothèse (C)), nous sommes dans le cas général où les événements correspondent à des arrivées de composant ou des départs de livraisons, voir figure 3.14. Ici aussi il y a $g + 1$ événements et g périodes, le dernier événement correspond au dernier départ de livraison D_f .

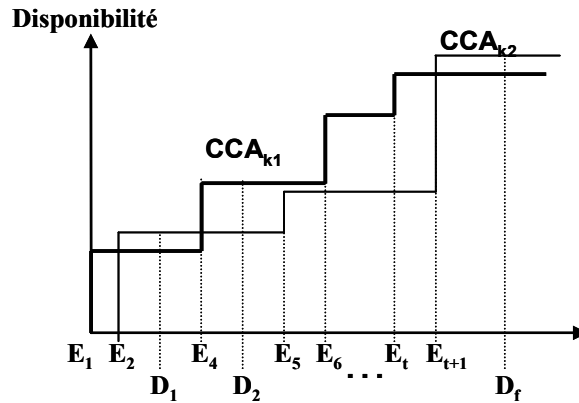


FIGURE 3.14 – Discretisation du temps par événements, cas général

Avec les mêmes paramètres et les mêmes notations que pour les deux problèmes précédents, nous supposons que si l'événement E_t ne correspond pas à une arrivée de composant, alors la quantité de composant arrivée avec l'événement t , $Q_{k,t}$ est égale à 0 pour tout composant k .

Les familles de contraintes (1), (2) et (3) sont conservées pour ce cas. La fonction objectif

correspond maintenant à la minimisation de la somme pondérée des portions de job livrées à chaque date de livraison, qui s'exprime comme suit :

$$\text{Min} \sum_{d=1}^f \sum_j \sum_{1 \leq t \leq g: D_{d-1} < E_{t+1} \leq D_d} \frac{X_{j,t}}{p_j} w_j D_d$$

La borne obtenue avec cette relaxation entière pour la minimisation de la somme pondérée des dates de livraison des jobs est notée $LB|IR|\sum CT$. Nous pouvons corriger les temps des intervalles $[0, E_t]$ comme pour les autres bornes (avec une borne inférieure des temps morts) en ajoutant la famille de contraintes (4) au modèle. La borne ainsi obtenue est notée $LB|IT \sim IR|\sum CT$.

Il faut remarquer qu'il n'y a pas de dominance entre les bornes inférieures $LB|IT \sim IR|ST$ et $LB|AGOK|ST$ ni entre $LB|IT \sim IR|\sum CT$ et $LB|AGOK|\sum CT$ car les relaxations utilisées sont complémentaires. Dans les bornes obtenues avec $AGOK$, l'interruptibilité est interdite, mais l'association entre les temps de traitement et les pénalités sont modifiées pour devenir agréable, en plus nous utilisons un algorithme de sac à dos sans contraintes de disponibilité des composants. Dans les bornes obtenues avec $IT \sim IR$, l'association entre les temps et les pénalités ne sont pas modifiées tandis que l'interruptibilité est autorisée et les contraintes des composants sont respectées. En conséquence, les bornes peuvent être meilleures ou moins bonnes selon les instances considérées.

Bornes inférieures utilisant l'algorithme de "Johnson" pour le C_{max}

Dans cette section, nous construisons une borne inférieure pour la minimisation du C_{max} concernant les hypothèses (A) et (B). Nous utilisons une relaxation de la façon dont les composants arrivent à la plateforme, nous supposons qu'au lieu d'avoir des courbes cumulées en escalier, les composants arrivent de manière continue et linéaire comme montré dans la figure 3.15.

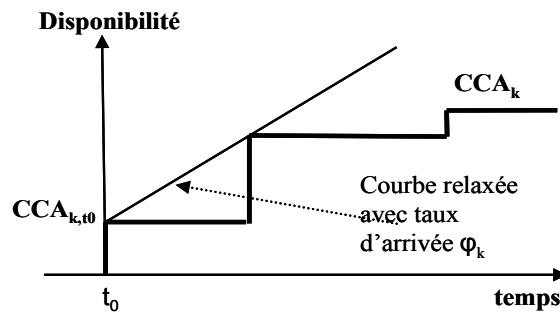


FIGURE 3.15 – Relaxation TKEX pour une ressource

De manière générale, s'il existe plusieurs composants, le même procédé de relaxation sera exécuté pour n'importe quel composant, nous prendrons la plus grande borne inférieure obtenue

pour tous les composants. Pour simplifier les explications nous considérons de manière arbitraire un composant k . Nous relaxons l'arrivée en escalier du composant en prenant une courbe linéaire, qui commence à la coordonnée (t_0, CCA_{k,t_0}) , qui est toujours au dessus de la courbe en escalier CCA et qui est tangente à au moins un point de CCA_k , voir la figure 3.15.

Le problème d'ordonnancement à une machine avec des arrivées continues de composant a été résolu de manière polynomiale par Toker *et al.* [146] quand il y a un seul composant k et par Xie [156] pour plusieurs composants. Si φ_k est le taux d'arrivée du composant k par unité de temps (la pente de la courbe relaxée), les auteurs montrent que le problème noté $1/Cont(1) : \varphi_k, a_{j,k}/Cmax$, selon la notation $\alpha/\beta/\gamma$, est équivalent à un problème de flowshop à deux machines sans contrainte de composant où les temps de traitement sur les machines 1 et 2, $p_{j,1}$ et $p_{j,2}$, sont égaux à $\frac{a_{j,k}}{\varphi_k}$ et p_j respectivement. Les temps morts dans le problème original correspondent à des temps morts sur la deuxième machine dans le problème du flowshop. Ainsi, le problème avec une ressource k , que nous notons $1/Cont(1) : \varphi_k, a_{j,k}/Cmax$, peut être résolu en utilisant la règle de Johnson (Johnson [86]) pour le problème du flowshop à deux machines.

La règle de Johnson pour le problème du flowshop à deux machines consiste à partitionner les jobs en deux sous-ensembles : l'ensemble "1" contient les jobs pour lesquels $p_{j,1} \leq p_{j,2}$ et l'ensemble "2" contient les jobs pour lesquels $p_{j,1} > p_{j,2}$. la solution est obtenue en commençant par les jobs de l'ensemble "1" triés dans l'ordre SPT et en terminant par les jobs de l'ensemble "2" triés dans l'ordre LPT ; l'ordre utilisé est le même sur les deux machines (flowshop de permutation). Cette règle minimise le $Cmax$. En utilisant les résultats de Toker *et al.* [146] et de Xie [156], dans l'ordonnancement optimal qui minimise le $Cmax$ pour le composant k , le job j précède le job i si :

$$\text{Min} \left(\frac{a_{j,k}}{\varphi_k}, p_i \right) \leq \text{Min} \left(\frac{a_{i,k}}{\varphi_k}, p_j \right)$$

Il est à noter que la règle de Johnson n'est pas optimale dans le cas général où les arrivées de composant sont en forme d'escalier. Le lemme 3.7.11 donne un contre-exemple de non optimalité.

Lemme 3.7.11 *Même pour le cas le plus simple, quand les consommations et les durées des jobs sont quelconques, et où il y a un seul composant k qui arrive en escalier de manière régulière, V unités de composant toutes les V périodes, comme illustre la figure 3.16(a), la règle de Johnson ne minimise pas le $Cmax$.*

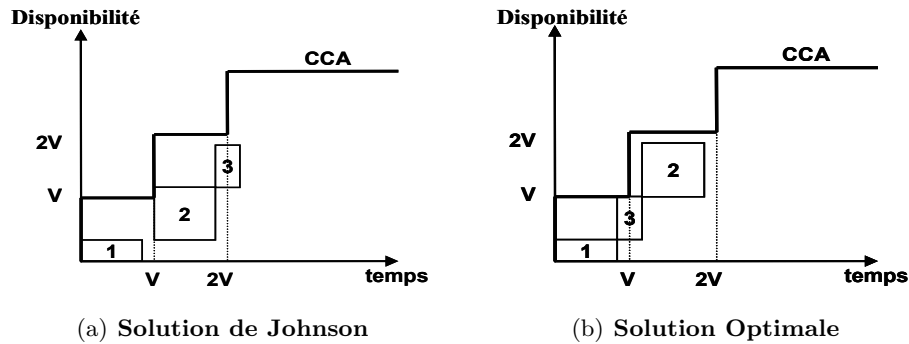


FIGURE 3.16 – Courbe d'arrivée uniforme en escalier pour un composant

Preuve Soient les jobs $j = 1, 2, 3$ qui consomment $a_{1,k} = \frac{V}{2} - \epsilon$, $a_{2,k} = \frac{V}{2} + 2\epsilon$ et $a_{3,k} = \frac{V}{2} + \epsilon$ de composant k , et dont les durées de traitement sont $p_1 = \frac{V}{2} + 2\epsilon$, $p_2 = \frac{V}{2} + 3\epsilon$ et $p_3 = \frac{V}{2} - \epsilon$ respectivement.

En appliquant la règle de Johnson entre les jobs deux à deux on obtient :

Le job 1 est ordonnancé avant le job 2 si :

$$\text{Min}(\frac{V}{2} - \epsilon, \frac{V}{2} + 3\epsilon) \leq \text{Min}(\frac{V}{2} + 2\epsilon, \frac{V}{2} + 2\epsilon) \Rightarrow \frac{V}{2} - \epsilon \leq \frac{V}{2} + 2\epsilon \Rightarrow \text{vrai}$$

Le job 1 est ordonnancé avant le job 3 si :

$$\text{Min}(\frac{V}{2} - \epsilon, \frac{V}{2} - \epsilon) \leq \text{Min}(\frac{V}{2} + \epsilon, \frac{V}{2} + 2\epsilon) \Rightarrow \frac{V}{2} - \epsilon \leq \frac{V}{2} + \epsilon \Rightarrow \text{vrai}$$

Le job 2 est ordonnancé avant le job 3 si :

$$\text{Min}(\frac{V}{2} + 2\epsilon, \frac{V}{2} - \epsilon) \leq \text{Min}(\frac{V}{2} + \epsilon, \frac{V}{2} + 3\epsilon) \Rightarrow \frac{V}{2} - \epsilon \leq \frac{V}{2} + \epsilon \Rightarrow \text{vrai}$$

alors la règle de Johnson donne l'ordonnancement : 1, 2, 3 de durée $2V + 2\epsilon$ (figure 3.16(a)) tandis que l'ordonnancement optimal est donné par la séquence : 1, 3, 2 de durée $1.5V + 4\epsilon$ (figure 3.16(b)) qui est plus petit dès que ϵ est strictement inférieur à $0.25V$.

Nous concluons que la règle de Johnson n'est pas optimale pour les problèmes avec des arrivées en composant en forme d'escalier. ■

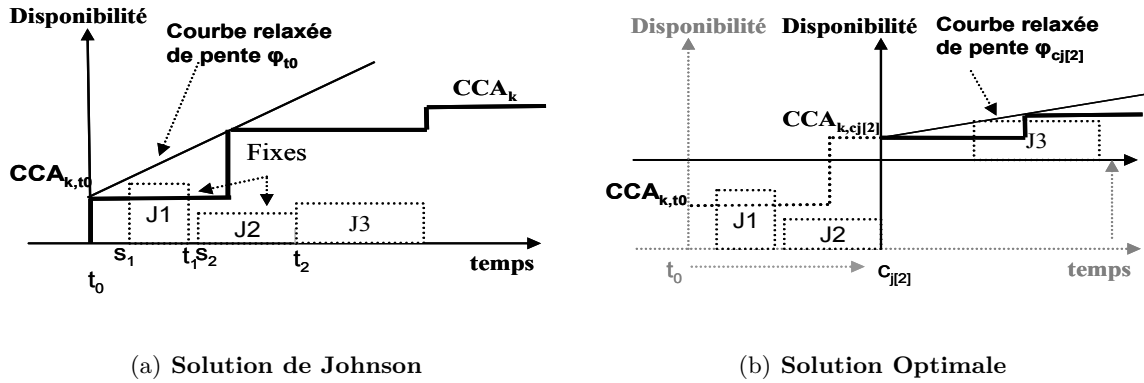


FIGURE 3.17 – Deux relaxations TKEX successives pour une ressource

Comme cette relaxation peut être trop forte, particulièrement au début de l'ordonnancement, nous avons conçu une procédure itérative qui améliore la borne.

Soit $\sigma_{JH(t_0)}$ l'ordonnancement obtenu en appliquant la règle de Johnson avec la courbe relaxée à partir de l'instant t_0 , la procédure itérative consiste à analyser le nouveau problème obtenu en relaxant la courbe cumulée des arrivées en escalier actualisée après la fin de chaque job ($c_{j[i]}$) de l'ordonnancement $\sigma_{JH(t_0)}$, en commençant par le premier job $i = 1$. Nous résolvons un nouveau problème si la pente de la nouvelle relaxation est strictement plus petite que la pente de la relaxation en cours.

Cette procédure est explicitée dans l'algorithme 3. Soient $t = t_0$, $\sigma = \sigma_{JH(t_0)}$, $q = 0$ la quantité de jobs placés avant $t = t_0$ et $\varphi = \varphi_t$ la pente de la courbe relaxée à partir de l'instant t .

```

si  $i \leq n - q$  alors
    actualiser la courbe cumulée en escalier des arrivées ( $CCA_k$ ) avec la consommation
    du job  $j_{[i]}$  de  $\sigma_{JH(t)}$ ,  $CCA_k = CCA_k - a_{j_{[i]},k}$ ;
    si  $CCA_{k,c_{j_{[i]}}} \geq 0$  et  $\varphi_{c_{j_{[i]}}} < \varphi$  alors
        calculer l'ordonnancement  $\sigma_{JH(c_{j_{[i]}})}$  avec la courbe de pente  $\varphi_{c_{j_{[i]}}}$  et les jobs qui
        n'ont pas été placés avant  $c_{j_{[i]}}$ ;
         $i = 1$ ,  $t = c_{j_{[i]}}$ ,  $q = q + 1$ ;
        appliquer l'algorithme 3;
    sinon
         $i = i + 1$ ,  $q = q + 1$ ;
        appliquer algorithme 3
    fin
fin
    
```

Algorithm 3: Procédure itérative de relaxation continue des arrivées des composants

Nous pouvons voir un exemple de la procédure itérative, pour un composant et pour deux itérations dans les figures 3.17(a) et 3.17(b). L'amélioration considérée peut être appliquée pour chaque composant de manière indépendante, nous garderons la plus grande valeur de $Cmax$ parmi tous les composants.

La borne inférieure pour le $Cmax$ obtenue avec cette relaxation est notée $LB|UCA|CT$ (borne inférieure avec relaxation des arrivées uniformes et continues pour le $Cmax$).

Récapitulatif des bornes inférieures

Le tableau 3.3 résume les bornes conçues pour les différents critères, $Cmax$ (hypothèses (A) et (B)), $\sum w_j \hat{u}_j$ (hypothèse (B)) et $\sum w_j \hat{C}_j$ (hypothèse (C)), avec les trois techniques : ordres agréables des caractéristiques des jobs, relaxation entière de traitement des jobs et relaxation continue des arrivées de composant.

Table 3.3 – Tableau récapitulatif des bornes inférieures

Critère	Ordres Agréables	Relaxation Entière		Relaxation continue
		Interrup.	+ Temps Morts	
$Cmax$	$LB AGO CT$	$LB IR CT$	$LB IT \sim IR CT$	$LB UCA CT$
$\sum w_j \hat{u}_j$	$LB AGOK ST$	$LB IR ST$	$LB IT \sim IR ST$	
$\sum w_j \hat{C}_j$	$LB AGOK \sum CT$	$LB IR \sum CT$	$LB IT \sim IR \sum CT$	

Pour chaque critère, nous prendrons la meilleure borne inférieure trouvée, en éliminant des calculs les bornes dominées. La borne inférieure pour le critère général de l'hypothèse (B) : $(1 + \sum w_j \hat{u}_j)Cmax$ est calculée avec les meilleures bornes inférieures pour le $Cmax$ et pour $\sum w_j \hat{u}_j$.

3.7.4 Schéma des Procédures par Séparation et Evaluation proposées

Nous présentons ici le schéma de séparation et la stratégie d'exploration que nous avons utilisé dans les procédures par séparation et évaluation pour chaque problème correspondant aux hypothèses (A), (B) et (C). Ensuite, nous donnons le schéma de fonctionnement général de nos PSE.

Schéma de séparation

Pour les hypothèses (A), (B) et (C), les critères sont toujours réguliers. Pour les critères réguliers, les ordonnancements, semi-actifs (calés à gauche ou au plus tôt en respectant les contraintes) sont des ensembles dominants (Baker [5]), c'est-à-dire qu'ils contiennent au moins une solution optimale. Si l'objectif est de fournir une solution optimale, il suffit donc d'explorer l'ensemble des ordonnancements semi-actifs. Pour les problèmes de n jobs à une machine, cet ensemble est en correspondance biunivoque avec l'ensemble des $n!$ permutations. Nous allons donc utiliser la technique de séparation la plus classique pour les problèmes de permutation.

Il existe en particulier, trois grandes familles de schémas : ordonnancements partiels en partant du début, ordonnancements partiels en partant de la fin (Brown et Lomnicki [21], McMahon and Burton [105]) et ordonnancements partiels en partant simultanément du début et de la fin (Potts [122]). Dans le cas où il y a des temps morts, les schémas les plus intéressants (ou au moins les plus faciles à mettre en œuvre) sont généralement ceux qui partent du début.

Pour les permutations, le schéma de séparation le plus classique consiste à chaque niveau de l'arbre, à compléter une séquence partielle σ avec l'un des jobs non encore placés. De manière générale, la racine de l'arbre représente la séquence vide $\sigma = \emptyset$; à chaque nœud du niveau i de l'arbre, une séquence partielle, (σ) de i éléments est associée, cette séquence correspond aux i jobs qui sont dans les i premières positions d'un ordonnancement partiel. Chaque nœud de l'arbre de recherche a $n - i$ fils, chacun correspond à une nouvelle séquence σ de $i + 1$ éléments, composées des i éléments de leur père suivis d'un job j non encore considéré, comme illustré dans la figure 3.18. Suivant cette logique de décomposition, chaque feuille de l'arbre correspond à une séquence de n éléments et donc à un ordonnancement complet.

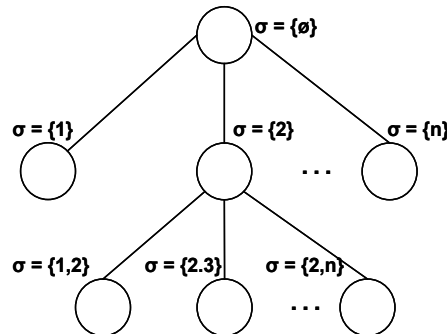


FIGURE 3.18 – Exemple de la construction de l'arbre de recherche pour nos PSE

Stratégie d'exploration

Tout comme la qualité des bornes inférieures et supérieures, le choix d'une stratégie d'exploration de l'arbre de recherche a un impact déterminant sur l'efficacité de la procédure par séparation et évaluation. En général, l'objectif de l'exploration est de trouver le plus rapidement possible des solutions de bonne qualité qui nous permettent de couper les branches de l'arbre le plus tôt possible et ainsi éviter leur exploration et donc les pertes de temps à faire des recherches infructueuses.

Pour effectuer l'exploration dans un arbre d'une PSE, il existe deux types de stratégies d'exploration : en profondeur d'abord et en largeur d'abord. Les stratégies en profondeur développent un nœud par niveau à la fois. Tandis que les stratégies en largeur développent tous les nœuds d'un même niveau de manière consécutive, dans ce cas il est nécessaire de stocker en mémoire les nœuds d'un même niveau qui sont déjà développés et cela entraîne souvent l'explosion de l'utilisation de la mémoire. Cependant les stratégies d'exploration en largeur ont un intérêt lorsque l'on transforme les PSE, en méthodes exactes, en méthodes arborescentes approchées comme le beam search qui n'explore que les f_i meilleurs nœuds supposés du niveau i .

Dans le but de minimiser l'utilisation de mémoire, nous utilisons une stratégie d'exploration en profondeur d'abord. Lors de la séparation d'un nœud A , le nouveau nœud à traiter est le premier de la liste des fils de A si celui-ci a une borne inférieure qui montre qu'il a potentiellement une solution meilleure que la meilleure solution connue ou qu'une borne supérieure, sinon la branche correspondante est coupée et on passe au fils suivant de A ; s'il ne reste plus de fils à explorer, on remonte dans la branche de l'arbre et on explore un frère de A . L'exploration consiste donc à se déplacer vers le bas et vers le haut de l'arbre, en ajoutant ou en enlevant un job de la séquence partielle à la fois.

Nous notons que puisque nos critères sont réguliers, et que l'ensemble d'ordonnancements actifs est dominant pour ce type de critères (Baker [5]), nous construisons seulement des ordonnancements partiels actifs (sous-ensembles plus petits que les ordonnancements semi-actifs), i.e. les jobs ajoutés ne créent jamais de temps mort dans lequel un job non encore placé pourrait être complètement ordonnancé. Ainsi, lors de la séparation d'un nœud du niveau i , les jobs qui peuvent être placés après l'ordonnancement partiel sont seulement les jobs qui construisent des ordonnancements actifs et pas tous les $n - i$ fils qu'il aurait selon le schéma de séparation.

Fonctionnement général de nos Procédures par Séparation et Evaluation

Comme nous venons de le dire, nos PSE ne construisent que des ordonnancements actifs en raison du caractère régulier des critères : $Cmax$, $(1 + \sum w_j \hat{u}_j) \times Cmax$ et $\sum w_j \hat{C}_j$, des problèmes (A), (B) et (C) respectivement. Nous rappelons aussi que des temps morts peuvent être créés dans nos problèmes en cas de rupture des composants nécessaires à l'exécution des jobs. Nous utilisons les bornes inférieures et les méthodes d'approximation polynomiales, présentées dans les sections 3.7.2 et 3.7.3 respectivement, pour décrire la procédure par séparation et évaluation générique pour les trois hypothèses (A), (B) et (C). Pour les trois problèmes d'ordonnancement, la procédure que nous décrivons ici est appliquée.

Avant le début de notre PSE, une série de méthodes d'approximation polynomiales (décrites dans 3.7.2) sont appliquées pour trouver une bonne valeur, notée $BEST$, pour le critère considéré, la solution associée étant notée $\sigma(BEST)$. En outre, à un niveau quelconque de l'arbre d'exploration (par exemple, quand le niveau est égal à λ_1 modulo λ_2 avec $\lambda_1 = 3$ et $\lambda_2 = 6$), et dans le but d'améliorer la valeur de la meilleure solution connue $BEST$, ces méthodes rapides

sont utilisées pour compléter l'ordonnancement partiel du nœud considéré. La solution *BEST* est également améliorée quand un ordonnancement strictement meilleur est construit, i.e. lorsqu'on arrive à une feuille de l'arbre de recherche.

Puisqu'il y a plusieurs bornes inférieures, et pour limiter raisonnablement le coût d'évaluation de chaque nœud, pour chaque critère, nous intercalons leur utilisation un niveau sur deux ou sur trois (selon le nombre de bornes inférieures qu'il y a pour le critère en cours) pour couper des branches.

Par ailleurs, à n'importe quel niveau de l'arbre d'exploration, l'ordonnancement partiel est optimalement complété quand le sous-problème associé devient polynomial. Par exemple, après la dernière arrivée de composant pour la minimisation du C_{max} pour l'hypothèse (A).

Une fonction appelée *SELECTACTIVE* est capable de choisir d'une liste L_a (cette liste contient seulement les jobs qui donnent des ordonnancements actifs) un job qui sera ajouté à l'ordonnancement partiel considéré P tout en prenant en compte les règles de priorité statiques et dynamiques et les propriétés agréables présentées en section 3.7.2. Par ailleurs, une fonction appelée *FOLLOWINGACTIVE* a exactement le même résultat sauf que les jobs qui ont déjà été considérés pour compléter le même ordonnancement partiel P sont éliminés et le résultat de la fonction est égal à -1 quand tous les jobs intéressants ont été considérés pour compléter P . Un nœud quelconque de l'arbre est caractérisé par : l'ordonnancement partiel P qu'il représente ; l'instant de fin d'exécution t de cet ordonnancement partiel compte tenu des contraintes de ressources ; la liste L_a des jobs qui peuvent être ajoutés à l'ordonnancement partiel P ; la liste L_c des jobs qui ont déjà été considérés ; la borne inférieure des ordonnancements ayant la séquence partielle P au début.

Avant le début de la PSE : l'ordonnancement partiel P initial est vide ; le temps t est égal à 0 ; la liste L_c des jobs déjà considérés pour compléter P est vide ; A_0 dénote le nœud qui est à la racine de l'arbre de recherche correspondant à ces paramètres et la pile S d'ordonnancements partiels construits ne contient que A_0 . Avec ces paramètres, l'algorithme 4 met en œuvre nos procédures par séparation et évaluation.

3.7.5 Règles de dominance

Les règles de dominance et autres règles de priorité sont très utiles pour limiter l'exploration de l'arbre de recherche. En effet, comme nous l'avons dit avant, lorsque l'on sait qu'un type de solutions est dominant alors on peut ne pas explorer les sous-ensembles qui ne contiennent pas de solution de ce type. Nous décrivons ici les règles que nous avons définies pour nos trois problèmes.

En règle générale, quand deux jobs (i, j) vérifient une "propriété agréable" soit intrinsèquement soit parce que le temps courant t est plus grand que la dernière arrivée de composant (pour le C_{max}) ou après la date de livraison fixe D_1 (pour la minimisation la somme des pénalités des jobs en retard), alors le job i est ordonnancé avant le job j , un cas particulier apparaît quand deux jobs ont exactement les mêmes caractéristiques.

Les propriétés de dominance globales deviennent de plus en plus riches au fur et à mesure que la séquence partielle grandit et que l'on approche de la fin de livraison des différents composants.

Lemme 3.7.12 *de dominance (dynamique) globale pour l'hypothèse (A) :*

Pour tout ordonnancement réalisable qui commence par la séquence partielle σ se terminant à l'instant t :

```

 $P = \emptyset$ ;  $t = 0$ ;  $L_c = \emptyset$ ;
 $BEST$  = la meilleure valeur du critère correspondant à la meilleure solution obtenue;
 $LB$  = la meilleure valeur d'une borne inférieure du critère pour l'ordonnancement partiel
 $P$  vide;
si  $LB == BEST$  alors
    |  $BEST$  est optimale et on arrête l'exploration;
sinon
    |  $A_0 = \{P, t, L_a, L_c, LB\}$ ;
    |  $S = A_0$ ;
    | tant que  $S \neq \emptyset$  faire
    |   |  $A = \{P, t, L_a, L_c, LB\}$ , le haut de la pile  $S$ ;
    |   | si  $L_c == \emptyset$  alors
    |   |   |  $i = SELECTACTIVE(A)$ ;
    |   | sinon
    |   |   |  $i = FOLLOWINGACTIVE(A)$ ;
    |   | fin
    |   | si  $i == -1$  alors
    |   |   | Effacer le haut de la pile  $S$ ;
    |   | sinon
    |   |   |  $i$  est ordonnancé aussi tôt que possible après  $P$ ;
    |   |   |  $P' = P \cup i$ ;
    |   |   |  $t' = C_i$ ;
    |   |   |  $L_c = L_c \cup i$ ;
    |   |   |  $LB'$  = la borne inférieure du critère pour l'ordonnancement commençant par
    |   |   | la séquence partielle  $P'$  (calculée différemment selon le niveau);
    |   |   |  $LB' = \max(LB, LB')$ ;
    |   |   | si le niveau de  $A$  dans l'arbre modulo  $k_2$  est égal à 0 alors
    |   |   |   |  $BEST_{new}$  = la meilleure valeur du critère correspondant à des solutions
    |   |   |   | réalisables obtenues avec les méthodes rapides, qui complètent
    |   |   |   | l'ordonnancement partiel  $P$ ;
    |   |   |   | si  $BEST_{new} < BEST$  alors
    |   |   |   |   |  $BEST = BEST_{new}$  ;
    |   |   |   | fin
    |   |   | fin
    |   |   | si  $LB' < BEST$  alors
    |   |   |   |  $L'_c = \emptyset$  ;
    |   |   |   |  $A' = \{P', t', L'_c, LB'\}$  sur le haut de la pile  $S$ ;
    |   |   | fin
    |   | fin
    | fin
fin

```

Algorithm 4: Procédure par séparation et évaluation pour les problèmes (A), (B) et (C)

1. si $t \geq T_{last}$ (date de dernière arrivée de composants) alors les jobs restant peuvent être placés dans n'importe quel ordre pour minimiser C_{max} .
2. Si, à la date t , pour deux jobs i et j non encore placés, on a, pour tous les composants k pour lesquels ils restent des livraisons après t , $p_i \geq p_j$ et $a_{i,k} \leq a_{j,k}$ alors placer i avant j à l'intérieur de la fin de la séquence minimise C_{max} .

Preuve du lemme 3.7.12

1. Une fois que tous les composants sont arrivés il n'y a plus de temps mort, aussi on peut placer les jobs restants dans n'importe quel ordre sans pour autant changer la valeur du C_{max} .
2. C'est une conséquence du lemme 3.7.3 car ces jobs ont des ordres agréables. ■

Lemme 3.7.13 de dominance (dynamique) locales (1, 2 et 3) et globale (4) pour l'hypothèse (B) (resp. (C)) :

Pour tout ordonnancement réalisable qui commence par la séquence partielle σ se terminant à l'instant t :

1. si $t \geq \max(T_{last}, D_1)$ (resp. $t \geq D_{f-1}$ où D_{f-1} est l'avant dernière tournée) alors les jobs restant peuvent être placés dans n'importe quel ordre pour minimiser le critère de l'hypothèse (B) (resp. (C)).
2. si $D_1 \leq t < T_{last}$ et si, à la date t , pour deux jobs i et j qui ne sont pas encore placés, on a, pour tous les composants k pour lesquels ils restent des livraisons après t , $p_i \geq p_j$ et $a_{i,k} \leq a_{j,k}$ alors placer i avant j à l'intérieur de la fin de la séquence minimise le critère de l'hypothèse (B).
3. si $T_{last} \leq t < D_1$ (resp. $T_{last} \leq t < D_d$ avec d quelconque) et si, pour deux jobs i et j non encore placés, on a, $w_i \geq w_j$ et $p_i \leq p_j$, alors placer i avant j à l'intérieur de la fin de la séquence minimise le critère de (B) (resp. (C)).
4. Si, à la date t , pour deux jobs i et j non encore placés, on a $w_i \geq w_j$, $p_i = p_j$ et, pour tous les composants k pour lesquels ils restent des livraisons après t , $a_{i,k} \leq a_{j,k}$ placer i avant j à l'intérieur de la fin de la séquence minimise (B) (resp. (C)).

Preuve du lemme 3.7.13

1. Pour l'hypothèse (B) après D_1 tous les jobs sont en retard, après T_{last} il n'y a plus moyen de minimiser le C_{max} . Ainsi, après ces deux dates, les jobs non encore placés peuvent être séquencés les uns après les autres sans changer la valeur du critère de (B). Pour l'hypothèse (C) tous les jobs placés après la date D_{f-1} sont livrés à la date D_f , il n'est donc pas possible d'améliorer la valeur du critère de (C) en cherchant une meilleure séquence après D_{f-1} , les jobs peuvent donc être placés dans n'importe quel ordre.
2. Pour l'hypothèse (B) les jobs exécutés après la date D_1 sont en retard, en revanche on peut toujours essayer de minimiser le C_{max} s'il y a encore des livraisons de composant. S'il y a des jobs non encore placés qui ont un ordre agréable pour minimiser le C_{max} , le lemme 3.7.3 montre que les placer (les jobs avec les ordres agréables) dans l'ordre des consommations décroissantes minimise le C_{max} .
3. Pour les hypothèses (B) et (C), une fois que tous les composants sont complètement arrivés, et qu'il reste des tournées, on cherche à minimiser la somme des pénalités des jobs en retard. Pour cela, s'il y a des jobs non encore placés qui ont des ordres agréables pour minimiser les retards, ceci est une conséquence du lemme 3.7.5 car à cet instant t il n'y a plus de contrainte d'indisponibilité des composants.

4. S'il y a un job i qui à la fois crée moins de temps morts qu'un autre job j et qui minimisent la somme des pénalités des jobs en retard, alors le job i doit être placé avant j car il minimise les deux parties du critère (B) et le critère (C). Cette affirmation est une conséquence des lemmes 3.7.3 et 3.7.5.

Remarque : Pour toutes les hypothèses. Pour tout ordonnancement réalisable qui commence par la séquence partielle σ et qui se termine à l'instant t : Soit E l'ensemble d'événements $\{E_g\}$ où E_g peut être une arrivée de ressource ou un départ de camion. Soit $Dispo_{k,t}$ la quantité de ressource k disponible à l'instant t égale à la différence entre la courbe cumulée des arrivées de k , $CCA_{k,t}$, et la courbe cumulée des consommations de k , $CCC_{k,t}$. Si $E_g \leq t \leq E_{g+1}$ et il existe deux jobs i et j non encore placés tels que $a_{i,k} + a_{j,k} \leq Dispo_{k,t}$ et que $t + p_i + p_j \leq E_{g+1}$ alors lors de l'exploration, il suffit d'explorer seulement l'une des branches entre σij ou σji .

3.8 Expériences

Dans cette section, nous présentons les résultats des expériences menées pour l'évaluation des procédures proposées pour la résolution de nos trois problèmes d'ordonnancement. Nous commençons cette section en faisant une présentation rapide des familles d'instances sur lesquelles nous avons effectué les expérimentations. Ensuite, dans la section 3.8.2, nous menons une première étude comparative entre les bornes inférieures et les bornes supérieures pour les hypothèses (A), (B) et (C). Enfin, dans la section 3.8.3, nous analysons les résultats obtenus avec nos procédures par séparation et évaluation pour les hypothèses (A), (B) et (C), et nous comparons les performances du modèle linéaire en nombres entiers et la PSE pour l'hypothèse (A).

3.8.1 Génération de données

Nous faisons des tests sur différents ensembles d'instances générées aléatoirement. Deux paramètres sont utilisés pour différencier les familles d'instances générées : la dispersion des arrivées des composants et la position de la livraison fixe D_1 pour l'hypothèse (B). L'horizon temporel est estimé en utilisant une borne supérieure pour la valeur du $Cmax$. Concernant la dispersion, les arrivées de composants peuvent être dispersées tout au long de l'horizon temporel (nous notons cette caractéristique par DA) ou relativement groupées au début de l'horizon temporel (noté RA). Pour l'hypothèse (B), la date de livraison fixe est générée soit vers le milieu de l'horizon temporel (caractéristique notée MD) soit aux trois quarts de l'horizon (notée GD). La combinaison de ces caractéristiques nous permet d'avoir quatre familles d'instances notées : RA/GD , RA/MD , DA/GD et DA/MD . Chaque famille d'instances contient 20 instances avec $n = 10$ ou 20 ou 50 jobs. Pour les hypothèses (A) et (C) nous regroupons les familles RA/GD (resp. DA/GD) et RA/MD (resp. DA/MD) dans une seule famille de 40 instances RAD (resp. DAD). La date de livraison D_1 générée pour chaque instance est ignorée pour l'hypothèse (A) et pour l'hypothèse (C) les mêmes instances sont utilisées pour les test mais avec des dates de livraison fixes (dans ce cas, nous avons fixé le nombre de départs de camion f à 4) régulièrement espacées sur l'horizon temporel.

Par ailleurs, nous avons généré les instances pour qu'il y ait toujours une solution réalisable, c'est-à-dire que, pour chaque ressource consommable, le besoin total de ressource est toujours inférieur ou égal à la quantité totale de la ressource arrivant à la plateforme.

Les résultats que nous présentons dans ce qui suit, ont été obtenus sur un PC avec un processeur à 2.80 GHz.

3.8.2 Etude comparative des bornes inférieures et des méthodes approchées rapides

Cette section expérimentale compare les performances des bornes inférieures pour les trois problèmes (A), (B) et (C). Les performances des bornes supérieures fournies par les approches de résolution rapides sont aussi évaluées par comparaison avec la meilleure borne inférieure pour chaque critère.

Les bornes inférieures pour le C_{max} (nécessaires pour les hypothèses (A) et (B)) sont comparées dans le tableau 3.4. Pour chaque borne inférieure et pour chaque ensemble d'instances, le temps moyen de calcul (CPU) est donné en secondes. La performance est donnée dans la colonne "GAP" qui contient le pourcentage d'erreur moyen égal à la différence entre la meilleure borne inférieure et la borne inférieure courante divisée par la valeur de la meilleure borne inférieure, multiplié par 100.

Table 3.4 – Comparaison des bornes inférieures pour le C_{max}

Ensemble d'instances	$LB AGO CT$		$LB IR CT$		$LB IT \sim IR CT$		$LB UCA CT$	
	GAP	CPU	GAP	CPU	GAP	CPU	GAP	CPU
<i>RAD</i>	0.38	0.03	0.07	0.08	0	0.10	0.41	0.02
<i>DAD</i>	5.07	0.00	0	0.04	0	0.06	10.8	0.03

D'après les résultats du tableau 3.4, pour toutes les familles d'instances, la meilleure borne inférieure pour le C_{max} est $LB|IT \sim IR|CT$ suivie de $LB|IR|CT$, puis de $LB|AGO|CT$ et finalement $LB|UCA|CT$. Concernant les temps de calcul, ils restent relativement petits. On remarque que la relaxation entière prend environ trois fois plus de temps que les autres bornes inférieures.

Dans le tableau 3.5 nous présentons une comparaison entre les bornes inférieures des temps morts induits par le calcul des bornes du C_{max} avec les différentes techniques.

Table 3.5 – Comparaison des bornes inférieures pour $IT(H)$

Ensemble d'instances	$LB AGO IT$	$LB IR IT$	$LB IT \sim IR IT$	$LB UCA IT$
	GAP	GAP	GAP	GAP
<i>RAD</i>	16.6	2.5	0	19.5
<i>DAD</i>	54.6	0	0	89.9

Nous observons que les écarts sont très grands pour les bornes obtenues avec la technique des ordres agréables et avec celle des arrivées de composant continues. Cet écart est tout de même moins important pour les instances où les arrivées de composant sont rassemblées au début de l'ordonnancement, et où les temps morts associés à la rupture de composants sont moins importants. La borne $LB|IR|IT$ est meilleure que $LB|AGO|IT$. Cela explique que l'amélioration espérée, sur la borne du C_{max} , en intégrant la contrainte des temps morts au programme

linéaire de $LB|IR|CT$ est très faible pour les instances de la famille *RAD* et nulle pour les instances de la famille *DAD*.

La comparaison entre les deux bornes inférieures pour la somme des pénalités des jobs en retard, $\sum w_j \hat{u}_j$ (nécessaire pour l'hypothèse (B)), est présentée dans le tableau 3.6.

Table 3.6 – Comparaison des bornes inférieures pour la somme des pénalités des jobs en retard $\sum w_j \hat{u}_j$

Ensemble d'instances	$LB AGOK ST$		$LB IR ST$		$LB IT \sim IR ST$	
	GAP	CPU	GAP	CPU	GAP	CPU
<i>RA/GD</i>	1.68	0.03	2.00	0.05	2.00	0.05
<i>RA/MD</i>	0.29	0.04	0.86	0.05	0.86	0.05
<i>DA/GD</i>	24.3	0.03	0.03	0.04	0.03	0.04
<i>DA/MD</i>	13.7	0.03	0.07	0.05	0.07	0.05

Pour nos expériences, les bornes $LB|IR|ST$ et $LB|IT \sim IR|ST$ donnent toujours les mêmes résultats. L'analyse de performances montre que la borne $LB|AGOK|ST$ est légèrement meilleure pour les instances où les arrivées de composants sont regroupées, tandis que $LB|IR|ST$ et $LB|IT \sim IR|ST$ sont considérablement meilleures pour les familles d'instances avec des arrivées de composant dispersées. La performance de la borne $LB|AGOK|ST$ pour les instances avec des arrivées dispersées, nous laisse penser que la borne inférieure pour les temps morts, obtenue avec les ordres agréables, n'est pas bonne pour les cas où les arrivées de composants sont dispersées où il risque d'y avoir des ruptures de composants plus souvent et donc plus de temps morts induits qui seraient négligés par la relaxation des ordres agréables (ceci est confirmé par les résultats du tableau 3.5). Dans ce cas, et pour le calcul de $LB|AGOK|ST$, on remplit un sac à dos de capacité beaucoup trop grande par rapport à la capacité réelle, ce qui justifierait la mauvaise qualité de cette borne dans ce cas.

Dans le tableau 3.7 nous comparons la meilleure solution obtenue avec les méthodes approchées rapides de la section 3.7.2, avec la meilleure borne inférieure pour les critères $Cmax$, $\sum w_j \hat{u}_j$ et $(1 + \sum w_j \hat{u}_j) \times Cmax$ (le critère général de l'hypothèse (B), noté *CG* dans le tableau). La colonne GAP correspond au pourcentage d'erreur moyen entre la meilleure borne supérieure et la meilleure borne inférieure pour chaque famille d'instances. En outre, la colonne *BESTH* indique le pourcentage de fois où une méthode approchée rapide fournit la meilleure solution pour le critère global. Dans ce tableau seulement le nom des trois meilleures heuristiques (*HND σ* ou *HA σ* , comme définies dans la section 3.7.2) est donné, pour les critères de l'hypothèse (A) et (B), avec les pourcentages correspondants.

L'évaluation des performances des méthodes approchées comparées avec les bornes inférieures montre que l'écart pour le $Cmax$ est petit pour la famille d'instances avec des arrivées de composant regroupées et moins bon pour les familles d'instances avec des arrivées dispersées. Une explication possible est que les temps morts associés aux contraintes de ressources disparaissent après la dernière arrivée de composant et l'erreur potentielle des méthodes approchées sont faits seulement pour les sous-ensembles de jobs placés dans la première moitié de l'horizon (avec les instances d'arrivées regroupées *RA*). Pour la somme des pénalités des jobs en retard, même en prenant en compte les contraintes de ressources, en utilisant une borne inférieure des temps

Table 3.7 – Comparaison des bornes supérieures et inférieures pour les critères des hypothèses (A) et (B)

Ensemble d'instances	GAP			BESTH C_{max}		BESTH CG	
	C_{max}	$\sum w_j \hat{u}_j$	CG	Heuristique	%BEST	Heuristique	%BEST
RA/GD	0.84	15.2	16.2	HND_1	19.1	HND_2	27.9
RA/MD		9.18	10.9	HND_2	16.6	HND_4	27.9
						HND_3	14.2
				HA_1	10.8	HND_2	32.5
					HND_4	32.5	
					HA_2	17.5	
DA/GD	3.71	31.8	39.5	HA_1	28.8	HA_1	15
DA/MD		14.1	20.6	HND_1	9.6	HA_3	15
						HND_3	13.8
				HA_2	5.8	HA_4	22.5
					HND_2	20	
					HND_4	20	

morts dans l'intervalle $[0, D_1]$, l'écart (GAP) restent assez grands, ce qui induit naturellement des grands écarts pour le critère global. Deux solutions pour réduire ces écarts consistent à concevoir des meilleures bornes inférieures ou à améliorer les méthodes approchées. La première possibilité est certainement plus difficile.

Pour l'hypothèse (C) la comparaison entre les bornes inférieures est présentée dans le tableau 3.8. La performance est donnée dans chaque colonne correspond au pourcentage d'erreur moyen.

Table 3.8 – Comparaison des bornes inférieures pour le critère $\sum w_j \hat{C}_j$

Ensemble d'instances	$LB AGOK \sum CT$		$LB IR \sum CT$		$LB IT \sim IR \sum CT$	
	GAP	CPU	GAP	CPU	GAP	CPU
RAD	0.67	0.02	0.51	0.04	0.51	0.09
DAD	13.7	0.02	0.04	0.07	0.04	0.08

En moyenne la borne $LB|IT \sim IR|\sum CT$ est meilleure pour les deux familles d'instances avec des arrivées dispersées et regroupées, en particulier elle est meilleure que la borne obtenue avec les ordres agréables et le sac à dos, $LB|AGOK|\sum CT$, pour la famille RAD pour laquelle nous supposons qu'il y a le même problème d'estimation de la capacité des sacs à dos que l'on remplit. Cette borne est légèrement plus coûteuse en temps de calcul que les deux autres.

Comme nous l'avons fait pour les critères (A) et (B), dans le tableau 3.9, nous comparons, pour le critère (C), la valeur de la meilleure solution obtenue avec les méthodes approchées rapides avec la meilleure borne inférieure. Les écarts relatifs sont donnés pour la somme pondérée des dates de livraison des jobs. De même les trois meilleures heuristiques sont données dans la colonne BEST H avec les pourcentages de fois où elles ont donné la meilleure solution.

Tout comme pour les autres critères, l'écart (GAP) est plus important dans le cas où les

arrivées de composants sont dispersées. Cela est peut être dû, comme avant, à la qualité de la borne inférieure pour les temps morts dans les intervalles $[0, D_d]$.

Table 3.9 – Comparaison des bornes supérieures et inférieures pour le critère de l’hypothèses (C)

Ensemble d’instances	GAP	$BESTH \sum w_j \hat{C}_j$	
	$\sum w_j \hat{C}_j$	Heuristique	%BEST
<i>RAD</i>	6.87	<i>HND</i> ₂	30
		<i>HND</i> ₄	30
		<i>HA</i> ₂	21.3
<i>DAD</i>	15.3	<i>HA</i> ₂	24.4
		<i>HA</i> ₄	24.4
		<i>HND</i> ₂	13.5

3.8.3 Résultats des méthodes de résolution exactes

Ici nous évaluons les méthodes de résolution exactes pour les trois problèmes d’ordonnancement étudiés. Des procédures par séparation et évaluation pour les hypothèses (A), (B) et (C) et un programme linéaire en nombres entiers pour (A).

La durée d’exécution d’une PSE étant généralement trop importante pour la dérouler entièrement, nous avons limité le temps d’exécution des méthodes à 1000 secondes.

A. Résultats de la minimisation du C_{max}

Dans cette partie, nous commençons par comparer les deux méthodes conçues pour la résolution du problème où l’on minimise le C_{max} . Ensuite, nous comparons les solutions obtenues avec les bornes inférieures et les méthodes approchées pour avoir une meilleure idée de leur qualité.

Dans le tableau 3.10, nous comparons les performances de la PSE et du programme linéaire en nombres entiers (ILP) introduit dans la section 3.6 pour minimiser le C_{max} et résolu avec le solveur de programmation linéaire CPLEX. Deux paramètres peuvent être utilisés pour effectuer cette comparaison, le premier est le temps d’exécution et le deuxième la solution obtenue qui peut ne pas être optimale car nous limitons le temps d’exécution. En plus de la famille d’instances, nous avons choisi de différencier les résultats selon le nombre de jobs car cela a forcément une influence sur les temps de calcul. La première colonne du tableau 3.10 contient la famille d’instances, la deuxième indique le nombre de jobs. La colonne 3 indique le pourcentage d’instances résolues à l’optimalité. Nous notons BEST la meilleure solution obtenue par n’importe laquelle des deux méthodes PSE ou ILP. Dans la colonne 4 (resp. 5) nous présentons l’écart relatif moyen entre la solution de la PSE (resp. ILP) et la meilleure solution BEST (optimale ou pas), cet écart est donné par la moyenne des écarts relatifs pour chaque instance donnés par : $100 \times \frac{SOL_{PSE} - BEST}{BEST}$ et $100 \times \frac{SOL_{ILP} - BEST}{BEST}$. Finalement, dans les colonnes 6 et 7 nous indiquons les temps moyens d’exécution pour la PSE et pour ILP respectivement, ces moyennes sont calculées seulement sur les instances qui ont été résolues à l’optimalité par les deux méthodes.

Table 3.10 – Comparaison des méthodes exactes pour la minimisation du C_{max}

Ensemble d'instances	Nombre de jobs	% OPT	% Ecart/BEST		Temps moyen (s)	
			PSE	ILP	PSE	ILP
<i>RAD</i>	10	100	0	0	0.19	0.14
	20	100	0	0	0.09	0.25
	50	100	0	0	10.1	3.77
<i>DAD</i>	10	100	0	0	8.91	0.56
	20	100	0.25	0	6.83	6.68
	50	53.8	1.89	0	37.5	5.70

Les résultats du tableau 3.10 nous montrent que à l'exception des instances avec 50 jobs et avec des arrivées de composants dispersées (famille *DAD*), toutes les instances des autres ensembles ont été résolues à l'optimalité par au moins l'une de nos deux méthodes exactes. En particulier, la colonne 5 montre que le programme linéaire fournit toujours la meilleure solution. Notre procédure par séparation et évaluation trouve la meilleure solution pour les instances avec des arrivées regroupées (*RAD*) et toutes les petites instances (i.e. 10 jobs) des familles avec des arrivées dispersées (*DAD*). Néanmoins, en moyenne, les résultats obtenus avec la PSE se situent à 0.25% de la meilleure solution (trouvée avec ILP) pour les instances à 20 jobs et avec des arrivées dispersées, et à 1.89% pour les instances à 50 jobs et avec des arrivées dispersées. Bien que ces pourcentages soient petits, il faut remarquer qu'il s'agit d'erreurs relatives calculées sur des chiffres plutôt grands.

Si nous comparons les temps de calcul, nous pouvons observer que la programmation linéaire se révèle plus efficace que la procédure par séparation et évaluation, sauf pour les cas avec des arrivées regroupées et 20 jobs. Nous signalons qu'en général les temps de calcul sont très proches pour les deux procédures, les grands écarts de temps montrés dans la table 3.10 sont souvent dus aux temps de calcul de quelques instances pour lesquelles notre PSE a une difficulté pour prouver l'optimalité des solutions obtenues. De même, nous avons pu constater qu'il y a des instances qui n'ont pas été résolues à l'optimalité par la PSE (exécution arrêtée à 1000 secondes), pour lesquelles la borne inférieure à base de relaxation entière a une difficulté particulière à prouver l'optimalité d'une solution des sous-problèmes associés aux nœuds de l'arbre d'exploration. Nous pourrions essayer de refaire des expériences sur ces instances en faisant appel moins souvent à cette borne qui, bien que plus efficace, se révèle très coûteuse pour ces cas.

Table 3.11 – Evaluation des bornes inférieures et des méthodes approchées par rapport à la meilleure solution obtenue pour la minimisation du $Cmax$

Ensemble d'instances	Nombre de jobs	% Ecart/BEST		% Proximité	
		LB	UB	LB	UB
<i>RAD</i>	10	1.60	0.53	28.6	71.4
	20	0.39	0.00	0	100
	50	0.05	0.20	100	0
<i>DAD</i>	10	5.07	0.03	25	75
	20	1.24	1.84	62	38
	50	0.26	2.81	92.3	7.7

Dans le tableau 3.11 nous faisons une comparaison entre les bornes inférieures ou les bornes supérieures obtenues avec la meilleure méthode approchée et la meilleure solution connue. Dans la troisième colonne nous donnons l'écart relatif entre la meilleure borne inférieure et BEST (optimal ou pas) et dans la quatrième colonne entre la meilleure méthode approchée et BEST. En complément de cette information, dans les colonnes “% Proximité” nous indiquons le pourcentage de fois où la meilleure solution est plus proche de la borne inférieure (colonne 5) et plus proche de la borne supérieure (colonne 6).

Nous ne pouvons pas dégager une tendance générale pour l'efficacité des bornes inférieures et supérieures. Dans tous les cas, la meilleure solution obtenue est inférieure à celle fournie par la meilleure méthode approchée, à l'exception de la famille d'instances *RAD* et 20 jobs où les deux solutions sont toujours égales et où les bornes supérieures fournissent toujours l'optimum puisque toutes les instances de cette famille ont été résolues à l'optimalité (c.f. tableau 3.10). Pour les instances les plus grandes (avec 50 jobs) les bornes inférieures semblent plus efficaces contrairement aux résultats des petites instances où les méthodes approchées sont plus proches de la solution optimale.

B. Résultats de la minimisation de $(\sum w_i \hat{u}_i + 1) \times Cmax$

Dans cette partie, nous évaluons les performances de la procédure par séparation et évaluation pour le problème d'ordonnancement de l'hypothèse (B). Contrairement au cas de la minimisation du $Cmax$, ici nous n'avons pas la possibilité de comparer les performances de la PSE avec des approches plus ou moins performantes. Pour cette raison, le tableau 3.12 fournit uniquement les écarts relatifs de la meilleure borne supérieure ou la meilleure borne inférieure et la solution obtenue avec la procédure par séparation et évaluation. Dans la troisième colonne du tableau, nous indiquons les pourcentages d'instances de chaque groupe résolues à l'optimalité. Puis, comme pour l'hypothèse (A), les colonnes “%Proximité” indiquent, pour chaque groupe de données, le pourcentage de fois où la meilleure solution connue SOL est plus proche de la borne inférieure ou de la borne supérieure.

Table 3.12 – Evaluation des bornes inférieures et des méthodes approchées par rapport à la meilleure solution obtenue pour la minimisation de $(\sum w_i \hat{u}_i + 1)C_{max}$

Ensemble d'instances	Nombre de jobs	% OPT	%Ecart/SOL		% Proximité	
			LB	UB	LB	UB
<i>RA/GD</i>	10	100	23.9	4.93	0	100
	20	14.3	5.73	4.21	42.9	57.1
	50	0	5.66	4.31	28.6	71.4
<i>RA/MD</i>	10	100	12.8	7.08	42.9	57.1
	20	14.3	6.98	0.97	0	100
	50	33.3	1.72	0.70	0	100
<i>DA/GD</i>	10	85.7	33.32	12.38	14.3	85.7
	20	0	23.04	7.06	14.3	85.7
	50	0	34.11	1.86	0	100
<i>DA/MD</i>	10	100	13.32	3.25	16.7	83.3
	20	14.3	12.2	6.08	42.9	57.1
	50	0	21.95	3.08	0	100

Nous pouvons constater que la PSE a des difficultés pour résoudre à l'optimalité les instances de 50 jobs (en un temps limité à 1000 secondes), aucune instance de cette taille n'a été résolue à l'optimalité. Néanmoins, on observe qu'en moyenne la meilleure solution obtenue par les méthodes approchées est améliorée jusqu'à 12.38% par la PSE pour des petites instances (c.f. colonne %Ecart/SOL (UB)). De même, les colonnes "%Proximité" indiquent que les solutions obtenues par la PSE sont toujours plus proches des bornes supérieures.

Puisque pour ce problème, à exception des instances à 10 jobs, nous n'avons pas avec certitude la solution optimale, nous ne pouvons pas juger la qualité des bornes inférieures et supérieures. Nous pouvons dire, par exemple, que la meilleure borne inférieure se situe au plus à un pourcentage de la solution optimale 33.3% pour les jobs à 10 instances, 23.01% pour les jobs à 20 instances et à 34.1% pour les jobs à 50 instances.

C. Résultats de la minimisation du $\sum w_i \hat{C}_i$

Tout comme pour l'hypothèse (B), pour la minimisation de la somme pondérée des dates des livraisons, nous ne pouvons pas comparer les solutions obtenues par la PSE avec des méthodes autres que les méthodes approchées et les bornes inférieures. Nous retrouvons dans le tableau 3.13 les mêmes éléments que dans le tableau 3.12.

Table 3.13 – Evaluation des bornes inférieures et des méthodes approchées par rapport à la meilleure solution obtenue pour la minimisation de $\sum w_i \hat{C}_i$

Ensemble d'instances	Nombre de jobs	%	%Ecart/SOL		% Proximité	
		OPT	LB	UB	LB	UB
<i>RAD</i>	10	100	9.25	3.15	7.7	92.3
	20	21.4	4.11	1.31	14.3	85.7
	50	0	2.11	0.47	15.4	84.6
<i>DAD</i>	10	100	14.1	5.17	23.1	76.9
	20	35.7	7.64	5.17	42.9	57.1
	50	0	11.24	1.51	7.7	92.3

Les conclusions sont à peu près les mêmes que pour les deux autres hypothèses. À l'exception des instances à 10 jobs, les résultats nous indiquent seulement que la solution fournie par la procédure par séparation et évaluation après 1000 secondes est meilleure que la meilleure solution obtenue par les méthodes approchées. Pour les groupes où toutes les instances ont été résolues à l'optimalité (i.e. instances avec 10 jobs) nous savons certainement que la solution optimale est à 9.25% (en moyenne) de la borne inférieure pour les familles avec des arrivées regroupées et à 14.1% pour les familles avec des arrivées dispersées, ce qui nous confirme que les bornes inférieures ne sont pas très bonnes. Par ailleurs, de manière générale, les solutions obtenues sont plus proches des bornes supérieures que des bornes inférieures. Cela est peut-être dû au temps d'exécution de la PSE qui est plutôt court pour la résolution d'instances à 50 jobs, et où la solution n'est pas beaucoup améliorée.

3.9 Conclusion du chapitre

Nous étudions dans ce chapitre de nouveaux problèmes d'ordonnancement qui peuvent apparaître dans des nœuds de la chaîne logistique tels que les plateformes de distribution et les entrepôts. Ces problèmes combinent deux familles de problèmes d'ordonnancement connus mais (notre étude bibliographique le montre) pas excessivement étudiés, des problèmes avec des arrivées de ressources consommables et des problèmes avec des dates fixes de tournées d'expédition et même potentiellement une tournée flexible à la fin de l'ordonnancement. Nous considérons trois problèmes dont les caractéristiques dépendent de la manière dont les livraisons aux clients s'effectuent. On a supposé par exemple qu'il y a une seule livraison flexible à la fin de l'ordonnancement, ce qui nous conduit à minimiser la durée totale d'ordonnancement (C_{max}). En nous basant sur l'application industrielle d'une plateforme de préparation de magazines, nous avons conçu un deuxième problème où une livraison fixe et une livraison flexible sont considérées. Finalement, nous avons généralisé le problème à plusieurs livraisons fixes et minimisons la somme pondérée des dates de livraison.

Comme l'a montré notre étude bibliographique, aucune méthode de résolution n'avait été proposée jusqu'à maintenant pour ces problèmes particuliers qui sont NP-difficiles. Nous avons choisi de concevoir des algorithmes de résolution exacts, des procédures par séparation et évaluation, pour chaque problème pour résoudre des instances de taille réduite, mais qui nous permettraient d'évaluer les solutions obtenues par les méthodes approchées souvent utilisées pour des problèmes de taille industrielle.

Plusieurs méthodes approchées rapides à base d’algorithmes de listes pour obtenir des bonnes solutions initiales pour les PSE ont été conçues. Par ailleurs, nous proposons des bornes inférieures pour les trois problèmes, elles sont obtenues à base de différents types de relaxations : “ordres agréables”, relaxation entière. Finalement, quelques règles de dominance ont été dégagées et utilisées dans des procédures par séparation et évaluation avec un schéma de séparation classique. Nous avons aussi proposé un modèle linéaire en nombres entiers pour le problème le plus simple qui minimise le $Cmax$.

Les bornes inférieures et les méthodes approchées sont évaluées dans une série d’expériences effectuées sur des familles d’instances générées aléatoirement. Les procédures par séparation et évaluation ont été testées sur l’ensemble d’instances. De même, le modèle linéaire en nombres entiers proposé pour la minimisation du $Cmax$. En conclusion, pour le problème de minimisation du $Cmax$ le modèle linéaire se révèle plus efficace que la procédure par séparation et évaluation. De manière générale les PSE ont des difficultés pour résoudre des instances de taille supérieure à 10, nous pensons que le coût des bornes inférieures qui résolvent des programmes linéaires avec CPLEX, est très pénalisant pour les performances des PSE pour les trois problèmes d’ordonnancement.

Les familles d’instances générées sont différenciées par les valeurs des paramètres choisis pour leur génération, à savoir la façon dont les arrivées de composants sont faites et la date de livraison fixe pour l’hypothèse (B), ces paramètres nous permettent de distinguer les instances en fonction de leur difficulté et d’interpréter les résultats selon leurs caractéristiques.

Plusieurs extensions à nos problèmes sont discutées dans les perspectives de cette thèse.

Chapitre 4

Conclusion Générale et Perspectives

Nous commençons cette partie par donner une synthèse générale des travaux développés dans cette thèse. Plusieurs perspectives à nos travaux sont données par la suite.

Contents

4.1	Synthèse des travaux	126
4.2	Perspectives	127
4.2.1	Perspectives concernant la planification des plateformes	128
4.2.2	Perspectives concernant l'ordonnancement de plateforme	129
4.2.3	Perspectives concernant l'intégration des deux niveaux temporels	130

4.1 Synthèse des travaux

Les travaux que nous venons de présenter nous permettent d'étudier les plateformes logistiques sous un nouveau point de vue. Nous avons abordé deux problèmes, un au niveau de la planification, l'autre au niveau de l'ordonnancement, qui ont été négligés dans ce type de structure et qui répondent à des applications industrielles. Le premier problème est celui du lissage de charge pendant les périodes de pointe dans les plateformes logistiques ; le deuxième problème, motivé par les caractéristiques de la plateforme de notre application industrielle, consiste à ordonnancer les travaux au sein d'une plateforme de préparation de commande qui a des contraintes de ressources consommables (ou non renouvelables) et des contraintes liées aux tournées d'expédition, et qui induisent des problèmes très particuliers.

Puisque le problème de lissage de charge est susceptible d'apparaître aussi dans des systèmes tels que les centres de production, et dans le but de positionner notre problème et d'identifier les éventuelles solutions proposées dans la littérature à ce problème, dans le premier chapitre nous avons dressé un panorama des problèmes de décision dans la gestion de production et dans le contrôle des flux dans un système de production en général, et sur les problèmes d'optimisation abordés dans la littérature pour les entrepôts et plateformes logistiques en particulier.

Dans le deuxième chapitre, nous avons traité le problème de lissage de charge dans une plateforme logistique dans un cadre industriel où des variations saisonnières importantes des flux induisent des coûts supplémentaires importants. Dans un premier temps, nous avons évalué les mécanismes d'action face à cette problématique et avons choisi ceux qui étaient le plus en accord avec notre application industrielle, à savoir : accepter des négociations avec les partenaires en amont et en aval de la plateforme, et utiliser au maximum la flexibilité des ressources humaines de la plateforme, ou embaucher du personnel intérimaire, et ce dans l'objectif premier de lisser la charge pour réduire les coûts de personnel. Ensuite, nous avons fait un bilan de l'état de l'art concernant le lissage de charge, les mécanismes de négociation et la gestion des ressources humaines dans les centres de production et les entrepôts. Cette étude bibliographique, complémentaire à celle du chapitre 1, nous a permis de constater que le problème de lissage de charge n'a pas fait l'objet de recherches concernant les plateformes logistiques tout en prenant en compte les contraintes et les caractéristiques particulières de l'organisation interne du travail (par rapport au type d'opérations qui y sont exécutées, assemblage, déballage, contrôle, etc.) et les spécificités de la main d'œuvre. Nous avons proposé deux modèles linéaires, agrégés au niveau de la planification, (assez génériques pour être appliqués à des centres de production par exemple) qui considèrent deux types de négociations différentes concernant les dates et les quantités prévisionnelles des livraisons des fournisseurs et des clients, avec des pénalités d'avance et de retard. Nos modèles sont capables de considérer différentes catégories de personnel, de prendre en compte différents agencements physiques (une plateforme qui ne fait que du cross-docking par exemple) tout en intégrant plusieurs hypothèses de fonctionnement de la plateforme, comme par exemple autoriser des heures supplémentaires et limiter les avances et les retards. Finalement, nous avons testé nos modèles avec des ensembles d'instances générées aléatoirement, mais qui sont basées sur des scénarios de l'application industrielle de notre problème. Nos résultats montrent l'intérêt des deux types de négociations pour le lissage de charge. Cependant il est difficile de tirer des conclusions "catégoriques" sur nos comparaisons expérimentales car les résultats dépendent fortement des données utilisées pour générer les instances. Les travaux présentés dans ce chapitre, on fait l'objet de deux communications à des conférences internationales Carrera *et al.* [29] et Carrera *et al.* [30].

Le troisième chapitre se positionne au niveau opérationnel. Nous nous intéressons aux problèmes d'ordonnancement plus particulièrement associés aux plateformes logistiques. Spécifiquement nous y avons étudié le problème d'ordonnancement de préparation de commandes pour différents clients avec des contraintes d'arrivée de composants en forme d'escalier (notées $Stair(nc)$) et des tournées de camion d'expédition aux clients à des dates fixes (D_d) ou non fixe ($Cmax$). Nous avons commencé en identifiant les différentes particularités de ce problème en nous basant sur des applications industrielles, la première application correspond à la plateforme de distribution de chaussures SAVAT qui a motivé notre travail au niveau tactique, la deuxième application correspond à une plateforme de distribution de magazines. Ensuite, nous avons fait une analyse de l'état de l'art concernant l'ordonnancement qui prend en compte les ressources consommables (correspondant aux arrivées en escalier des composants) et les dates de livraison fixes. Suite à cette analyse nous avons observé que ces deux hypothèses n'avaient pas été étudiées simultanément, au moins pour des problèmes d'ordonnancement. La synthèse des résultats de complexité pour l'ordonnancement avec ces deux caractéristiques montre que les deux problèmes sont NP-difficiles (dès qu'il y a une machine pour l'ordonnancement avec des ressources consommables), avec l'existence de quelques cas particuliers polynomiaux. Selon la manière dont l'expédition se fait (une livraison flexible, deux livraisons : une fixe et une flexible, plusieurs livraisons fixes et pas de livraison flexible), nous avons dégagé trois problèmes (NP-difficiles) d'ordonnancement de préparation de commande, tous avec des arrivées de composant en forme d'escalier. Nous nous sommes volontairement limités à des problèmes d'ordonnancement à une machine car notre objectif était de fournir une première base théorique pour notre étude, qui peut présenter de nombreuses variantes et applications. Nous montrons dans les perspectives comment quelques extensions pourraient facilement être introduites dans notre modèle générique.

Nous avons proposé un modèle linéaire en nombres entiers pour le cas le plus simple, il est résolu avec un logiciel de programmation linéaire (ILOG CPLEX). Nous avons proposé des méthodes de résolution exactes de type procédure par séparation et évaluation (PSE) avec des schémas de séparation classiques. Des méthodes approchées rapides à base de listes construisant des ordonnancements actifs et sans délais ont été conçues pour obtenir des bornes supérieures pour nos problèmes. Nous avons également conçu des bornes inférieures à l'aide de trois types de relaxations : "ordres agréables", relaxation entière (interruptibilité autorisée) et relaxation continue pour les arrivées des composants. En outre, des règles de dominance principalement basées sur des propriétés agréables des jobs ont été dégagées. Dans la partie expérimentale, tous les éléments de nos PSE ont fait l'objet d'études comparatives sur des familles d'instances générées aléatoirement qui cherchent à représenter des situations réalistes. Les travaux présentés dans ce chapitre ont fait l'objet de deux communications à des conférences internationales Carrera *et al.* [32] et Carrera *et al.* [31].

4.2 Perspectives

Dans cette section nous présentons des idées d'extensions possibles à nos problèmes de planification et d'ordonnancement de plateformes. Nous distinguons les pistes de recherche pour les niveaux tactique et opérationnel, mais aussi pour les techniques de résolution comme pour les extensions des problèmes traités. Nous décrivons une à une les pistes et nous essayons de donner quelques premiers éléments de réponse

4.2.1 Perspectives concernant la planification des plateformes

Extensions des problèmes de planification

Un certain nombre d'extensions immédiates à nos modèles linéaires, pour les rendre plus réalistes, peuvent être dégagées, mais elles entraîneraient la résolution de problèmes sous-jacents qui rendraient très complexes nos modèles de résolution, par exemples :

- déterminer l'affectation détaillée des ressources humaines aux opérations ou encore embaucher le personnel temporaire uniquement pour des périodes contiguës minimales ou égales à des multiples de périodes, ce qui inclut des contraintes qui peuvent être considérées comme plus réalistes. Pour la première proposition, il faudrait intégrer un problème d'ordonnancement de personnel au sein de la méthode de résolution du problème de planification,
- avoir plusieurs quais de chargement et de déchargement (avec un problème d'affectation des quais aux camions, Baptiste et Maknoon [7], Yu et Egbelu [159], Boysen *et al.* [19]),
- prendre en compte les problèmes de transport associés à la distribution en amont et en aval : constitution de tournées de véhicule dont les contraintes sont à prendre en compte explicitement dans les modèles (Viswanathan et Mathur [151], Chandra [33]),
- donner de la flexibilité quant au nombre de livraisons (pour l'instant ce nombre est fixe), on pourrait faire cela en autorisant l'éclatement de livraisons ou en permettant qu'une livraison soit supprimée, dans ce cas il faudrait prendre en compte le coût de transport dans la fonction objectif (ce qui serait le cas si jamais on décidait d'intégrer la planification de tournées, Lee *et al.* [96], Chen *et al.* [38]).

Cependant, les modèles obtenus seraient très compliqués et probablement pas évidents à utiliser. Une piste intéressante serait que des méthodes de décomposition itératives qui combinent nos modèles de planification avec des procédures efficaces pour les problèmes sous-jacents, et qui améliorent de manière alternative, par exemple le calcul de tournées de véhicule et le planning des livraisons et la planification des travaux sur les plateformes.

Dans le chapitre traitant le problème de planification nous avons utilisé une approche de négociations où la plateforme logistique prend les décisions de manière unilatérale (approche distribuée), nous avons essayé néanmoins de prendre en compte les contraintes imposées par les partenaires en amont et en aval de la plateforme en intégrant des intervalles où les livraisons pouvaient être effectuées, et en utilisant des pénalités pour tout type de décalage par rapport à la planification prévisionnelle. Cependant, nous ne pouvons pas modéliser réellement les conséquences du planning obtenu chez les partenaires. Une première idée d'extension de notre étude est d'intégrer les outils développés ici dans une chaîne logistique à plusieurs niveaux (éventuellement avec plusieurs éléments par niveau) de manière à simuler des scénarios de négociation entre partenaires dans le cadre de prises de décision semi-distribuées ou distribuées. La thèse de Latifa Ouzizi [113] considérait déjà des modèles de négociation partiellement centralisés pour le niveau tactique mais en considérant seulement des centres de production avec des modèles linéaires plus simples. Il serait intéressant d'intégrer à ses modèles de simulation d'autres éléments de la chaîne logistique, autres que les centres de production, avec toutes leurs spécificités. Cela pourrait fournir de puissants outils d'aide à la décision pour la prise de décisions totalement distribuées ou semi-distribuées.

4.2.2 Perspectives concernant l'ordonnancement de plateforme

Extension des problèmes d'ordonnancement

Plusieurs extensions immédiates peuvent être faites aux problèmes d'ordonnancement de plateforme de préparation de commandes, présentés dans le chapitre 3. Dans ce qui suit, nous les énumérons une à une et nous expliquons comment les éléments de la PSE (bornes inférieures, méthodes rapides approchées et schéma d'exploration) doivent être modifiés pour prendre en compte ces extensions.

La première extension à laquelle nous avons pensé, est d'intégrer des dates, pour chaque job, à partir desquelles les jobs peuvent être exécutés ("ready dates" en anglais, et notées r_i pour le job i). Avant cette date, même si les composants nécessaires à l'exécution du job sont disponibles, le job i ne pourra pas être traité. L'utilisation de nos modèles d'ordonnancement pour les trois problèmes avec ces dates est quasi immédiate. Pour les bornes inférieures, aussi bien celles construites avec des ordres agréables (les r_i sont triés dans l'ordre croissant) que celles obtenues avec les relaxations entières (les r_i sont intégrés à l'ensemble d'événements). Pour les bornes supérieures et pour la procédure par séparation et évaluation, il suffit d'intégrer l'existence des r_i dans le sous-programme de construction d'ordonnancement sans délai (resp. actif) en ajoutant à la séquence partielle sans délai (resp. active) un job dont la date r_i est inférieure à la date courante (resp. la date de fin au plus tôt d'un job non encore placée). Par ailleurs, il faut aussi prévoir la génération des r_i pour les instances, plus ces dates seront dispersées et plus la PSE aura de chance d'être rapide car le nombre de possibilités à chaque étage de l'arbre de recherche diminue.

La deuxième extension consiste à utiliser des machines identiques en parallèle (ce qui est intéressant, par exemple, pour l'application de la plateforme de préparation de paquets de magazines). Pour cette extension, il n'y a pas vraiment de difficulté technique. Pour les bornes inférieures avec les ordres agréables nous pourrions utiliser une macro-machine fictive où les durées seraient divisées par le nombre de machines. Pour les bornes inférieures calculées avec les relaxations entières il faudrait introduire des variables qui dépendent aussi de la machine où les portions de jobs sont exécutées. En outre, pour la relaxation entière on peut même considérer des machines à vitesses proportionnelles ou des machines non reliées. Pour l'adaptation des bornes supérieures au cas avec des machines parallèles, on pourrait, par exemple placer toujours les jobs sur la première machine disponible. Adapter le schéma d'exploration de la procédure par séparation et évaluation, est plus compliqué, il faudrait considérer des ordonnancements partiels sur chaque machine et bien sûr la taille de l'arbre d'exploration augmente de manière combinatoire. Finalement, pour les règles de dominance, nous avons montré que selon les caractéristiques des jobs il est intéressant de placer certains jobs avant d'autres dans l'ordonnancement pour le cas à une machine. Pour le cas à plusieurs machines, ces règles devraient être toujours respectées dans les séquences partielles de chaque machine, et aussi si par exemple selon une règle de dominance i précède j , alors on devrait s'assurer que le temps de début de i est inférieur au temps de début de j même s'ils ne sont pas traités sur la même machine.

La troisième perspective d'extension de nos modèles peut être d'accepter l'interruptibilité de l'exécution des jobs. Pour le cas où il y a seulement une livraison flexible à la fin de l'ordonnancement (hypothèse (A), minimisation du C_{max}), le problème a déjà été étudié par Slowinski [136] et il devient polynomial (c.f. de Werra [51]). Pour les problèmes des hypothèses (B) et (C) cette extension est intéressante, car, à notre connaissance la complexité du problème d'ordon-

nancement avec des dates de livraison fixes et avec interruptibilité n'a pas été étudiée par Hall *et al.* [77].

4.2.3 Perspectives concernant l'intégration des deux niveaux temporels

Dans le cadre de la thèse, une autre perspective, pourrait être de proposer des simulations qui intégreraient la résolution des problèmes d'ordonnancement sur des sous-horizons et sur des données plus précises de manière à vérifier la faisabilité des solutions de planification. Cela n'a pas été possible dans la thèse pour deux raisons. Le passage de données agrégées à des données détaillées et réciproquement est un problème difficile pour lequel il n'existe pas, à notre connaissance, de solutions pertinentes et utilisables. En outre, les problèmes d'ordonnancement de plateforme que nous avons considérés prennent bien en compte les caractéristiques amont et aval des plateformes ainsi que la préparation de commandes, comme notre modèle de planification, mais nous n'y avons pas intégré de contraintes cumulatives associées aux ressources humaines et à leur efficience. Nous aurions pu le faire en abandonnant la piste des PSE et en nous tournant vers, par exemple, des métaheuristiques, piste très différente complémentaire de ce qui a été développé dans cette thèse.

Annexes

1 Génération des données pour le problème de planification

Dans cet annexe, nous expliquons comment nous avons généré les paramètres nécessaires pour l'évaluation des modèles linéaires pour la négociation des délais et pour la négociation des délais et des quantités décrits dans les sections 2.5.2 et 2.5.3 respectivement.

La génération de données se fait en trois étapes. Pour une instance quelconque, nous commençons par générer une première série de paramètres de manière aléatoire (i.e. dans un intervalle selon une loi uniforme ou entre les différentes valeurs que le paramètre peut prendre). Ensuite, nous vérifions la conformité des paramètres générés et les modifions pour obtenir des produits plus hétérogènes. Enfin, nous générons les données associées aux caractéristiques des produits comme les temps de traitement et les efficacités des différentes catégories de personnel.

Dans les sections qui suivent, des tableaux récapitulatifs indiquant si les paramètres sont générés (g), lus d'un fichier contenant les caractéristiques de l'agencement de plateforme choisi (ℓ) ou calculés à partir d'autres paramètres (c).

1.1 Génération des données pour la négociation des délais

Pour commencer, les principales entités telles que les nombres d'opérations, de livraisons, de produits, de zones de stockage, etc. sont présentées. Ensuite, nous expliquons la génération des autres paramètres.

$g/\ell/c$	Indice	Ensemble	Caractéristiques
g	Δ		durée d'une période, elle peut être une journée (8-10 heures) ou une demi-journée (4-5 heures)
ℓ	H		horizon de temps égal à six semaines
c	nth		déduit de Δ et de H
ℓ	z	NZ	donné par l'agencement de plateforme choisi
g	w	NW	six ou neuf catégories
g	p	NP	entier dans $[6, 10]$
ℓ	o	NO	donnée par l'agencement de plateforme choisi
g	d_u	NDU	entier dans $[15, 20]$
g	d_d	NDD	entier dans $[15, 20]$
c	a	NA	déduit du nombre d'opérations de la plateforme et du nombre de livraisons

$g/\ell/c$	Paramètre	Caractéristiques
<i>Stocks et Produits</i>		
g	VP_p	dans $(0,1]$ pour chaque p
c	VZ_z	calculés sur le volume moyen de produits qui passe par la plateforme sur H
ℓ	$SI_{p,z}$	les stocks initiaux sont fixés à zéro pour toute zone de stockage z
ℓ	$LZE_{a,z}$	donnée par l'agencement de plateforme choisi
c	PC	déterminé selon les caractéristiques des produits
<i>Nomenclatures</i>		
c	$Pa(o), Pd(o)$	déduits selon PC
c	$A_{o,p}, D_{o,p}$	calculés selon les caractéristiques des produits
c	$\gamma_{o,p,p_i}, \delta_{o,p,p_i}$	déduits des caractéristiques de p et de p_i
<i>Avances et Retards</i>		
g	TS_d	dans l'intervalle $[0, H/2]$ pour les livraisons fournisseurs et dans $[0, H]$ pour les livraisons aux clients
g	$QP_{d,p}$	générées aléatoirement sachant qu'il doit y avoir environ 1000000 de produits passant par la plateforme sur H .
ℓ	$MAXE_d$	zéro, une ou deux périodes selon l'hypothèse de fonctionnement de la plateforme
ℓ	$MAXT_d$	zéro, une ou deux périodes
g	$EC\Delta_d$	dans l'intervalle des coûts d'embauche de personnel, cette pénalité est plus grande pour les fournisseurs que pour les clients
c	$TC\Delta_d$	déduit à partir des pénalités d'avance
<i>Organisation des flux : première possibilité</i>		
ℓ	$nd(z), Zd(z)$	donné par l'agencement choisi
ℓ	$Per_{z,z'}, O_{z,z'}$	donné par l'agencement choisi
<i>Organisation des flux : deuxième possibilité</i>		
ℓ	TZ_z	correspond à la dernière période de l'horizon temporel
ℓ	SZ	donné par l'agencement de plateforme choisi
<i>Main d'œuvre</i>		
g	$E_{w,o,p}$	les intervalles dépendent des catégories dans $[0.4 * \omega_1, 0.6 * \omega_2)$ pour les débutants, dans $[0.6 * \omega_1, 0.8 * \omega_2)$ pour les moyens et dans $[0.8 * \omega_1, 1 * \omega_2]$ pour les experts. ω_1 et ω_2 dépendent des caractéristiques supplémentaires des catégories (force, astuce)
ℓ	PES_o	zéro par défaut pour toute opération o
c	$MAXTW\Delta$	égal à Δ
c	$NORMnrh_{w,t}$	calculé sur une estimation de la charge journalière de la plateforme, qui est satisfaite par une seule catégorie de personnel w avec une matrice d'efficacité égale à la moyenne des efficacités de toutes les catégories par produit et par opération. Nous estimons la quantité de personnes par période. Cette quantité est ensuite divisé aléatoirement entre les six ou neuf catégories.
c	$HSD_{w,t}$	déduit de $NORMnrh_{w,t}$ et d'un pourcentage d'heures supplémentaires par individu qui dépend de Δ (dans la thèse nous avons utilisé $0.1 * \Delta$).
c	$CUHS_w$	calculé avec la fonction croissante $CUHS_w = 10 + 15 * (w - 1)$ pour $w \in \{1, \dots, nw\}$

Main d'œuvre (suite)		
c	$MAXnrh_{w,t}$	correspond à $1.8 \times NORMnrh_{w,t}$
c	$CUnrh_{w,t}$	plus cher que de faire travailler une personne de la catégorie immédiatement supérieure travaillant toute une période au prix des heures supplémentaires $CUnrh_{w,t} = CUHS_{w+1} * MAXTW\Delta$
Autres :		
g	$TU_{o,p}$	généré de manière aléatoire entre 1 et 5 minutes, une fois que les caractéristiques des produits sont fixées.

1.2 Génération des données pour la négociation des délais et des quantités

Tous les paramètres supplémentaires pour le modèle avec des négociations des dates et des délais, présenté dans la section 2.5, sont calculés à partir des paramètres générés pour le modèle de lissage de charge avec des négociations des dates. Nous donnons quelques précisions sur la manière dont nous avons effectué les calculs.

$g/\ell/c$	Notation	Description
Paramètres associés aux familles de produits		
c	QPU_p	égale à $\sum_{d \in NDU} QP_{p,d}$
c	QPD_p	égale à $\sum_{d \in NDD} QP_{p,d}$
c	$QLL_{d,p}$	correspond à un pourcentage de la quantité pré-négociée de p dans la livraison d , ici $QLL_{d,p}$ est égal à $0.4 \times QP_{d,p}$
c	$QUL_{d,p}$	égal à $1.6 \times QP_{d,p}$
Paramètres associés aux livraisons en amont et en aval		
c	$EUCC_{p,t}$ (resp. $EDCC_{p,t}$)	égale à la courbe cumulée des arrivées (resp. départ) de produit p où les dates des livraisons $d \in NDU$ (resp. $d \in NDD$) des fournisseurs (resp. clients) ont été avancées de $MAXE_d$ périodes (par rapport à leurs dates souhaitées TS_d) et les quantités livrées avec d sont égales aux bornes supérieures $QUL_{d,p}$
c	$LUCC_{p,t}$ (resp. $LDCC_{p,t}$)	égale à la courbe cumulée des arrivées (resp. départ) de produit p où les dates des livraisons $d \in NDU$ (resp. $d \in NDD$) des fournisseurs (resp. clients) ont été retardées de $MAXE_d$ périodes (par rapport à leurs dates souhaitées TS_d) et les quantités livrées avec d sont égales aux bornes inférieures $QLL_{d,p}$
c	$NUCC_{p,t}$ (resp. $NDCC_{p,t}$)	égale à la courbe cumulée obtenue avec les dates et quantités pré-négociées $\sum_{\tau=1}^t \sum_{d \in NDU: TS_d=\tau} QP_{d,p}$ (resp. $\sum_{\tau=1}^t \sum_{d \in NDD: TS_d=\tau} QP_{d,p}$)
c	MC_p (resp. LC_p)	égal au coût moyen associé à une unité de produit p quand il arrive une période en avance (resp. en retard) par rapport à la date pré-négociée

2 Synthèse des résultats de complexité des problèmes d'ordonnancement

Nous présentons dans cette annexe une synthèse des résultats de complexité connus pour le problème d'ordonnancement avec des ressources consommables et pour le problème d'ordonnancement avec des dates de livraison fixes.

2.1 Complexité des problèmes d'ordonnancement avec des ressources consommables

Nous commençons par analyser les problèmes qui minimisent le $Cmax$, puis le nombre de tâches en retard $\sum u_i$ et la somme des retards $\sum T_i$, nous terminons par parler rapidement de la complexité de la minimisation d'autres critères dans ce contexte.

Minimisation du $Cmax$

La figure 1 résume les résultats de complexité du problème d'ordonnancement à tâches non interruptibles avec des ressources consommables ($Stairs(nc)$) pour minimiser la durée totale de l'ordonnancement ($Cmax$), obtenus par Carlier et Rinnooy Kan [28], ainsi que quelques cas polynomiaux que nous avons dégagé. De manière générale, les problèmes deviennent NP-difficiles au sens fort quand les durées des jobs sont quelconques.

Un cas particulier apparaît lorsque la (ou les) ressources consommables arrivent de manière continue ($Cont(nc)$) à un taux φ_k pour la ressource k . Ce cas a été étudié par Toker *et al.* [146] et par Xie [156]. Les résultats de complexité pour ces problèmes sont présentés dans la table 1. Nous donnons les notations des problèmes d'ordonnancement (selon la classification de Graham *et al.* [70]) et leurs complexités.

TABLE 1 – Complexité des problèmes avec des ressources consommables arrivant de manière continue pour la minimisation du $Cmax$

Problème	Complexité
$1/Cont(1) : \varphi_1 = 1, p_i, a_i/Cmax$	$O(n \log(n))$
$1/Cont(nc) : \varphi_k = 1, p_i, a_{i,k}/Cmax$	$O(nc \times n \log(n))$
$1/Cont(nc) : \varphi_k = 1, p_i, a_{i,k} = a_k/Cmax$	$O(n \log(n))$, ordre lpt optimal

Ces résultats peuvent être généralisés au cas où les taux d'arrivée sont différents de 1, $\varphi_k \neq 1$ et différents pour chaque composant. Les problèmes obtenus restent polynomiaux.

Minimisation de $\sum u_i$ et de $\sum w_i u_i$

Dans cette partie, nous présentons la complexité de problèmes d'ordonnancement, à tâches non interruptibles, du nombre de tâches en retard avec une ressource consommable (Carlier et Rinnooy Kan [28] et Gafarov et Lazarev [62]). Ici, on suppose que chaque job i a une date due d_i à laquelle son exécution devrait être finie, éventuellement des “ready dates” peuvent être considérées. Dans la table 2, nous indiquons les problèmes étudiés ainsi que leur complexité.

Pour la somme pondérée des tâches en retard, Carlier et Rinnooy Kan [28] montrent que même pour le cas sans ressource renouvelable (i.e. sans machine) et où les durées p_i sont égales à 1, ce problème est NP-difficile au sens faible. Par ailleurs, ils démontrent que le problème $Pm/p_i = 1, d_i, a_i = 1/\sum w_i u_i$ peut être résolu avec des méthodes de flot à coût minimum.

Minimisation de $\sum T_i$

Récemment, Gafarov et Lazarev [62] ont étudié le problème de minimisation de la somme totale des retards avec une ressource consommable arrivant en forme d'escalier. Le tableau 3 synthétise les principaux résultats.

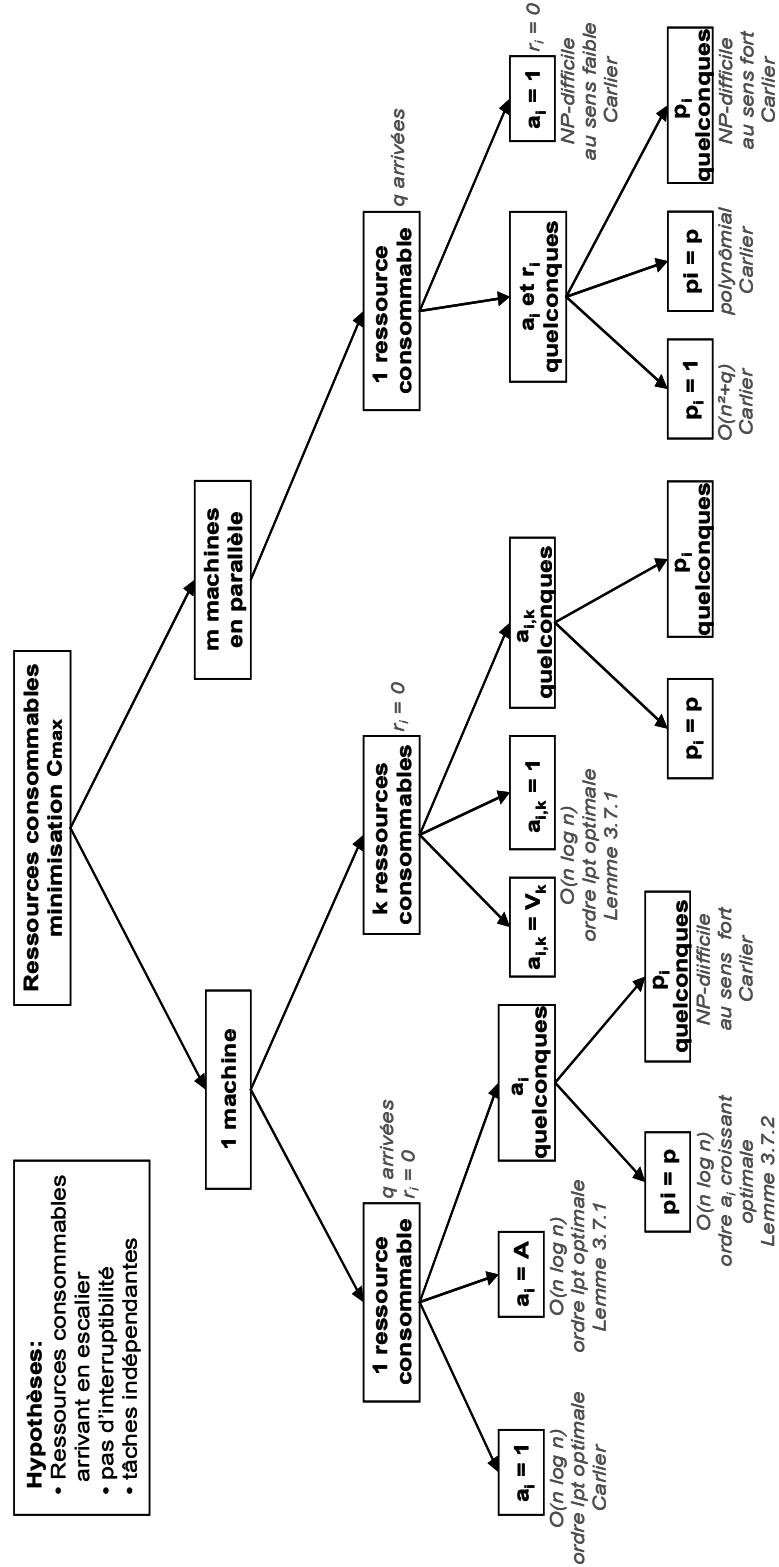


FIGURE 1 – Complexité des problèmes avec des ressources consommables pour minimiser le C_{max}

TABLE 2 – Complexité des problèmes avec une ressource consommable pour la minimisation du nombre de tâches en retard

Problème avec <i>Stairs</i> (1)	Complexité
$1/p_i, d_i, a_i / \sum u_i$	NP-difficile au sens fort
$1 \text{ ou } Pm/p_i = 1, d_i, a_i / \sum u_i$	ouvert
$1 \text{ ou } Pm/p_i, d_i = d, r_i, a_i / \sum u_i$	NP-difficile au sens fort
$1/p_i, d_i, r_i = 0, a_i / \sum u_i$	NP-difficile
$1 \text{ ou } Pm/p_i = 1, d_i, r_i, a_i / \sum u_i$	NP-difficile
$1/p_i = 1, d_i, r_i = 0, a_i / \sum u_i$	$O(n \log(n))$
$1/p_i, d_i, a_i / \sum w_i u_i$	NP-difficile au sens fort

TABLE 3 – Complexité des problèmes avec une ressource consommable pour la minimisation de la somme des retards

Problème avec <i>Stairs</i> (1)	Complexité
$1/p_i, d_i = d, a_i / \sum T_i$	NP-difficile au sens fort
$1/p_i, d_i, a_i = a / \sum T_i$	NP-difficile
$1/p_i = p, d_i, a_i / \sum T_i$	NP-difficile
$1/p_i, d_i = d, a_i = a / \sum T_i$	NP-difficile

Les auteurs ont étudié deux cas particuliers. Le premier est un cas où les jobs satisfont des “ordres agréables” où l’ordre croissant des consommations ($a_i \nearrow$) est égal à l’ordre croissant des dates dues ($d_i \nearrow$), dans ce cas, il suffit de placer les jobs dans cet ordre pour minimiser la somme des retards (algorithme en $O(n \log(n))$).

Le deuxième cas suppose que une unité de ressource arrive à chaque instant, les auteurs notent ce problème $1/Stair(1)$: $\varphi_1 = 1, p_i, d_i, a_i / \sum T_i$ et montrent que ce problème est NP-difficile. En fait, si les consommations sont supposées entières ce problème est équivalent à $1/Cont(1)$: $\varphi_1 = 1, p_i, d_i, a_i / \sum T_i$.

Autres problèmes

Carlier [26] et Gafarov et Lazarev [62] ont étudié la complexité d’autres problèmes avec des ressources consommables pour la minimisation de la somme des temps de fin d’exécution $\sum C_i$, du retard maximal $Lmax$, de la durée moyenne $\sum t_i$. Ils montrent que ces problèmes sont NP-difficiles au sens fort dans le cas général.

2.2 Complexité des problèmes d’ordonnancement avec des dates de livraison fixes

Nous présentons ici la complexité des problèmes d’ordonnancement, sans interruptibilité des tâches, avec des dates de livraison fixes, ces problèmes ont été étudiés par Matsuo [104] et Hall *et al.* [77]. Les auteurs supposent qu’il y a f livraison aux instants D_d ($d = 1, \dots, f$). Nous analysons la complexité des problèmes où f est arbitraire et non fixe.

Puisque les jobs ne sont livrés qu’aux instants où des livraisons sont prévues, les critères à

minimiser sont calculés par rapport aux dates de livraison effectives des jobs et pas par rapport aux dates de fin d'exécution des jobs. Ainsi, par exemple, le $Cmax$ correspond à la première date de livraison D_d supérieure à la date de fin d'exécution du dernier job c_n . Le critère est alors noté $\hat{C}max$. Dans le tableau 4, nous donnons quelques résultats de complexité pour différents critères.

TABLE 4 – Complexité des problèmes avec des dates de livraison fixes

Problème avec D_1, \dots, D_f	Complexité
$1/p_i/\hat{C}max$	$O(n)$
$1/p_i/\sum \hat{C}_i$	$O(\min\{n \log(n), nf\})$
$1/p_i/\sum w_i \hat{C}_i$	NP-difficile au sens fort
$1/p_i, d_i/\sum \hat{u}_i$	$O(n \log(n))$
$1/p_i, d_i/\sum w_i \hat{u}_i$	NP-difficile
$1/p_i, d_i/\sum \hat{T}_i$	NP-difficile
$1/p_i, d_i/\sum w_i \hat{T}_i$	NP-difficile au sens fort
$Pm/p_i/\hat{C}max$ ou $\sum \hat{C}_i$	NP-difficile
$Pm/p_i/\hat{u}_i$ ou $\sum w_i \hat{u}_i$	NP-difficile
$Pm/p_i, d_i/\sum \hat{T}_i$	ouvert
$Pm/p_i, d_i/\sum w_i \hat{C}_i$ ou $\sum w_i \hat{T}_i$	NP-difficile au sens fort

Selon les notations et les problèmes introduits dans la section 3.4, nous nous intéressons aux problèmes d'ordonnancement avec des dates de livraison fixes pour la minimisation de la somme pondérée des dates de livraison $\sum w_i \hat{C}_i$, et pour la minimisation de la somme des pénalités des jobs en retard $\sum w_i \hat{u}_i$. Le tableau 4 montre que ces problèmes (sans ressource consommable) sont NP-difficiles.

Bibliographie

- [1] N. ABSI : *Modélisation et résolution de problèmes de lot-sizing à capacité finie*. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, 2005.
- [2] A. AMIRI : Designing a distribution network in a supply chain system : Formulation and efficient solution procedure. *European Journal of Operational Research*, 171:567–576, 2006.
- [3] N. ASCHEUER, M. GRÖTSCHER et A.A.A. ABDEL-HAMID : Order picking in an automatic warehouse : solving online asymmetric ttps. *Mathematical Methods of Operational Research*, 49:501–515, 1999.
- [4] S. AXSÄTER et W.-F. ZHANG : A joint replenishment policy for multi-echelon inventory control. *International Journal of Production Economics*, 59:243–250, 1999.
- [5] K.R. BAKER : *Introduction to sequencing and scheduling*. John Willey & Sons, Inc., 1974.
- [6] P. BAPTISTE, M. FLAMINI et F. SOURD : Lagrangian bounds for just in time job shop scheduling. *Computers & Operations Research*, 35:906–915, 2008.
- [7] P. BAPTISTE et M.Y. MAKNOON : Cross-docking : scheduling of incoming and outgoing semi trailers. In *19th International Conference on Production Research, ICPR 2009, Valparaiso, Chile. Proceedings*, page 6p, 2009.
- [8] J. F. BARD et N. NANANUKUL : The integrated production-inventory-distribution-routing problem. *Journal of Scheduling*, 12:257–280, 2009.
- [9] J.J. BARTHOLDI et K.R. GUE : The best shape for a crossdock. *Transportation Science*, 38(2):235–244, 2004.
- [10] B.B. BEAMON : Supply chain design and analysis : Models and methods. *International Journal of production economics*, 55:281–294, 1998.
- [11] G. BELVAUX et L.A. WOLSEY : Modelling practical lot-sizing problems as mixed integer programs. *Management Science*, 37(7):993–1007, 2001.
- [12] P.J. BILLINGTON, J.O. MCCLAIN et L.J. THOMAS : Heuristics for multilevel lot-sizing with a bottleneck. *Management Science*, 32(8):989–1006, 1986.
- [13] A. BILLIONNET : Integer programming to schedule a hierarchical workforce with variable demands. *European Journal of Operational Research*, 114(1):105–114, 1999.
- [14] J. BLAZEWCZ, W. CELLARY, R. SLOWINSKI et J. WEGLARZ : Scheduling under resource constraints – deterministic models. In *Annals of Operations Research*, volume 7, pages 989–1006. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 1986.
- [15] J. BLAZEWCZ, M. DROR et J. WEGLARZ : Mathematical programming formulations for machine scheduling : A survey. *European Journal of Operational Research*, 51(3):283–300, 1991.
- [16] J. BLAZEWCZ, J.K. LENSTRA et A.H.G. RINNOOY KAN : Scheduling subject to resource constraints : classification and complexity. *Discrete Applied Mathematics*, 5(1):11–24, 1983.

- [17] K. BÜLBÜL, P. KAMINSKY et C. YANO : Flow shop scheduling with earliness, tardiness, and intermediate inventory holding costs. *Naval Research Logistics*, 51:407–444, 2004.
- [18] K. BÜLBÜL, P. KAMINSKY et C. YANO : Preemption in single machine earliness/tardiness scheduling. *Journal of Scheduling*, 10:271–292, 2007.
- [19] N. BOYSEN, M. FLIEDNER et A. SCHOLL : Scheduling inbound and outbound trucks at cross docking terminals. *OR Spectrum*, 32:135–161, 2010.
- [20] P. BRANDIMARTE et M. CALDERINI : A heuristic bi-criterion approach to integrated process plan selection and job shop scheduling. *International Journal of Production Research*, 66:161–181, 1995.
- [21] A.P.G. BROWN et Z.A. LOMNICKI : Some applications of the 'branch and bound' algorithm to the machine scheduling problem. *Operational Research Quarterly*, 17:173–186, 1966.
- [22] P. BRUCKER : *Scheduling Algorithms*. Springer Lehrbuch, Inc., 1995.
- [23] P. BRUCKER, A. DREXL, R. MÜLLER, K. NEUMANN et E. PESCH : Resource constrained project scheduling : Notations, classification, models and methods. *European Journal of Operational Research*, 112:3–41, 1999.
- [24] M. CAGRI, K. MOINZADEH et Y.-P. ZHOU : Coordinated replenishment strategies in inventory/distribution systems. *Management Science*, 57(2):293–307, 2007.
- [25] L. E. CÁRDENAS-BARRÓN : Optimizing inventory decisions in a multi-stage multi-customer supply chain : A note. *Transportation Research Part E : Logistics and Transportation Review*, 43(5):647–654, 2007.
- [26] J. CARLIER : *Problèmes d'ordonnancement à contraintes de ressources : Algorithmes et complexité*. Thèse d'état. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie (Paris VI), 1984.
- [27] J. CARLIER, A. MOUKRIM et H. XU : The project scheduling problem with production and consumption of resources : A list-scheduling based algorithm. *Discrete Applied Mathematics*, 157(17):3631–3642, 2009.
- [28] J. CARLIER et A.H.G. RINNOOY KAN : Scheduling subject to nonrenewable resource constraints. *Operations Research Letters*, 1:52–55, 1982.
- [29] S. CARRERA, K. CHAMI, R. GUIMARAES, M.C. PORTMANN et W. RAMDANE CHERIF : Negotiation models for logistic platform planning and scheduling. In *Eleventh International Workshop on Project Management and Scheduling, PMS 2008, Turquie. Proceedings*, pages 43–46, 2008.
- [30] S. CARRERA, M.C. PORTMANN et W. RAMDANE CHERIF : Outils d'aide à la décision pour le lissage de charges des plateformes logistiques. In *Congrès International de Génie Industriel, CIGI 2009, Tarbes, France. Proceedings*, page 8p, 2009.
- [31] S. CARRERA, M.C. PORTMANN et W. RAMDANE CHERIF : Scheduling problems for logistic platforms with fixed staircase component arrivals and various deliveries hypotheses. In *Lecture Notes in Management Science, Proceedings of the 2th International Conference on Applied Operational Research - ICAOR, Turku, Finlande*, pages 517–528, 2010.
- [32] S. CARRERA, M.C. PORTMANN et W. RAMDANE CHERIF : Scheduling supply chain node with fixed components arrivals and two partially flexible deliveries. In *5th International Conference on Management and Control of Production and Logistics - MCPL, Coimbra, Portugal. Proceedings*, page 6p, 2010.

-
- [33] P. CHANDRA : A dynamic distribution model with warehouse and customer replenishment requirements. *The Journal of the Operational Research Society*, 44(7):681–692, 1993.
- [34] P. CHANDRA et M. L. FISHER : Coordination of production and distribution planning. *European Journal of Operational Research*, 72:503–517, 1994.
- [35] Y-C. CHANG et C-Y. LEE : Machine scheduling with job delivery coordination. *European Journal of Operational Research*, 158:470–487, 2004.
- [36] L. CHE et V.J. LEON : Power-of-two single-warehouse multi-buyer inventory coordination with private information. *International Journal of Production Economics*, 111(2):562–574, 2008.
- [37] F. CHEN et C.-Y. LEE : Minimizing the makespan in a two-machine cross-docking flow shop problem. *European Journal of Operational Research*, 193:59–72, 2009.
- [38] P. CHEN, Y. GUO, A. LIM et B. RODRIGUES : Multiple crossdocks with inventory and time windows. *Computers & Operations Research*, 33(1):43–63, 2006.
- [39] Z.-L. CHEN : Integrated production and distribution operations : Taxonomy, models, and review. In D. SIMCHI-LEVI, S. D. WU et Z.-J. SHEN, éditeurs : *Handbook of Quantitative Supply Chain analysis : Modelling in the E-Business Era*. Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [40] Z.-L. CHEN et G. L. VAIRAKTARAKIS : Integrated scheduling or production and distribution operations. *Management Science*, 51:614–628, 2005.
- [41] Z.L. CHEN et G. PUNDOOR : Order assignment and scheduling in a supply chain. *Operations Research*, 54(3):555–572, 2006.
- [42] D. CHHAJED : A fixed interval due-date scheduling problem with earliness and due-date costs. *European Journal of Operational Research*, 84:385–401, 1995.
- [43] S. CHOPRA et P. MEINDL : *Supply Chain Management : strategy, planning and operations*. Pearson Education, New Jersey, 2007.
- [44] M. COCHAND, D. DE WERRA et R. SLOWINSKI : Preemptive scheduling with staircase and piecewise linear resource availability. *Methods and Models of Operations Research*, 33:297–313, 1989.
- [45] R.W. CONWAY, W.L. MAXWELL et L.W. MILLER : *Theory of scheduling*. Addison-Wesley, Inc., 1967.
- [46] A. COURTOIS, M. PILLET et C. MARTIN-BONNEFOUS : *Gestion de Production*. Eyrolles, Paris, 2003.
- [47] G.B. DANTZIG : Discrete variable extremum problems. *Operations Research*, 5:266–277, 1957.
- [48] S. DAUZÈRE-PÉRÈS et J.B. LASSERRE : On the importance of sequencing decision in production planning and scheduling. *International Transactions in Operational Research*, 9(6):779–793, 2002.
- [49] R. DE KOSTER, T. LE-DUC et K. J. ROODBERGEN : Design and control of warehouse order picking : a literature review. *European Journal of Operational Research*, 182:481–501, 2007.
- [50] R. DE KOSTER, E.S. VAN DER POORT et M. WOLTERS : Efficient orderbatching methods in warehouses. *International Journal of Production Research*, 37(7):1479–1504, 1999.
- [51] D. DE WERRA : A decomposition property of polyhedra. *Mathematical Programming*, 30:261–266, 1984.

- [52] A. DREXL et A. KIMMS : Lot sizing and scheduling - survey and extensions. *European Journal of Operational Research*, 99:221–235, 1997.
- [53] A.T. ERNST, H. JIANG, M.K. MOORTHY, B. OWENS et D. SIER : An annotated bibliography of personnel scheduling and rostering. In *Annals of Operations Research*, volume 127, pages 21–144. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 2004.
- [54] J. ERSCHLER et B. GRABOT : *Gestion de production*. Hermes, Paris, 2001.
- [55] B. ESTEVE, C. AUBIJOUS, A. CHARTIER et V. T'KINDT : A recovering beam search algorithm for the single machine just-in-time scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 172:798–813, 2006.
- [56] M. FISHER : Optimal solution of scheduling problem using lagrange multipliers : Part i. *Operations Research*, 21:1114–1127, 1973.
- [57] J. FONDREVELLE : *Résolution exacte de problèmes d'ordonnancement de type flowshops de permutation en présence de contraintes d'écarts temporels entre opérations*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2005.
- [58] M.S. FOX, M. BARBUCEANU et R. TEIGEN : Agent-oriented supply chain management. *International Journal of Flexible Manufacturing Systems*, 12:165–188, 2000.
- [59] L. FRANCHINI, E. CAILLAUD, P. NGUYEN et G. LACOSTE : Workload control of human resources to improve production management. *International Journal of Production Research*, 39(7):1385–1403, 2001.
- [60] A.J.R.N. GADEMANN et S. Van de VELDE : Batching to minimize total travel time in a parallel-aisle warehouse. *IIE Transactions*, 37(1):63–75, 2005.
- [61] A.J.R.N. GADEMANN, J.P. Van den BERG et H.H. Van der HOFF : An order batching algorithm for wave picking in a parallel-aisle warehouse. *IIE Transactions*, 33:385–398, 2001.
- [62] E.R. GAFAROV et A.A. LAZAREV : Single machine scheduling with a non-renewable financial resource. *Working paper*, 2010.
- [63] R. GANESHAN : Managing supply chain inventories : a multiple retailer, one warehouse, multiple supplier model. *International Journal of Production Economics*, 59:341–354, 1999.
- [64] M.R. GARY et S.S. JOHNSON : *Computers and Intractability, A guide to the Theory of NP-Completeness*. Freeman, San Francisco, 1979.
- [65] M. GEN et A. SYARIF : Hybrid genetic algorithm for multi-time period production/distribution planning. *Computers & Industrial Engineering*, 48(4):799–809, 2005.
- [66] I. GIANNOCCARO, P. PONTRANDOLFO et B. SCOZZI : A fuzzy echelon approach for inventory management in supply chains. *European Journal of Operational Research*, 149:185–196, 2003.
- [67] V. GIARD et G. MENDY : Scheduling coordination in a supply chain using and advance demand information. *Production Planning & Control*, 19(7):655–667, 2008.
- [68] F. GLOVER : Tabu search : a tutorial. *Interfaces*, 20(4):74–94, 1990.
- [69] M. GOVIL et J.M. PROTH : *Supply Chain Design and Management*. J.D. Irwin, Academic Presse, London, 2002.
- [70] R.L. GRAHAM, E.L. LAWLER, J.K. LENSTRA et A.H.G. RINNOOY KAN : Optimization and approximation in deterministic sequencing and scheduling theory : a survey. *Annals of Discrete Mathematics*, 5:287–326, 1979.

-
- [71] D. L. GRESH, D. P. CONNORS, J. P. FASANO et R. J. WITTROCK : Applying supply chain optimization techniques to workforce planning problems. *IBM Journal of Research and Development*, 51(3-4):251–261, 2007.
 - [72] J. GU, M. GOETSCHALCKX et L.F. MCGINNIS : Research on warehouse operation : A comprehensive review. *European Journal of operational Research*, 177:1–21, 2007.
 - [73] A. GUNASEKARAN et B. KOBU : Performance measurements and metrics in logistics and supply chain management : a review of recent literature for research and applications. *International Journal of Production Research*, 45(12):2819–2840, 2007.
 - [74] A. GUNASEKARAN, D.K. MACBETH et R. LAMMING : Modelling and analysis of supply chain management systems : an editorial overview. *Journal of the Operational Research Society*, 51:1112–1115, 2000.
 - [75] A. GUNASEKARAN, C. PATEL et R.E. MCGAUGHEY : A framework for supply chain performance measurement. *International Journal of production Economics*, 87:333–347, 2004.
 - [76] J.N.D. GUPTA et Jr E.F. STAFFORD : Flowshop scheduling research after five decades. *European Journal of Operational Research*, 169(3):669–711, 2006.
 - [77] N.G. HALL, M. LESAOANA et C.N. POTTS : Scheduling with fixed delivery dates. *Operations Research*, 49(1):134–144, 2001.
 - [78] N.G. HALL et C.N. POTTS : Supply chain scheduling : Batching and delivery. *Operations Research*, 51(4):566–584, 2003.
 - [79] N.G. HALL et C.N. POTTS : The coordination of scheduling and batch deliveries. In *Annals of Operations Research*, volume 135, pages 41–64. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands, 2005.
 - [80] R. HASSIN et M. SHANI : Machine scheduling with earliness, tardiness and non-execution penalties. *Computers & Operations Research*, 32:683–705, 2005.
 - [81] D.J. HATFIELD et J.F. PIERCE : On the application of combinatorial programming to a class of single stage sequencing problems. *Working paper*, 1966.
 - [82] Y. HENDEL et F. SOURD : An improved earliness-tardiness timing algorithm. *Computers & Operations Research*, 34:2931–2938, 2007.
 - [83] S.S. HERAGU, L. DU, R.J. MANTEL et P.C. SHUUR : Mathematical model for warehouse design and product allocation. *International Journal of Production Research*, 43(2):327–338, 2005.
 - [84] F. HNAIEN : *Gestion des stocks dans des chaînes logistiques face aux aléas des délais d’approvisionnements*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2008.
 - [85] R. HUNG : Single-shift off-day scheduling of a hierarchical workforce with variable demands. *European Journal of Operational Research*, 78(1):49–57, 1994.
 - [86] S.M. JOHNSON : Optimal two and three stage production schedules with setup time included. *Naval Research Logistic Quarterly*, 1:61–68, 1954.
 - [87] P. KAMINSKY et O. KAYA : Inventory positioning, scheduling and lead-time quotation in supply chains. *International Journal of Production Economics*, 114(1):276–293, 2008.
 - [88] M. KHOUBA : Optimizing inventory decisions in a multi-stage multi-customer supply chain. *Transportation Research*, 39:193–208, 2003.

- [89] Y.J. KIM, Y.K. KIM et Y. CHO : A heuristic-based genetic algorithm for workload smoothing in assembly lines. *Computers & Operations Research*, 25(2):99–111, 1998.
- [90] O. KONÉ : *Nouvelles approches pour la résolution du problème d'ordonnancement de projet à moyens limités*. Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2009.
- [91] R. LARBI, G. ALPAN, P. BAPTISTE et B. PENZ : Scheduling of transshipment operations in a single strip and stack doors crossdock. *In 19th International Conference on Production Research, ICPR 2009, Valparaiso, Chile. Proceedings*, page 6p, 2007.
- [92] R. LARBI, G. ALPAN et B. PENZ : Scheduling transshipment operations in a multiple inbound and outbound door crossdock. *In International Conference on Computers & Industrial Engineering, CIE 2009. Troyes, France. Proceedings*, page 6p, 2009.
- [93] V. LAUFF et F. WERNER : On the complexity and some properties of multi-stage scheduling problems with earliness and tardiness penalties. *Computers and Operations Research*, 31:317–345, 2004.
- [94] E.L. LAWLER et D.E. WOOD : Branch and bound methods : a survey. *Operations Research*, 14:699–719, 1966.
- [95] T. LE-DUC et R. DE KOSTER : Travel time estimation and order batching in a 2-block warehouse. *European Journal of Operational Research*, 176(1):374–388, 2007.
- [96] Y. H. LEE, J. W. JUNG et K. M. LEE : Vehicle routing scheduling for cross-docking in the supply chain. *Computers & Industrial Engineering*, 51:247–256, 2006.
- [97] L. LEI, S. LIU, A. RUSZCZYNSKI et S. PARK : On the integrated production, inventory, and distribution routing problem. *IIE Transactions*, 38(11):955–970, 2006.
- [98] C.-L. LI, G. VAIRAKTARAKIS et C.-Y. LEE : Machine scheduling with deliveries to multiple customer locations. *Discrete Optimization*, 164:39–51, 2005.
- [99] X. LI et Q. WANG : Coordination mechanisms of supply chain systems. *European Journal of Operational Research*, 179:1–16, 2007.
- [100] A. LIM, Z. MIAO, B. RODRIGUES et Z. XU : Transshipment through crossdocks with inventory and time windows. *In K.-Y. CHWA et J.I. MUNRO, éditeurs : COCOON 2004, LNCS 3106, Springer-Verlag*, pages 122–131, Berlin, 2004.
- [101] R. MANZINI, M. GAMBERI, E. GEBENNINI et A. REGATTIERI : An integrated approach to the design and management of a supply chain system. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 37:625–640, 2008.
- [102] S. MARTELLO et P. TOTH : *Knapsack Problems*. John Wiley & Sons, New York, 1990.
- [103] C.H. MARTIN, D.C. DENT et J.C ECKHART : Integrated production, distribution, and inventory planning at libbey-owens-ford. *Interfaces*, 23:68–78, 1993.
- [104] H. MATSUO : The weighted total tardiness problem with fixed shipping times and overtime utilization. *Operations Research*, 36(2):293–307, 1988.
- [105] G.B. MCMAHON et P.G. BURTON : Flow-shop scheduling with the branch-and-bound method. *Operations Research*, 15:473–481, 1967.
- [106] H. MEYR, M. WAGNER et J. ROHDE : Structure of advanced planning systems. *In H. STADTLER et C. KILGER, éditeurs : Supply Chain Management and Advanced Planning – Concepts, Models Software and Case Studies*, pages 99–104, Berlin, 2002.
- [107] F. MOCELLIN : *Gestion des entrepôts et plates-formes*. Dunod, Paris, France, 2006.

-
- [108] C. MOON, Y. H. LEE, C. S. JEONG et Y. YUN : Integrated process planning and scheduling in a supply chain. *Computers & Industrial Engineering*, 54:1048–1061, 2008.
 - [109] Z. MOULOUA : *Ordonnancements coopératifs pour les chaînes logistiques*. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2007.
 - [110] R. NARASIMHAN : An algorithm for single shift scheduling of hierarchical workforce. *European Journal of Operational Research*, 96(1):113–121, 1997.
 - [111] M. NAWAZ, E.E. ENSCORE et I. HAM : A heuristic algorithm for the m-machine, n-job flow shop sequencing problem. *Omega*, 1:91–95, 1983.
 - [112] J. ORLICKY : *The successful Computer Systems : Its Planning, development, and management in a business enterprise*. McGraw-Hill, 1968.
 - [113] L. OUZIZI : *Planification par négociation dans un système de décision semi-distribué pour une entreprise en réseau*. Thèse de doctorat, Université de Metz, 2005.
 - [114] L. OZDAMAR et T. YAZGAÇ : A hierarchical planning approach for a production-distribution system. *International Journal of Production Research*, 37(16):3759–3772, 1999.
 - [115] Y.B. PARK : An integrated approach for production and distribution planning in supply chain management. *International Journal of Production Research*, 43(6):1205–1224, 2005.
 - [116] J.H. PATTERSON, R. SLOWINSKI, F.B. TALBOT et J. WEGLARZ : An algorithm for a general class of precedence and resource constrained scheduling problems. In *Advances in Project Scheduling*, pages 3–28, Amsterdam, 1989. Elsevier Science Publishers B.V.
 - [117] C.G. PETERSEN et G. AASE : A comparison of picking, storage, and routing policies in manual order picking. *International Journal of Production Economics*, 92(1):11–19, 2004.
 - [118] M. PIDD : Just modelling through : a rough guide to modelling. *Interfaces*, 19(2):118–132, 1999.
 - [119] M. L. PINEDO : *Scheduling : Theory, Algorithms, and Systems*. Prentice Hall, New York, 2008.
 - [120] M.-C. PORTMANN : *Méthodes de décomposition spatiales et temporelles en ordonnancement de la production*. Thèse d'état. Thèse de doctorat, Université de Nancy 1, 1987.
 - [121] M.-C. PORTMANN : Scheduling methodology : optimization and compu-search approaches I. In A. Artiba et S.E. ELMAGHRABY, éditeur : *The planning and scheduling of production systems*, pages 271–300. Chapman et Hall edition, 1997.
 - [122] C.N. POTTS : An adaptive branching rule for the permutation flow-shop problem. *European Journal of Operational Research*, 5:19–25, 1980.
 - [123] G. PUNDOOR et Z.-L. CHEN : Scheduling a production-distribution system to optimize the tradeoff between delivery tardiness and distribution cost. *Naval Research Logistics*, 52(6):571–589, 2005.
 - [124] H.D. RATLIFF et A.S. ROSENTHAL : Order-picking in a rectangular warehouse : A solvable case of the travelling salesman problem. *Operations Research*, 31(3):507–521, 1983.
 - [125] A. ROBERT : *Optimisation des batches de production*. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, 2007.
 - [126] K.J. ROODBERGEN et R. DE KOSTER : Routing methods for warehouses with multiple cross aisles. *International Journal of Production Research*, 39(9):1865–1883, 2001.

- [127] B. ROUWENHORST, B. REUTER, V. STOCKRAHM, G.J. VAN HOUTUM, R.J. MANTEL et W.H.M. ZIJM : Warehouse design and control : Framework and literature review. *European Journal of Operational Research*, 122:515–533, 2000.
- [128] R. SADYKOV : A polynomial algorithm for a simple scheduling problem at cross docking terminals. *INRIA Research Report*, 2009.
- [129] F. SAHIN et E. P. ROBINSON : Flow coordination and information sharing in supply chains : review, implications, and directions for future research. *Decision Sciences*, 33(4):505–536, 2002.
- [130] G. J. SALEGNA et P. S. PARK : Workload smoothing in a bottleneck job-shop. *International Journal of Operations & Production Management*, 16(1):91–110, 1996.
- [131] A.M. SARMIENTO et R. NAGI : A review of integrated analysis of production distribution systems. *IIE Transactions*, 31:1061–1074, 1999.
- [132] S.U. SEÇKINER, H. GÖKÇEN et M. KURT : An integer programming model for hierarchical workforce scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 183(2):694–699, 2007.
- [133] E. A. SILVER : Operations research in inventory management : a review and critique. *Operations Research*, 29(4):628–644, 1981.
- [134] D. SIMCHI-LEVI, P. KAMINSKY et E. SIMCHI-LEVI : *Designing and Managing the Supply Chain*. McGraw Hill, New York, 2003.
- [135] S. SINDHUHAO, H. E. ROMEIJN, E. AKÇALI et R. BOONDISKULCHOK : An integrated inventory routing system for multi item joint replenishment with limited vehicle capacity. *Journal of Global Optimization*, 32:93–118, 2005.
- [136] R. SLOWINSKI : Preemptive scheduling of independent jobs on parallel machines subject to financial constraints. *European Journal of Operational Research*, 15:366–373, 1984.
- [137] K. SONG et F. CHEN : Scheduling cross docking logistic optimization problem with multiple inbound vehicles and one outbound vehicle. In *IEEE International Conference on Automation and Logistics. Jinan, China. Proceedings*, pages 3089–3094, 2007.
- [138] F. SOURD : *Ordonnancer Juste à temps. Mémoire d’habilitation à diriger des recherches*. Thèse de doctorat, Université Pierre et Marie Curie, 2008.
- [139] F. SOURD et S. KEDAD-SIDHOUM : A faster branch-and-bound algorithm for the earliness-tardiness scheduling problem. *Journal of Scheduling*, 11:533–549, 2003.
- [140] F. SOURD et S. KEDAD-SIDHOUM : The one machine problem with earliness and tardiness penalties. *Journal of Scheduling*, 6:533–549, 2003.
- [141] H. STADTLER : Supply chain management and advanced planning basics overview and challenges. *European Journal of Operational Research*, 163:575–588, 2005.
- [142] G. STRACK et Y. POCHET : An integrated model for warehouse and inventory planning. *European Journal of Operational Research*, 204:35–50, 2010.
- [143] W. TAN : Integration of process planning and scheduling - a review. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 11:51–63, 2000.
- [144] D.A. TAYLOR : *Supply Chains : A Manager’s Guide*. Adisson Wesley, USA, 2003.
- [145] D.J. THOMAS et P.M. GRIFFIN : Coordinated supply chain management. *European Journal of Operational Research*, 94(1):1–15, 1996.

-
- [146] A. TOKER, S. KONDAKCI et N. ERKIP : Scheduling under a non-renewable resource constraint. *Journal of the Operational Research Society*, 42(9):811–814, 1991.
- [147] J. P. VAN DEN BERG : A literature survey on planning and control of warehousing systems. *IIE Transactions*, 31:751–762, 1999.
- [148] J.P. VAN DEN BERG : *Integral Warehouse Management*. Management Outlook, Netherlands, 2007.
- [149] J.P. VAN DEN BERG et W.H.M. ZIJM : Models for warehouse management : classification and examples. *International Journal Production Economics*, 59(1-3):519–528, 1999.
- [150] R. I. VAN HOEK : The rediscovery of postponement a literature review and directions for research. *Journal of Operations Management*, 19(2):161–184, 2001.
- [151] S. VISWANATHAN et K. MATHUR : Integrating routing and inventory decisions in one-warehouse multi-retailer multi-product distribution system. *Management Science*, 43(3):294–312, 1997.
- [152] G. WAN et B. P.-C. YEN : Tabu search for single machine scheduling with distinct due windows and weighted earliness/tardiness penalties. *European Journal of Operational Research*, 142:271–281, 2002.
- [153] B. D. WILLIAMS et T. TOKAR : A review of inventory management research in major logistics journals : Themes and future directions. *International Journal of Logistics Management*, 19(2):212–232, 2008.
- [154] P. WIROJANAGUD, S.E. GEL, J.W. FOWLER et R. CARDY : Modelling inherent worker differences for workforce planning. *International Journal Production Research*, 45(3):525–553, 2007.
- [155] C. WOLOSEWICZ : *Approche intégrée en planification et ordonnancement de la production*. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, 2008.
- [156] J. XIE : Polynomial algorithms for a single machine scheduling problems with financial constraints. *Operations Research Letters*, 21:39–42, 1997.
- [157] X. YANG : Scheduling with generalized batch delivery dates and earliness penalties. *IIE Transactions*, 32:735–741, 2000.
- [158] W. YU : *Operational Strategies for cross-docking systems*. Thèse de doctorat, Iowa State University, 2002.
- [159] W. YU et P.J. EGBELU : Scheduling of inbound and outbound trucks in cross docking systems with temporary storage. *European Journal of Operational Research*, 184:377–396, 2008.

AUTORISATION DE SOUTENANCE DE THESE
DU DOCTORAT DE L'INSTITUT NATIONAL
POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

o0o

VU LES RAPPORTS ETABLIS PAR :

Madame Marie-Ange MANIER, Maître de Conférences, UTBM, Belfort

Monsieur Aziz MOUKRIM, Professeur, UTC, Compiègne

Le Président de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, autorise :

Madame CARRERA HERNANDEZ Susana

à soutenir devant un jury de l'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE,
une thèse intitulée :

"Planification et ordonnancement de plateformes logistiques"

NANCY BRABOIS
2, AVENUE DE LA
FORET-DE-HAYE
BOITE POSTALE 3
F - 54501
VANDŒUVRE CEDEX

en vue de l'obtention du titre de :

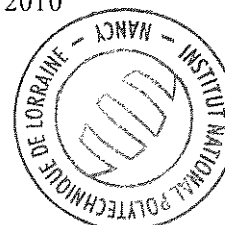
DOCTEUR DE L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE LORRAINE

Spécialité : « **Informatique** »

Fait à Vandoeuvre, le 27 octobre 2010

Le Président de l'I.N.P.L.,

F. LAURENT



PLANIFICATION ET ORDONNANCEMENT DE PLATEFORMES LOGISTIQUES

Résumé : L'objectif de cette thèse est de fournir des outils d'aide à la décision pour piloter les plateformes logistiques à court et moyen terme. La première partie décrit la problématique concernée et les notions essentielles dans le cadre des chaînes logistiques. Dans la deuxième partie, le problème de la planification est étudié, nous proposons des modèles linéaires pour minimiser les coûts de personnel, qui prennent en compte les flux : leurs variations saisonnières, la possibilité de les négocier localement en amont et en aval, ainsi que leur organisation et celle du travail. Ainsi, l'outil peut être utilisé dans la coordination des flux entre les partenaires de la chaîne logistique; deux types de négociations sont envisagés : la négociation des quantités de produits livrées en amont et en aval de la plateforme et la négociation des dates de livraison. Ces modèles sont testés et validés sur des instances générées aléatoirement, sur des configurations inspirées de problèmes réels. Dans la troisième partie, nous travaillons sur l'ordonnancement des activités de préparation de commandes. Ici, nous combinons deux familles de contraintes difficiles : l'arrivée de composants (ressources consommables) à des dates et en quantités connues à l'amont de la plateforme, et des tournées de livraison à dates fixées à l'aval. Trois cas particuliers sont étudiés, selon la façon dont les tournées sont organisées. Nous proposons des procédures par séparation et évaluation pour ces problèmes, et un modèle linéaire en nombres entiers pour le cas le plus simple. Des expériences sont faites sur des familles d'instances générées aléatoirement et de manière partiellement hétérogène. Plusieurs perspectives de généralisation sont proposées.

Mots-clés : planification, ordonnancement, plateformes logistiques, outils d'aide à la décision

LOGISTIC PLATFORM PLANNING AND SCHEDULING

Abstract : The aim of this thesis is to provide decision support systems to control logistic platforms at the mid-term and short-term levels. Several problems and main notions concerning logistic platform context are described in the first part. In the second part, planning problems are studied. Two linear programming models are proposed to minimize the workforce costs. These models take into account several characteristics: seasonal flow variations, work and flow organization in the platform, and local negotiations of the upstream and downstream flows. In consequence, our decision support system can be used in the flow coordination between supply chain partners. Two types of negotiations are considered: negotiations of upstream and downstream delivered quantities and negotiation of delivery dates. These models have been tested on pertinent randomly generated instances inspired from concrete problems. In the third part of the thesis, the external flows of the platform are assumed to be fixed. Orders preparation scheduling problem inside the platform is considered. Two families of strong constraints are combined: staircase availability of components (consumable resources) and fixed delivery dates. According to the way the downstream deliveries are organized and penalized, three different cases (based on industrial applications) have been studied. We proposed three branch and bound procedures for these problems, and an integer linear program for the easiest problem. Experimental analysis has been done over heterogeneous randomly generated instance families. In the last part, a series of perspectives for this work are proposed.

Keywords: planning, scheduling, logistic platforms, decision support systems