

Titre: Intégration des problèmes d'ordonnancement et de découpe en milieus manufacturier
Title: milieu manufacturier

Auteur: Annie Vincent
Author:

Date: 2005

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Vincent, A. (2005). Intégration des problèmes d'ordonnancement et de découpe en milieus manufacturier [Master's thesis, École Polytechnique de Montréal].
Citation: PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/7690/>

Document en libre accès dans PolyPublie

Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/7690/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Martin Trépanier, & Pierre Baptiste
Advisors:

Programme: Unspecified
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

INTÉGRATION DES PROBLÈMES D'ORDONNANCEMENT
ET DE DÉCOUPE EN MILIEU MANUFACTURIER

ANNIE VINCENT

DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES ET DE GÉNIE INDUSTRIEL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE INDUSTRIEL)

MAI 2005



Library and
Archives Canada

Published Heritage
Branch

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Direction du
Patrimoine de l'édition

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file *Votre référence*
ISBN: 978-0-494-16864-6

Our file *Notre référence*
ISBN: 978-0-494-16864-6

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protège cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.

**
Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé:

INTÉGRATION DES PROBLÈMES D'ORDONNANCEMENT
ET DE DÉCOUPE EN MILIEU MANUFACTURIER

présenté par: VINCENT Annie

en vue de l'obtention du diplôme de: Maîtrise ès sciences appliquées
a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de:

M. AGARD Bruno, Doctorat, président

M. TRÉPANIER Martin, ing., Ph.D., membre et directeur de recherche

M. BAPTISTE Pierre, Doctorat, membre et codirecteur de recherche

M. CHARTRAND Patrice, ing., Ph. D., membre

NOTE IMPORTANTE

Les informations contenues dans ce mémoire ont délibérément été modifiées afin de préserver la confidentialité des données de l'entreprise participant à cette recherche. Un bon nombre d'éléments, utilisés dans la résolution de la problématique, ont également été exclus de cette publication pour respecter les stratégies commerciales de la société.

REMERCIEMENTS

L'auteure désire en premier lieu remercier les professeurs Martin Trépanier et Pierre Baptiste pour leur aide et leur support. Leur grande disponibilité, leur intérêt constant et la pertinence de leurs interventions ont permis la réalisation de cette recherche.

L'auteure est reconnaissante envers la compagnie Alcan Inc. pour son accueil chaleureux, la problématique de recherche intéressante et son soutien financier. Plus particulièrement, des remerciements sont adressés à Alexandre Brassard, Yves Morisset, Martin Bouchard, Claude Bernard, Frank Moffat et Lucille Morin pour leur patience, leur disponibilité et leurs réponses aux nombreuses questions.

Un merci tout spécial est dédié à Gaétan Lavoie, Guy Lauzier, Normand Lavoie, Richard Tramblay ainsi qu'à tous les contremaîtres et employés du Centre de coulée 5 de l'usine Arvida de Jonquière pour l'aide apportée dans la réalisation des autres mandats du travail.

RÉSUMÉ

Les industries manufacturières sont souvent aux prises avec deux objectifs conflictuels : le désir de satisfaire les demandes de leurs clients le plus fidèlement possible et la nécessité de conserver de faibles coûts d'opération. Ce dilemme est d'autant plus particulier dans le cas d'entreprises orientées vers la fabrication sur commande (*make-to-order*) et dotées d'équipements de production par lots (*batch processing*). En effet, faute d'espace d'entreposage suffisant, la production supplémentaire est perdue. Des problèmes majeurs surviennent également lorsque l'unité de production diffère de l'unité de vente et que le système d'optimisation est basé sur la vente de lots complets.

En ce sens, ce travail de recherche évalue l'impact de l'évolution des demandes des clients sur les politiques de planification et d'ordonnancement de la production dans les environnements présentés ci-dessus. Ces deux problématiques, rencontrées dans une fonderie d'aluminium, découlent de la particularité des procédés de fabrication de l'entreprise ainsi que des politiques de gestion des commandes des clients.

Afin d'identifier les pistes d'amélioration des processus de décision actuels, le système d'optimisation de l'atelier a d'abord été reproduit. Par souci de confidentialité, l'algorithme n'est cependant pas inclus dans ce travail. La performance du système d'optimisation est par la suite mise en relief en fonction de la demande actuelle puis un modèle mathématique est proposé afin de faciliter l'interaction entre les services de production et de marketing de l'entreprise. L'interdépendance des opérations de production de la fonderie a démontré la nécessité d'intégrer les contraintes reliées aux différents postes de travail en un seul et même modèle.

L'étude a tout d'abord permis de déterminer les conditions d'utilisation idéales du logiciel d'optimisation, soit une séquence d'entrée des commandes en ordre croissant de longueurs, la planification d'un maximum de 3 longueurs par type de produits et

l'élimination de combinaisons de produits « longs » aux mêmes caractéristiques. L'incapacité de l'application à traiter la demande actuelle sans engendrer de pertes importantes (i.e. petites quantités de produits aux mêmes caractéristiques) a également été démontrée.

La résolution du modèle par la programmation linéaire permet d'améliorer les opérations de planification et d'ordonnancement de la production de la fonderie. En effet, les pertes totales voient leur niveau diminuer de l'ordre de 20 à 43,5%, selon le nombre de longueurs demandées. La fabrication de pièces supplémentaires est éliminée et la mauvaise utilisation d'un lot pour fabriquer divers produits finis (i.e. longueurs multiples) est réduite de 66%. Le modèle mathématique permet également de maximiser la quantité de produits vendus aux clients, c'est-à-dire de satisfaire en moyenne 103,24% de la demande plutôt que 99,96%. La modification de l'objectif afin de favoriser les ventes de pièces n'apporte cependant aucun avantage notable.

ABSTRACT

Manufacturing industries often struggle with two conflicting objectives: satisfy customers' requests and preserving low operation costs. This dilemma is even more specific in the case of batch processing and make-to-order industries, which present little or no storage space at all (in those cases, excess production is lost). Major problems also occur when manufacturing and sale units differ significantly and when the production system is optimized on whole batches sales.

This research project studies the impact of customers' requests evolution on planning and scheduling policies, taking into account the manufacturing environments presented above. Those issues, faced in an aluminum smelter, arise from the distinctive features of the production processes and the customers' orders management policies.

In order to improve the actual decision processes, the optimization system used at the workshop was first reproduced. To respect the confidentiality of the plant's operating strategies, the algorithm is not included in this paper. Nevertheless, its performance against the actual demand is then tested and, to make the interaction between the production and marketing services easier, a mathematical model is proposed. The interdependency between the various smelter's operations proved the need to integrate into a unique problem the constraints of the different workstations.

At first, the optimization system's ideal conditions of use have been identified. For instance, customers' orders must be entered according to the lengths ascending order, planning should not exceed 3 lengths for a typical product and grouping several "long" products in the same batch must be avoid. The software's inability to deal with the actual demand (i.e. small quantities of similar products) without generating excessive losses has also been demonstrated.

The model, solved by linear programming, can improve the planning and scheduling operations of the smelter. As a matter of fact, the total losses generated by the cutting process are reduced by a factor of 20 to 43.5%, depending on the number of lengths desired. The excess production is eliminated and the misuse of a batch in order to manufacture various finished products is lowered by 66%. The mathematical model also increases the quantity of products sold to customers, which means satisfying an average of 103.24% of the initial demands rather than 99.96%. In a second phase, the model's objective function has been modified to increase the smelter's sales but this approach did not raise any valuable gains.

TABLE DES MATIÈRES

NOTE IMPORTANTE	iv
REMERCIEMENTS	v
RÉSUMÉ	vi
ABSTRACT	viii
TABLE DES MATIÈRES.....	x
LISTE DES TABLEAUX	xiii
LISTE DES FIGURES	xiv
LISTE DES ANNEXES.....	xv
CHAPITRE 1 INTRODUCTION	1
1.1 OBJECTIF DE L'ÉTUDE.....	1
1.2 MÉTHODOLOGIE	2
1.3 DIVISION DU TRAVAIL	2
CHAPITRE 2 CONTEXTE ACTUEL	4
2.1 PRÉSENTATION GÉNÉRALE DE L'ENTREPRISE	4
2.2 MODE OPÉRATOIRE DU CENTRE DE COULÉE 5.....	5
2.2.1 SECTEUR CHAUD	5
2.2.1.1 Mise en fours	5
2.2.1.2 Préparation des alliages.....	6
2.2.1.3 Coulée des billettes	6
2.2.1.4 Inspection des billettes	9
2.2.2 SECTEUR FROID	10
2.2.2.1 Traitement thermique des billettes.....	10
2.2.2.2 Coupe des billettes	11
2.2.2.3 Empaquetage, entreposage et distribution	13
2.2.3 PRINCIPAUX PRODUITS.....	14
2.2.4 MÉTHODOLOGIE DE PLANIFICATION ET D'ORDONNANCEMENT	14
2.2.4.1 Réception des commandes des clients	14
2.2.4.2 Planification de la production	15
2.2.4.3 Ordonnancement de la production	16

2.3 PROBLÉMATIQUES RENCONTRÉES	17
2.3.1 PROBLÈME D'ORDONNANCEMENT	17
2.3.2 PROBLÈME DE DÉCOUPE	19
2.4 INTÉGRATION DES DEUX PROBLÉMATIQUES	19
2.5 OBJECTIFS VISÉS PAR CE TRAVAIL DE RECHERCHE	20
CHAPITRE 3 REVUE BIBLIOGRAPHIQUE	22
3.1 PROBLÈME D'ORDONNANCEMENT	24
3.1.1 TROIS PROCESSUS DE DÉCISION FRÉQUEMMENT CONFONDUS	25
3.1.2 CLASSIFICATION DES PROBLÈMES D'ORDONNANCEMENT.....	27
3.1.2.1 Environnement-machine (α)	27
3.1.2.2 Restrictions et contraintes de production (β)	27
3.1.2.3 Objectif à minimiser (γ)	29
3.1.3 PROBLÈME D'ORDONNANCEMENT DANS LA LITTÉRATURE	30
3.2 PROBLÈME DE DÉCOUPE	31
3.2.1 PLUSIEURS APPELLATIONS POUR UN MÊME PROBLÈME	32
3.2.2 CLASSIFICATION DES PROBLÈMES.....	34
3.2.2.1 Dimension (α)	34
3.2.2.2 Autres paramètres	35
3.2.3 PROBLÈME DE DÉCOUPE DANS LA LITTÉRATURE.....	36
3.3 ORDONNANCEMENT INTÉGRÉ	37
3.4 CONCLUSION ET PROPOSITION DE RÉSOLUTION	39
CHAPITRE 4 MODÉLISATION	42
4.1 LOGICIEL D'OPTIMISATION	42
4.1.1 PRÉSENTATION GÉNÉRALE DE L'APPLICATION	43
4.1.2 STRATÉGIE DE SÉPARATION D'UNE COULÉE	44
4.1.3 DISCUSSION À PROPOS DE LA MODÉLISATION	45
4.2 MODÉLISATION MATHÉMATIQUE	46
4.2.1 CONSTRUCTION DU MODÈLE MATHÉMATIQUE	46
4.2.2 HYPOTHÈSES DE RÉSOLUTION	47
4.2.3 PRÉSENTATION DU MODÈLE MATHÉMATIQUE	49
4.2.4 SIMPLIFICATION DU MODÈLE	51
4.2.4.1 Planification pour un seul couple diamètre-alliage	51
4.2.4.2 Élimination de la contrainte non linéaire	52
4.2.4.3 Diminution de l'éventail de longueurs des billettes.....	52
CHAPITRE 5 EXPÉRIMENTATION.....	53
5.1 STRATÉGIE D'ÉLABORATION DES DONNÉES EXPÉRIMENTALES	53
5.2 PRÉSENTATION DES RÉSULTATS OBTENUS	55

5.2.1. PERFORMANCE DU SYSTÈME ACTUEL	55
5.2.1.1 Séquence d'entrée des commandes.....	55
5.2.1.2 Augmentation du nombre de longueurs pour un diamètre-alliage.....	56
5.2.1.3 Combinaison de produits « courts » et « longs » pour un diamètre-alliage	58
5.2.2 COMPARAISON DES PERTES ENGENDRÉES PAR LES DEUX MÉTHODES	60
5.2.2.1 Pertes dues aux longueurs multiples	62
5.2.2.2 Pertes dues aux pièces supplémentaires	64
5.2.3 COMPARAISON DU TONNAGE VENDU ET EXPÉDIÉ SELON LES DEUX MÉTHODES	65
5.2.4 MODIFICATION DE LA FONCTION OBJECTIF	67
CHAPITRE 6 CONCLUSION	72
BIBLIOGRAPHIE	76

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 3.1 : Paramètres associés à la tâche j (Lawler et al, 1993 et Pinedo, 2002).....	25
Tableau 3.2 : Valeurs possibles du paramètre α (Pinedo, 2002).....	28
Tableau 3.3 : Valeurs possibles du paramètre β (Pinedo, 2002).....	28
Tableau 3.4 : Valeurs possibles du paramètre γ (Lawler et al, 1993 et Pinedo, 2002) .	29
Tableau 3.5 : Problème d'ordonnancement dans la littérature.....	30
Tableau 3.6 : Problème de découpe dans la littérature.....	36
Tableau 5.1 : Pertes totales selon le nombre de longueurs demandées.....	60
Tableau 5.2 : Pertes dues aux longueurs multiples	63
Tableau 5.3 : Quantité de pièces supplémentaires générée par commande	65
Tableau 5.4: Satisfaction de la demande des clients	66
Tableau 5.5 : Pertes totales engendrées par les deux modèles.....	69
Tableau 5.6 : Satisfaction de la demande des clients par les deux modèles	69
Tableau 5.7 : Validation des pertes engendrées par la maximisation des ventes.....	70
Tableau B.1 : Pertes totales selon le nombre de longueurs demandées	100
Tableau B.2 : Pertes dues aux longueurs multiples.....	100
Tableau B.3 : Quantité de pièces supplémentaires générée par commande	101
Tableau B.4: Satisfaction de la demande des clients	102

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 : Billettes d'aluminium et profilés (Alcan Inc., 2003).....	5
Figure 2.2 : Schéma des installations de production du CC5	7
Figure 2.3 : Puits de coulée des billettes (Alcan Inc., 2003).....	8
Figure 2.4 : Sortie des billettes pour l'inspection (Alcan Inc., 2003)	10
Figure 2.5 : Méthode de coupe d'une billette brute	12
Figure 2.6 : Caractéristiques des produits du CC5.....	14
Figure 3.1 : Chaîne de décision de la problématique actuelle.....	22
Figure 3.2 : Ordonnancement des tâches sur un diagramme de Gantt (Baker, 1974)....	24
Figure 3.3 : Trois processus de décision (Stoop et Wiers, 1996).....	26
Figure 3.4: Illustration du problème de découpe (Dyckhoff, 1990)	31
Figure 3.5: Catégorisation des problèmes de découpe (Dyckhoff, 1990).....	33
Figure 3.6 : Dimensions des problèmes de découpe (Dyckhoff et al., 1985)	35
Figure 3.7 : Proposition d'une intégration double	40
Figure 4.1 : Reproduction de l'interface du logiciel	43
Figure 4.2 : Échange d'informations entre l'application et le planificateur	44
Figure 5.1 : Élaboration des données expérimentales.....	54
Figure 5.2 : Pertes totales en fonction du nombre de longueurs demandées (actuelles)	56
Figure 5.3 : Pertes totales en fonction du type de produits demandés (actuelles)	58
Figure 5.4 : Pertes totales en fonction du nombre de longueurs demandées	61
Figure 5.5 : Pertes dues aux longueurs multiples.....	62
Figure 5.6 : Pertes totales en fonction de l'objectif à atteindre.....	68
Figure 5.7 : Pertes dues aux longueurs multiples en fonction de l'objectif à atteindre .	71
Figure A.1 : Interface du modèle développé.....	84
Figure B.1 : Organisation de la fonderie.....	91

LISTE DES ANNEXES

Annexe A : Programmation du modèle élaboré	84
Annexe B : Présentation d'un article	88
Annexe C : Coulée des billettes et inspection	106
Annexe D : Traitement thermique des billettes	108
Annexe E: Informatisation de l'opération de coupe	109

CHAPITRE 1

INTRODUCTION

Les entreprises manufacturières évoluant dans les environnements de fabrication sur commande (*make-to-order*), impliquant peu ou pas d'entreposage, et de production par lots (*batch processing*) sont sujettes à des problématiques de production particulières. Dans certains cas, les équipements de ces ateliers fabriquent des lots de produits ayant des caractéristiques fixes qui sont par la suite coupés selon divers patrons. Les lots doivent être vendus en totalité car ils ne peuvent être entreposés : la production excédant la demande est perdue. Dans ces situations, les politiques de planification et d'ordonnancement de la production sont réalisées lot par lot et sont affectées par l'évolution du marché. En effet, si les clients demandent des fractions de plusieurs types de lots plutôt que des lots complets, les plans de production doivent être revus afin de minimiser les pertes encourues par la coupe et la mauvaise utilisation d'un lot pour fabriquer divers produits finis.

1.1 Objectif de l'étude

L'objectif principal de cette recherche est d'étudier l'influence de l'évolution des demandes des clients sur les politiques de planification et d'ordonnancement de la production dans des environnements de fabrication sur commande et par lots. Puisque le système d'optimisation est basé sur la vente de lots complets, l'objectif vise à déterminer l'impact de l'inéquation entre l'unité de production (lot) et l'unité de vente (fraction de lot) et d'améliorer le système pour faciliter l'interaction entre ces services.

Plus particulièrement, le travail étudie l'ordonnancement des opérations de mise en fours, de coulée et de découpe des produits d'un atelier monogamme comportant une machine unique. L'interdépendance des opérations nécessite l'intégration de ces notions

en un seul et même problème, malgré la complexité du modèle engendré. La situation particulière du Centre de coulée 5 (CC5) de l'usine Arvida à Jonquière (Alcan Inc.) présente un contexte industriel intéressant pour l'application de ces principes théoriques.

1.2 Méthodologie

La démarche méthodologique empruntée pour réaliser ce travail comporte cinq étapes. Tout d'abord, une présence de huit mois en entreprise s'est avérée nécessaire afin de se familiariser avec les rouages de la fonderie d'aluminium et d'identifier une problématique de recherche. Pendant cette période, d'autres projets ont également été réalisés afin d'optimiser différents secteurs de l'atelier de production (annexes C à E). Suite à ce séjour en industrie, il apparaît essentiel de procéder à une revue de la documentation portant à la fois sur les problématiques individuelles rencontrées à la fonderie et sur l'intégration de ces concepts en un seul et même problème. Puisqu'il est impossible d'utiliser le logiciel de planification hors de l'entreprise, la reproduction de l'application a été effectuée mais n'est pas présentée dans ce travail. Par la suite, un modèle mathématique est construit afin d'intégrer les différentes contraintes de production de l'atelier dans le but d'améliorer les méthodes de planification et d'ordonnancement de l'entreprise. La performance du système actuel est finalement mise en relief et comparée aux résultats obtenus à l'aide du modèle proposé.

1.3 Division du travail

Le chapitre 2 effectue d'abord une mise en contexte afin de préciser le mode opératoire de l'entreprise témoin. Ceci implique la présentation des secteurs chaud et froid de l'atelier de fonderie de même que des conditions d'opération particulières des équipements de coulée et de coupe. Cette section est également consacrée à la définition des deux problématiques soulevées par les contraintes de production singulières du CC5, soit le problème d'ordonnancement et le problème de découpe. Les facteurs qui

ont contribué à l'apparition de ces complications sont également exposés de même que les principaux objectifs de l'étude.

La troisième partie de ce travail précise la chaîne de décision relative aux problématiques rencontrées à la fonderie d'aluminium. En ce sens, divers travaux reliés à l'ordonnancement de la production et au problème de découpe dans des milieux industriels similaires à celui de l'entreprise étudiée sont examinés. Un certain nombre d'articles portant sur l'ordonnancement intégré sont également exposés. Les travaux recensés dans ce projet n'apportent cependant aucun élément susceptible de guider la démarche de résolution puisque la plupart d'entre eux n'incluent pas la problématique de découpe. Le cas échéant, les recherches se réfèrent à la version classique de ce problème (non applicable dans le cas présent) et n'adressent pas la relation entre les dimensions des lots produits et la quantité de pièces demandées.

Le chapitre 4 regroupe l'ensemble des modélisations réalisées dans le cadre de ce travail de recherche. Tout d'abord, un aperçu du système de planification utilisé actuellement par la fonderie est présenté. Le modèle mathématique développé pour améliorer les activités de la fonderie d'aluminium est par la suite exposé. Plus particulièrement, cette section explique la méthodologie de construction du modèle de même que les hypothèses de résolution et les simplifications apportées au prototype.

Dans la section suivante, la méthodologie de planification du CC5 est d'abord testée afin de déterminer ses limites d'applications en fonction de la nature des demandes actuelles. Le modèle élaboré est également mis en parallèle avec la logique de la fonderie. Différents scénarios sont étudiés afin de comparer l'efficacité relative des méthodes de solution et les résultats de l'expérimentation sont présentés.

Finalement, le chapitre 6 fait état des conclusions tirées suite à cette étude et remet la problématique en perspective. Cette section souligne également un certain nombre d'avenues intéressantes susceptibles d'être explorées lors de recherches futures.

CHAPITRE 2

CONTEXTE ACTUEL

Ce chapitre a pour objectif de définir le contexte industriel dans lequel sont appliqués les concepts théoriques soulevés dans la présente étude. Une présentation générale de l'entreprise ainsi que de son mode de fonctionnement est réalisée afin d'exposer les paramètres et contraintes régissant la production manufacturière de l'endroit. Les différentes problématiques rencontrées de même que les objectifs visés par le travail sont également présentés dans ce chapitre.

2.1 Présentation générale de l'entreprise

L'usine Arvida, érigée en 1926, est l'une des deux plus anciennes alumineries du Québec. Ses vastes installations de production peuvent être regroupées en trois catégories : le centre d'extraction de l'alumine de minerais de bauxite, les centres d'électrolyse et les centres de coulée. La mission des centres de coulée est toute simple : transformer l'aluminium en fusion, fourni par le secteur de l'électrolyse, en produits finis de première coulée selon les spécifications physiques et chimiques des clients. Le Centre de coulée 5 (CC5) est spécialisé dans la production de billettes d'aluminium qui, par le procédé secondaire d'extrusion (i.e. le pressage d'une billette chauffée au travers d'une filière d'acier), sont transformées en profilés de toutes formes. Ces produits sont utilisés afin de fabriquer, entre autres, des cadres de portes et fenêtres pour le domaine de la construction.

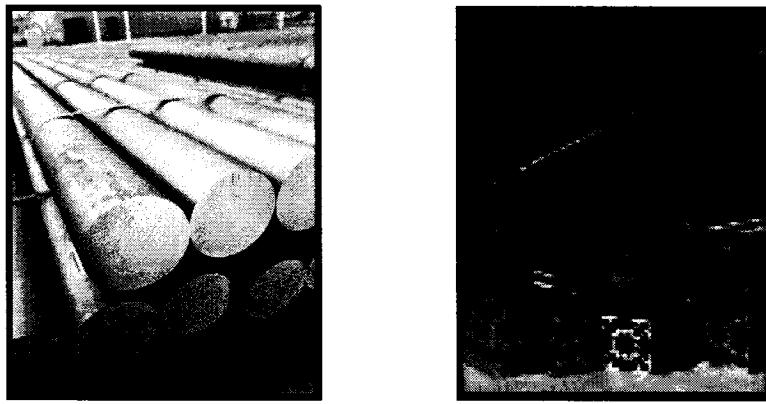


Figure 2.1 : Billettes d'aluminium et profilés (Alcan Inc., 2003)

2.2 Mode opératoire du Centre de coulée 5

Les activités de production du CC5 couvrent toutes les étapes de transformation de l'aluminium, depuis la réception du métal liquide jusqu'à l'expédition des produits finis vers les clients. Les installations du centre, représentées à la figure 2.2, sont divisées en deux groupes d'exploitation, soit le secteur chaud et le secteur froid. Les principales activités de chacune de ces sections sont présentées ci-dessous.

2.2.1 Secteur chaud

Cette première moitié de l'atelier regroupe les activités traitant le métal à l'état liquide, c'est-à-dire les opérations de mise en fours, de préparation des alliages, de coulée et d'inspection des produits.

2.2.1.1 Mise en fours

Le secteur chaud comprend trois fours (fours 40, 41 et 42) de type « *tilted furnace* », c'est-à-dire que le transfert de métal entre eux est effectué par l'inclinaison partielle de l'équipement. Le premier four (four 42) fait office de tampon avant la mise en alliage et

contient le métal « pur » provenant des salles de cuves¹. Il est à noter que ce métal contient invariablement des traces d'éléments chimiques tels le fer ou le silicium, mais que ces ingrédients sont présents en très faible quantité. Ces « impuretés » proviennent principalement de la bauxite, qui est un minerai contenant de larges proportions de fer. La présence de ces éléments est contrebalancée par l'ajout d'ingrédients lors de la préparation des alliages. C'est aussi à l'intérieur du four 42 que les rebuts de production sont fondus de même que certains produits provenant d'entreprises externes.

2.2.1.2 Préparation des alliages

Le métal contenu dans le four 42 est transféré alternativement dans les fours 40 et 41 afin d'effectuer la mise en alliage. Ces derniers sont remplis à pleine capacité, peu importe le diamètre ou la longueur des produits à fabriquer. Les quantités d'ingrédients d'alliage ou de rebuts à ajouter dans les fours pour obtenir la recette désirée sont déterminées par un logiciel d'optimisation. Ce dernier prend en considération la présence d'éléments chimiques dans le métal « pur » et la concentration du métal non utilisé lors de la coulée précédente.

2.2.1.3 Coulée des billettes

Le métal liquide est par la suite versé dans des moules pour produire des billettes aux dimensions variables. Selon le diamètre sélectionné, une table de coulée peut contenir entre 50 et 100 moules, la quantité de métal contenue dans les fours étant constante. La profondeur et les contraintes physiques du puits de coulée ne permettent que la production de billettes mesurant entre 5 et 7 mètres. Ces dernières sont coulées à la verticale au moyen d'une table à plancher mobile qui s'enfonce dans le sol (figure 2.3).

¹ Endroit où l'alumine est transformée en aluminium par le procédé d'électrolyse.

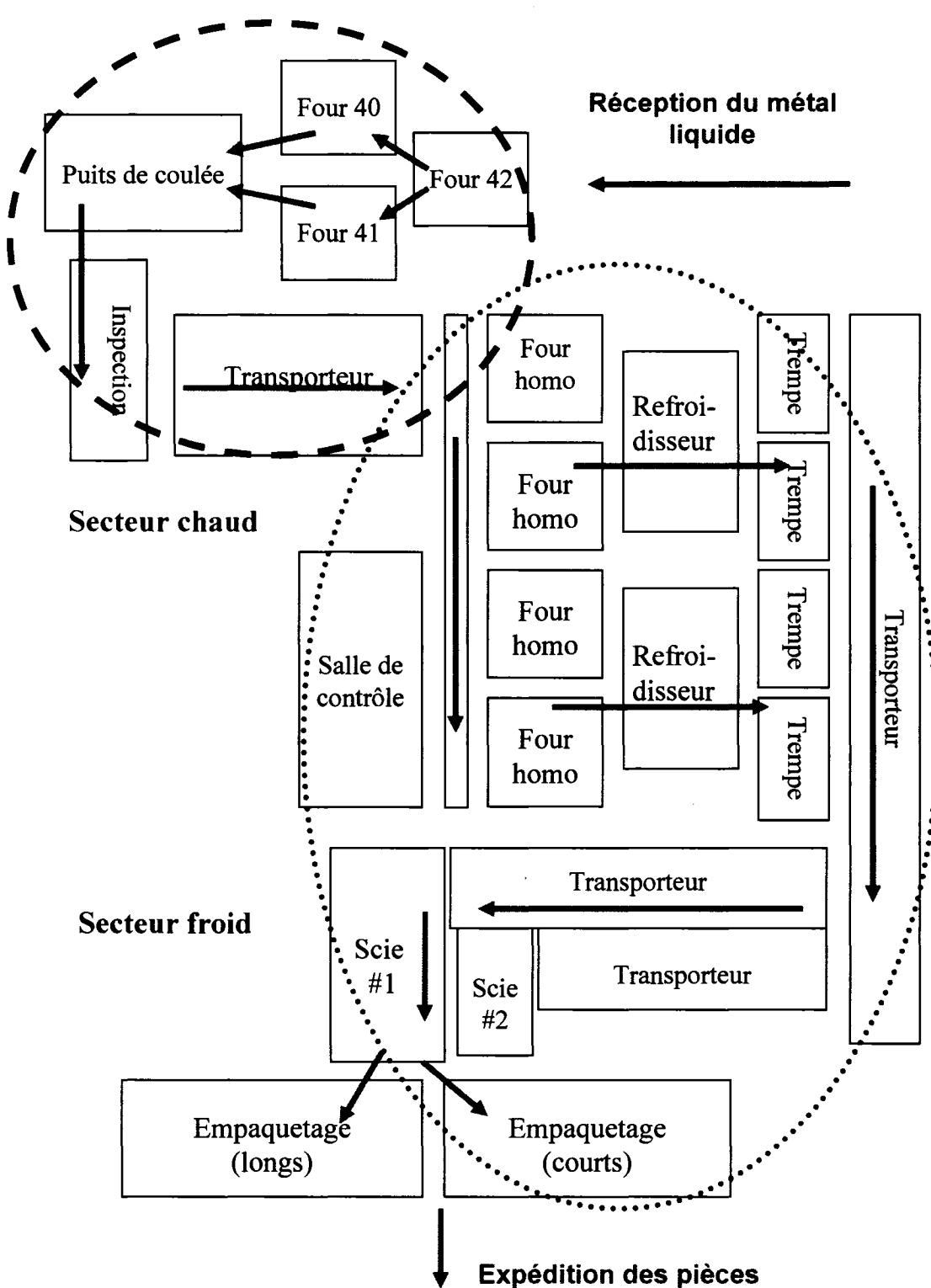


Figure 2.2 : Schéma des installations de production du CC5



Figure 2.3 : Puits de coulée des billettes (Alcan Inc., 2003)

La coulée des billettes est effectuée par l'inclinaison partielle des fours 40 et 41 et ce mouvement inachevé ne permet pas de déverser la totalité de leur contenu dans les moules. Cette quantité résiduelle, appelée le talon, est toutefois nécessaire puisqu'elle permet de conserver un flot de métal constant lors de la coulée et ainsi éviter l'apparition de défauts sur la surface des billettes.

Les principales contraintes affectant la production des billettes sont énumérées ci-après :

- Une fournée (i.e. le contenu du four 40 ou 41) contient habituellement deux coulées, la quantité de métal contenue dans les fours étant suffisante pour la production de produits de toutes dimensions.
- Chaque coulée est caractérisée par un alliage, un diamètre (déterminant ainsi un nombre fixe de billettes) et une longueur donnés. Il est impossible de produire une coulée partielle, c'est-à-dire une coulée ne contenant que quelques billettes.

- Un changement de diamètre entre deux coulées ou deux fournées implique la mise en place d'une nouvelle table de coulée (qui contient les moules d'un diamètre donné). Cette opération nécessite un arrêt de la production pour une période équivalente à la moitié du temps requis pour la coulée.
- La recette d'alliage peut changer entre la première et la seconde coulée d'une fournée mais certains enchaînements sont proscrits car il est difficile, voire impossible, de baisser la concentration de la première recette. Le temps requis pour la mise en alliage du deuxième type de produit dépend bien sûr du degré de similitude entre les deux recettes. Cependant, cette opération ne demande pas l'arrêt de la production puisqu'elle est réalisée lors de l'intercoulée (annexe C).
- D'une fournée à l'autre, le choix de l'alliage à produire sera influencé par la concentration du talon. Puisque le CC5 possède deux fours, la préparation d'une recette est effectuée lorsque l'autre équipement est utilisé pour la coulée. Il n'y a donc pratiquement aucune attente à ce niveau.

2.2.1.4 Inspection des billettes

Lorsque la mise en forme des billettes est achevée, ces dernières sont sorties du puits de coulée et déposées sur un transporteur automatique (figure 2.4). Elles sont par la suite inspectées une à une en deux étapes : tout d'abord par une vérification visuelle puis au moyen d'ultrasons afin de contrôler leur structure interne. Les billettes ne présentant aucun défaut apparent sont alors dirigées vers le secteur froid.

Note : Les activités de coulée et d'inspection des billettes ont été étudiées conjointement dans le cadre d'un projet spécial visant à augmenter la cadence de production de ce secteur. Les détails de ce mandat sont inclus en annexe C.

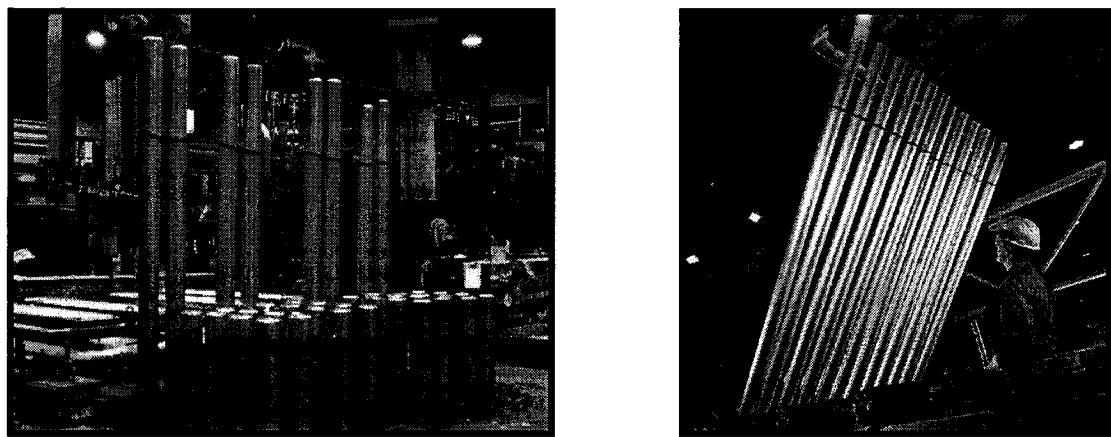


Figure 2.4 : Sortie des billettes pour l'inspection (Alcan Inc., 2003)

2.2.2 Secteur froid

La deuxième section des installations du CC5 est dédiée à traiter et à transformer le métal une fois solidifié. Les activités comprises dans le secteur froid sont le traitement thermique, la coupe, l'empaquetage et la distribution des produits.

2.2.2.1 Traitement thermique des billettes

À la sortie du secteur chaud, les billettes sont dirigées mécaniquement vers les fours d'homogénéisation afin de stabiliser leur microstructure. Ce procédé continu peut traiter plusieurs billettes à la fois mais l'espace disponible dans les fours est régit par le diamètre des produits. La température des billettes est ensuite abaissée par l'activité des refroidisseurs. Encore une fois, la grosseur des lots que peut accueillir l'équipement dépend du diamètre des billettes. Finalement, les produits subissent un à un une trempe à l'eau avant d'être dirigés vers le poste de sciage.

Note : Cette section de l'usine a également été l'objet d'une étude particulière qui est détaillée en annexe D. L'objectif du mandat consistait à établir un nouveau mode d'opération pour le traitement thermique de certains lots de billettes.

2.2.2.2 Coupe des billettes

La coupe des pièces demandées par les clients est effectuée en plusieurs étapes, décrites ci-dessous :

- Les lots de N billettes ayant un diamètre, un alliage et une longueur brute fixes sont acheminés mécaniquement au poste de coupe ; les billettes d'un lot sont sciées jusqu'à ce que la demande pour ces produits soit comblée. Si le nombre de billettes est insuffisant, la coulée suivante possédant les mêmes caractéristiques (i.e. diamètre et alliage) sera utilisée;
- L'extrémité de chaque billette brute (i.e. la tête) est d'abord retirée afin d'éviter les défauts ou les impuretés générées par la coulée. Par la suite, les billettes sont tranchées afin d'obtenir les longueurs désirées par les clients, puis le pied de la billette est mis de côté. En règle générale, les rejets dus à la coupe des extrémités d'une billette sont constants.
- Dans une même billette brute, il n'est possible de couper qu'une seule longueur de produit fini. La combinaison de différentes longueurs dans une même billette implique des ajustements continuels au niveau des scies et crée des problèmes à l'empaquetage (section 2.2.2.3).
- Afin de compléter une commande, les billettes d'un lot donné sont parfois utilisées pour obtenir des produits finis de différentes longueurs (mais ayant les mêmes diamètre et alliage). La dimension des pièces brutes de ce lot n'est cependant pas optimale pour toutes les pièces à produire et les sections non utilisées des billettes sont alors rejetées (voir section 4.1.2).

- Lorsque la complétion d'une commande ne nécessite pas l'utilisation de tous les produits du lot et que la commande suivante requiert des billettes aux caractéristiques différentes, la coupe se poursuit tout de même jusqu'à l'épuisement des billettes du premier lot. Les pièces sont alors sciées selon le plan de coupe initial ou selon les longueurs les plus populaires pour ce couple diamètre-alliage (une table de popularité est disponible à cet effet).

Puisque la scie utilisée n'est munie que d'une seule lame, il est nécessaire de faire avancer la billette sur le transporteur afin d'effectuer chaque coupe. Ce principe est illustré à la figure 2.5. La coupe des billettes ne peut être complètement automatisée puisque les employés doivent constamment réajuster les paramètres de coupe afin d'éviter certains défauts non détectés lors de l'inspection.

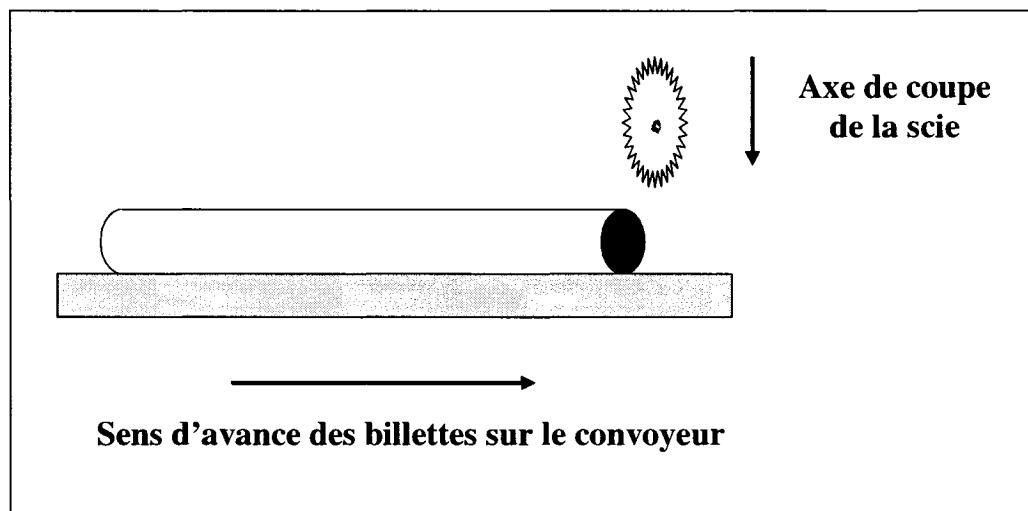


Figure 2.5 : Méthode de coupe d'une billette brute

Lorsque les produits demandés sont de petite taille, les employés utilisent deux scies simultanément (figure 2.2) pour effectuer la coupe. Ces équipements utilisent toutefois le même patron de coupe afin de faciliter l'aiguillage et l'emballage des produits. Une

contrainte mécanique empêche les employés d'agir de la sorte lors de la coupe de produits plus longs.

Note : L'informatisation du poste de sciage, expliqué en annexe E, a été étudié dans le cadre d'un mandat spécial. Ce projet visait à identifier les taux de rejet de même que la nature des pertes entre les secteurs chaud et froid.

2.2.2.3 Empaquetage, entreposage et distribution

Les billettes sont finalement empaquetées et entreposées pour une courte période avant d'être distribuées aux clients. Il est à noter que les paquets sont constitués uniquement de pièces de même longueur, dû à une contrainte physique des équipements d'empaquetage. De plus, la combinaison de longueurs différentes dans un même paquet complique le chargement et déstabilise le lot. Lorsqu'il est impossible de compléter un paquet, ce dernier est tout simplement mis de côté et refondu.

Les produits supplémentaires générés par la coulée sont déposés dans la zone d'entreposage à court terme afin de répondre à une demande éventuelle. Par contre, dû à la taille réduite de l'entrepôt, un surplus de production se traduit généralement par une perte d'opportunité de vente et une nécessité de refonte, engendrant des coûts supplémentaires d'opération. En effet, après une période de 90 jours, les paquets non vendus sont refondus pour permettre de libérer l'espace d'entreposage. Il est à noter qu'une partie des surplus de production peut tout de même être envoyée aux clients puisque ces derniers se sont engagés à accepter une quantité livrée respectant un jeu de -10% à $+10\%$ par rapport à la commande initiale.

2.2.3 Principaux produits

Le CC5 offre une panoplie de produits différents à ses clients. En effet, ces derniers peuvent choisir parmi un éventail de 5 diamètres, 36 alliages et un nombre presque infini de longueurs. Plus particulièrement, les produits « courts » mesurent entre 500 et 1200 mm alors que les produits « longs » présentent une dimension comprise entre 4690 et 6690 mm. Le CC5 n'offre pas de produit « moyens » car les contraintes physiques du système de manutention compliquent le transport de telles billettes. Les diverses caractéristiques que peuvent présenter les pièces permettent donc d'offrir aux clients plus de 18 000 types de produits (en supposant 100 longueurs de pièces).

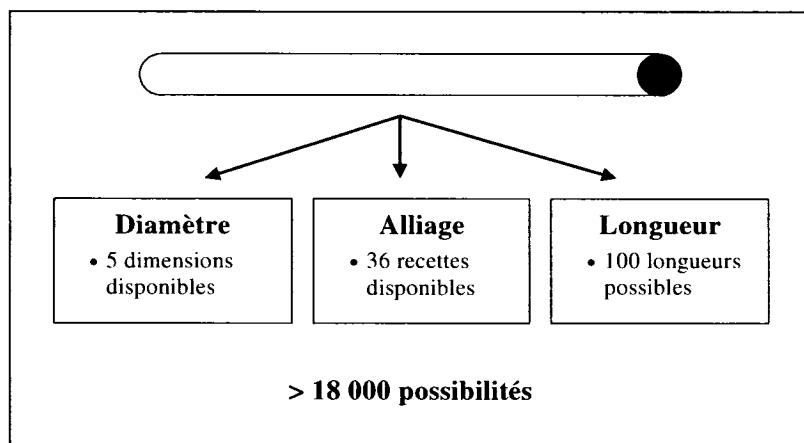


Figure 2.6 : Caractéristiques des produits du CC5

2.2.4 Méthodologie de planification et d'ordonnancement

Les stratégies de planification et d'ordonnancement adoptées actuellement au CC5 sont décrites dans la section suivante. Ces activités sont en partie réalisées à l'aide du logiciel d'optimisation de l'entreprise dont la logique est résumée à la section 4.1.

2.2.4.1 Réception des commandes des clients

Les demandes des clients sont variables et souvent pressantes, de sorte que l'horizon de planification est relativement court. Ce phénomène oblige le planificateur à construire

un horaire souple et à revoir périodiquement sa pertinence. En plus de la date désirée de réception des produits, les « commandes-clients » contiennent les renseignements suivants :

- la quantité de produits demandés (exprimée en tonnes ou en nombre de pièces);
- le ou les alliage(s) désiré(s);
- le ou les diamètre(s) demandé(s);
- la ou les longueur(s) correspondante(s).

2.2.4.2 Planification de la production

La planification de la production au CC5 est réalisée en trois étapes distinctes, impliquant à la fois l'intervention du planificateur et du logiciel d'optimisation.

Étape 1 : Couplage diamètre-alliage

La première activité de la planification consiste à trier les commandes reçues durant la semaine selon les types de produits demandés (i.e regroupement diamètre-alliage). Lors de la formation de ces couples, il arrive fréquemment que certaines commandes soient divisées et combinées à celles d'autres clients. Ce démembrément n'est réalisé que pour faciliter la planification de la production et les « commandes-clients » seront à nouveau réunies une fois l'empaquetage complété.

Étape 2 : Tri des couples diamètre-alliage

Pour chaque combinaison diamètre-alliage, le planificateur classe en ordre croissant les longueurs demandées par les clients. Il est à noter que cette méthode est employée depuis fort longtemps sans raison particulière.

Étape 3 : Utilisation du logiciel d'optimisation

Les couples diamètre-alliage triés à l'étape précédente sont entrés dans le logiciel qui les reconnaît en tant que « commandes-usines ». L'application se charge alors de déterminer la longueur des billettes brutes correspondant aux longueurs des pièces demandées, de même que les plans de coupe qui y sont associés. Le logiciel sépare également la production en un nombre donné de fournées et de coulées. Généralement, la production d'un couple diamètre-alliage est réalisée en une coulée, voire en une fournée, voire en une suite de fournées consécutives. En tout état de cause, le volume correspondant doit être compatible avec un multiple de coulées (il est impossible de couler de plus petites quantités).

2.2.4.3 Ordonnancement de la production

Le planificateur utilise la liste des coulées générée par le logiciel d'optimisation pour établir l'ordre de production des « commandes-usines » au moyen des deux fours. L'objectif de l'ordonnancement est de déterminer une séquence d'opérations qui minimise les coûts de mise en course et rencontre les dates de livraison promises. Les contraintes auxquelles il doit se soumettre lors de cette activité sont énumérées ci-dessous par ordre d'importance :

- respecter la date de livraison la plus tôt (*earliest due date*). Lorsqu'une « commande-usine » regroupe plusieurs « commandes-clients » le planificateur utilise la date de livraison la plus rapprochée;
- minimiser le nombre de changements de table de coulée (supportant les moules d'un diamètre donné);
- respecter la compatibilité des alliages adjacents (il est plus laborieux de changer la table entre deux coulées consécutives que de modifier la recette dans le four).

Afin d'identifier la compatibilité des différents alliages entre eux, le planificateur utilise une table de référence dont les calculs sont basés sur l'équation suivante :

$$\sum_i ([X_{iA}]_{MAX} * M_A) + \sum_i ([X_{iP}]_{MAX} * M_P) \leq \sum_i ([X_{iB}]_{MIN} * M_B)$$

où $[X_{iZ}]_{MAX / MIN}$ fait référence à la concentration maximale/minimale de l'ingrédient i du métal Z (% massique) et M_Z à la masse du métal Z présent dans le four au moment du changement d'alliage. Les lettres A, B et P représentent respectivement le talon de l'alliage présent dans le four, l'alliage désiré et l'aluminium « pur » ajouté. Il est à noter que la concentration de l'aluminium n'est prise en considération que lors de la mise en alliage pour deux fournées consécutives dans le même four. Dans le cas d'un changement de recette entre deux coulées d'une même fournée, il n'est possible que d'ajouter des ingrédients d'alliage dans le four.

2.3 Problématiques rencontrées

Les conditions de production actuelles de la fonderie d'aluminium sont alourdis par deux problématiques rencontrées fréquemment en milieu industriel, soit le problème d'ordonnancement et le problème de découpe. Les principaux facteurs à l'origine de ces complications sont explicités ci-après.

2.3.1 Problème d'ordonnancement

La complexité du problème d'ordonnancement du CC5 réside à la fois dans la nature même du procédé de coulée et dans la politique de gestion des commandes des clients. En effet, les contraintes reliées aux équipements de production imposent la fabrication de lots composés de N produits d'un diamètre, d'un alliage et d'une longueur donnés.

À une certaine époque, les coulées produites au CC5 étaient vendues intégralement aux clients. Puisque les départements de production et des ventes travaillaient à partir de la même unité de mesure (i.e. des coulées), les seuls rebuts générés étaient les inévitables pertes de coupe. En effet, le système utilisé pour la planification de la production est basé sur la vente de coulées complètes et ne génère pas de pertes lorsque les commandes pour une combinaison diamètre-alliage-longueur représentent un multiple de ces lots (section 4.1.2). L'ordonnancement de la production des coulées requises était alors une opération relativement aisée à effectuer.

Le problème d'ordonnancement du CC5 a cependant évolué. Les équipements de production et le système d'optimisation sont demeurés les mêmes mais les commandes des clients ont changé. Ces dernières représentent maintenant des fractions de lots et sont réparties sur un plus grand nombre de coulées. Dû à l'évolution du marché, l'unité de vente n'est plus équivalente à l'unité de production et les méthodes de planification et d'ordonnancement sont complexes. En effet,

- Les clients peuvent commander uniquement des produits courts, uniquement des produits longs ou encore un mélange des deux et ce, dans différents diamètres et alliages.
- Peu importe les produits demandés, les clients commandent généralement plus d'une longueur de produits finis de chaque type.
- Les quantités demandées sont hautement variables et il n'y a aucune limite quant au tonnage minimum requis pour une combinaison diamètre-alliage-longueur. La seule exception à cette règle survient lorsque l'alliage demandé est peu populaire ou nécessite une préparation particulière. Le client doit alors acheter la fournée au complet, c'est-à-dire les deux coulées.

Conséquemment, il est difficile avec les moyens actuels de produire des combinaisons de billettes répondant parfaitement à la demande des clients sans générer de pertes excessives puis de réaliser l'ordonnancement de ces coulées afin de respecter les dates de livraison et minimiser les temps de mise en course.

2.3.2 Problème de découpe

La seconde difficulté reliée à la production des billettes découle directement des contraintes opératoires particulières du poste de découpe (section 2.2.2.2), notamment l'obligation de ne couper qu'une seule longueur de pièce par billette. Lorsque les commandes des clients représentent des multiples de coulées pour des pièces d'une même longueur, aucun rebut n'est engendré puisque le système d'optimisation génère des billettes aux longueurs optimales (section 4.1.1). Cependant, l'évolution du marché a conduit à des combinaisons non optimales entre les longueurs des pièces demandées et la dimension des N billettes brutes produites dans une même coulée. Cela se traduit par la perte d'une quantité appréciable de métal, appelée longueurs multiples. Ce phénomène semble relié à l'utilisation d'un système de planification qui ne tient pas compte des contraintes des diverses opérations de production de l'atelier. Il est donc laborieux pour la fonderie de satisfaire les demandes des clients tout en conservant un niveau de rebut acceptable.

2.4 Intégration des deux problématiques

Le traitement indépendant des diverses opérations de la fonderie d'aluminium n'est intéressant que si l'espace de décision est important à chaque poste de travail, ce qui n'est pas le cas. En effet, la performance du poste de découpe, c'est-à-dire sa capacité à transformer les billettes en produits finis sans engendrer de pertes importantes, dépend entièrement de la nature des lots produits au puits de coulée.

Le mode de fonctionnement actuel du CC5 induit également des inventaires très importants, compte tenu de l'espace d'entreposage disponible, et des temps de cycle très longs vis-à-vis le marché. Puisque la production est effectuée en continue et qu'il n'y a pas d'entreposage intermédiaire ni de permutation de séquence d'arrivée des billettes entre deux postes de travail (équipement de manutention non approprié et caractéristiques physiques imposantes des billettes), l'ordre de production est un élément clé pour la minimisation des pertes et la réduction des délais de livraison.

L'interdépendance des opérations de mise en four, de coulée et de coupe des produits oblige donc l'ordonnancement de ces activités de façon intégrée afin d'assurer l'efficacité globale du système. En effet, tel que résumé par Jacobs et ses collaborateurs (1988), l'efficacité des procédés individuels d'un établissement manufacturier dépend à la fois des facteurs de production internes et des interactions entre les procédés adjacents. La contribution d'une opération optimale à la performance globale de l'usine est perdue si les procédés adjacents sont moins efficaces.

2.5 Objectifs visés par ce travail de recherche

L'objectif premier de cette recherche est d'étudier l'impact des grosseurs des lots produits en fonction de l'évolution des demandes des clients et des algorithmes de découpe et d'ordonnancement adoptés actuellement par l'entreprise. Il s'agit en réalité de déterminer à quel moment le système de production actuel ne rencontre plus les contraintes du département des ventes et à ce moment, identifier un moyen d'améliorer le système afin de faciliter l'interaction entre ces deux services. Plus précisément, cette étude est effectuée sous les aspects suivants :

- Déterminer les règles de planification et d'ordonnancement utilisées par le planificateur ainsi que par le logiciel d'optimisation.
- Évaluer la pertinence de ces règles en fonction de la demande actuelle et identifier les conditions d'utilisation optimales du système.

- Évaluer la possibilité d'ajouter d'autres règles simples à celles utilisées par le planificateur et/ou par le logiciel afin d'améliorer significativement la situation. Si l'ajout de règles supplémentaires s'avère impossible ou laborieux, modifier en profondeur les règles de planification et d'ordonnancement existantes.
- Valider la pertinence des stratégies en comparant les résultats des deux méthodes.

CHAPITRE 3

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

La problématique énoncée dans le chapitre précédent comporte plusieurs aspects : la planification de la production, l'ordonnancement contraint par des temps de réglage, le problème de découpe ainsi que l'ordonnancement de la coupe et des expéditions.

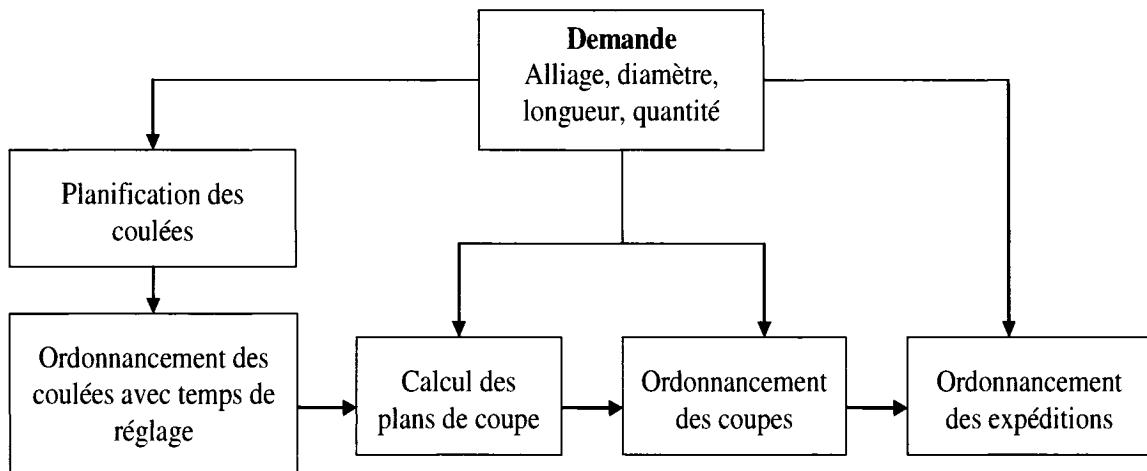


Figure 3.1 : Chaîne de décision de la problématique actuelle

Afin de résoudre la problématique dans son ensemble, il est nécessaire d'élaborer une solution hiérarchisée à plusieurs niveaux afin de réaliser successivement la planification et l'ordonnancement de la production de billettes d'aluminium. Les objectifs de chacun des niveaux visent respectivement à :

1. Déterminer le nombre de coulées nécessaires pour satisfaire la demande des clients d'une période donnée sans l'excéder inutilement.
2. Selon les pièces demandées par les clients, déterminer les plans de coupe associés à chacune des coulées afin de réduire les pertes.

3. Établir l'ordonnancement de ces coulées dans l'horizon de planification afin de rencontrer deux objectifs :

- a. Minimiser la quantité de produits vendus mais non expédiés tout en respectant les dates de livraison, c'est-à-dire compléter la production de la commande d'un client le plus rapidement possible pour éviter de l'entreposer trop longtemps (espace restreint). En effet, les coulées produites peuvent être destinées à satisfaire la demande de plusieurs clients, donc présenter plusieurs dates butoirs, et il est nécessaire d'attribuer les pièces de chacune des coulées à la bonne commande.
 - b. Minimiser les changements de diamètre et d'alliage, ces opérations étant sources de pertes de temps et d'argent. Les changements de diamètre doivent être minimisés en priorité car ils demandent l'arrêt de la production pour une période substantielle alors que les changements d'alliage sont considérés comme une contrainte secondaire (section 2.2.1.3).
4. Finalement, être en mesure de modifier rapidement la planification ou l'ordonnancement de la production dû aux demandes variantes et pressantes du marché.

Cette revue de littérature vise donc à documenter les différents concepts de la chaîne de décision d'abord d'un point de vue théorique, puis en présentant diverses méthodes de solution développées pour des cas réels. Les travaux comparables et susceptibles d'éclairer la résolution de la problématique combinée sont trouvés dans l'ordonnancement de fonderies, d'ateliers monogammes ou dans l'ordonnancement intégré (utilisation de l'ordonnancement comme outil d'intégration entre fonctions).

3.1 Problème d'ordonnancement

Le problème d'ordonnancement est un processus de décision qui traite de l'allocation de ressources dans le temps afin d'exécuter un ensemble de tâches visant à satisfaire un ou plusieurs objectifs (Pinedo, 2002).

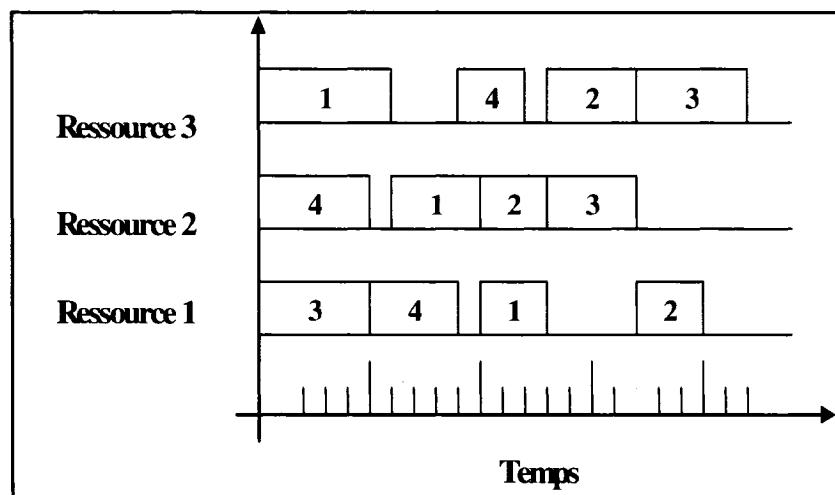


Figure 3.2 : Ordonnancement des tâches sur un diagramme de Gantt (Baker, 1974)

Bien que cette problématique soit retrouvée fréquemment dans les contextes manufacturiers, les ressources et les tâches qui la caractérisent peuvent prendre plusieurs formes. En effet, elles peuvent représenter des patients et des équipements d'hôpitaux, des classes et des professeurs, des repas et des cuisiniers, des avions et des pistes d'atterrissage... (Rinnooy Kan, 1976). Cependant, peu importe les caractéristiques des tâches à effectuer, ces dernières présentent inévitablement les éléments suivants (tableau 3.1):

Tableau 3.1 : Paramètres associés à la tâche j (Lawler et al, 1993 et Pinedo, 2002)

Symbol	Titre	Description
p_{ij}	Temps d'exécution de la tâche j sur la machine i <i>(processing time)</i>	Comprend généralement les temps de réglage (indépendants de la séquence).
r_j	Date de disponibilité <i>(release date)</i>	Date au plus tôt à laquelle la tâche j peut débuter.
d_j	Date de livraison <i>(due date)</i>	Date au plus tard à laquelle la tâche doit être terminée. Le non respect de cette date entraîne une pénalité.

Pinedo (2002) soutient qu'il existe deux catégories de problèmes d'ordonnancement: les modèles déterministes et les stochastiques. La principale différence entre ces derniers réside dans la précision des paramètres associés aux tâches. En effet, les processus stochastiques impliquent un grand nombre d'incertitudes puisque ces paramètres ne sont pas connus précisément à l'avance (seule leur dispersion l'est). Les modèles déterministes présentent quant à eux des tâches aux caractéristiques fixes.

3.1.1 Trois processus de décision fréquemment confondus

La littérature scientifique distingue communément les activités de planification, d'ordonnancement et d'élaboration d'horaires de production (*planning, scheduling sequencing*) sans toutefois définir de façon claire et précise ces trois termes (Stoop et Wiers, 1996). Ces concepts techniques, expliqués ci-dessous, sont des processus interdépendants et doivent donc être exécutés conjointement.

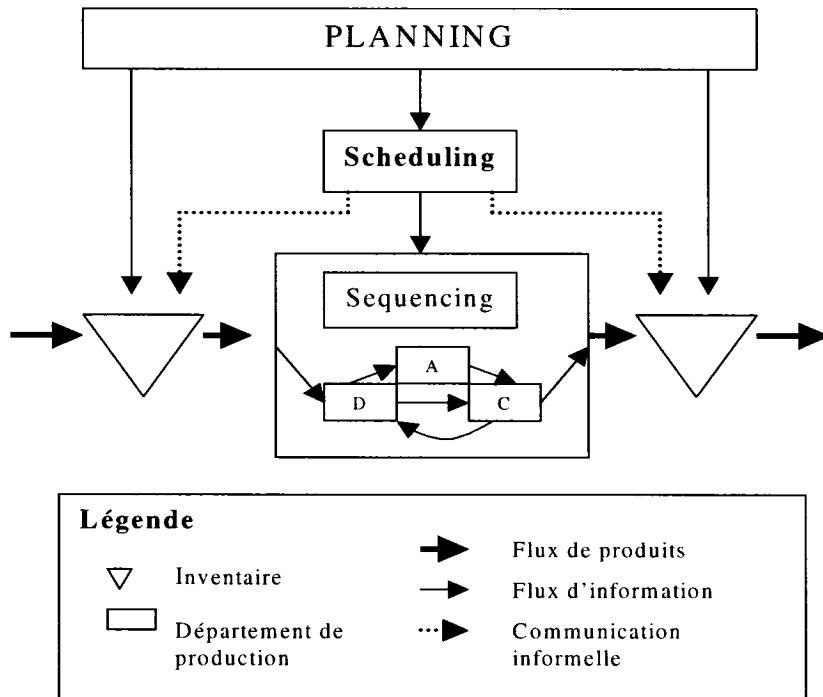


Figure 3.3 : Trois processus de décision (Stoop et Wiers, 1996)

La planification de la production (1^{re} activité de la chaîne de décision, figure 3.1) consiste à déterminer les tâches à réaliser durant un intervalle de temps appelé horizon de planification. Cette activité utilise la demande connue ou anticipée pour les produits et fixe les niveaux d'inventaire de même que les ressources humaines et matérielles nécessaires à cette production de biens (Thomas et McClain, 1993). Ces besoins sont alors transmis à un niveau de contrôle inférieur, soit l'ordonnancement.

L'ordonnancement de la production représente l'allocation ordonnée des opérations aux différentes machines afin de réaliser la gamme opératoire des tâches définies précédemment (Rinnooy Kan, 1976). L'ordonnancement impose un ordre aux tâches en utilisant des unités de temps plus courtes et doit suivre le plan de production le plus fidèlement possible (Thomas et McClain, 1993). L'ordonnancement est fréquemment limité par différentes règles de priorités ou par des temps de mise en course (figure 3.1).

L’élaboration d’horaires de production est une activité plus détaillée que les précédentes car elle spécifie les temps exacts de début et de fin de chacune des opérations d’une tâche sur une machine. Il est à noter qu’un nombre infini d’horaires peut correspondre à chacune des séquences d’ordonnancement établies (Rinnooy Kan, 1976).

3.1.2 Classification des problèmes d’ordonnancement

Plus que tout autre domaine de la recherche opérationnelle, l’ordonnancement de la production est caractérisé par un nombre important de problèmes. La notation de ces modèles est donc d’une grande utilité lorsque revient le temps de s’y référer (Lawler et al., 1993). Une des premières classifications de ce type de problèmes est apparue dans le livre de Conway, Maxwell et Miller (1967) : *Theory of Scheduling*. Cette classification a été modifiée et raffinée plus d’une fois et la structure présentée dans cette section est celle de Michael Pinedo (2002). Ce dernier définit un problème d’ordonnancement par le triplet $(\alpha \mid \beta \mid \gamma)$, dont les symboles sont expliqués ci-dessous.

3.1.2.1 Environnement-machine (α)

Le champ α décrit l’environnement dans lequel évolue la production et ne peut représenter qu’une entrée unique. Il fait référence à l’équipement disponible (i.e. nombre de machines), à leurs caractéristiques et au flux de production entre ces dernières. Les valeurs possibles pour ce paramètre sont présentées au tableau 3.2.

3.1.2.2 Restrictions et contraintes de production (β)

Le symbole β décrit les éléments qui limitent la façon d’effectuer les opérations. Il représente les contraintes reliées à la production et peut contenir des entrées multiples ou vides. Les restrictions généralement acceptées sont énumérées au tableau 3.3.

Tableau 3.2 : Valeurs possibles du paramètre α (Pinedo, 2002)

Symbol	Titre	Description
I	Machine unique	
P_m	Machines identiques en parallèle	
R_m	Machines différentes en parallèle	
F_m	Atelier monogamme (<i>flow shop</i>)	Parcours séquentiel commun à toutes les tâches (machines en série).
J_m	Atelier multigamme (<i>job shop</i>)	Route prédéterminée et différente pour chacune des tâches.
O_m	Atelier ouvert (<i>open shop</i>)	Parcours non prédéterminé, les routes des tâches peuvent être différentes.

Tableau 3.3 : Valeurs possibles du paramètre β (Pinedo, 2002)

Symbol	Titre	Description
s_{jk}	Temps de mise en course dépendants de la séquence des opérations	
Prec	Relations de précédence entre les tâches	
M_j	Restrictions de machines	Ensemble des machines pouvant réaliser la tâche (environnement P_m).
Block	Embouteillage	La tâche complétée doit demeurer sur la machine pour l'empêcher de débuter une autre tâche (environnement F_m).
Nwt	Sans attente	Attendre non autorisée pour les tâches entre deux machines consécutives (environnement F_m).
Recrc	Recirculation	Une tâche peut visiter une machine ou un groupe de machines plus d'une fois (environnement J_m ou FJ_c).

3.1.2.3 Objectif à minimiser (γ)

Finalement, le paramètre γ détermine l'objectif à être minimisé et contient habituellement une seule entrée. Les objectifs sont établis en fonction des temps de complétion des tâches ou des dates de livraison et peuvent prendre les valeurs suivantes :

Tableau 3.4 : Valeurs possibles du paramètre γ (Lawler et al, 1993 et Pinedo, 2002)

Symbol	Titre	Description
C_{max}	Temps total de production (<i>makespan</i>)	Temps de complétion de la dernière tâche qui quitte l'atelier ($C_j = r_j + \sum p_{ij} + \text{temps d'attente divers}$)
F_{max}	Temps maximum passé dans l'atelier	$F_j = C_j - r_j$
L_{max}	Temps de décalage maximal (<i>maximum lateness</i>)	Mesure la pire violation des dates de livraison, $L_j = C_j - d_j$
T_{max}	Retard maximum	$T_j = \max(L_j, 0)$, ne peut jamais être négatif contrairement à L_j
U_{max}	Nombre maximum de tâches en retard	$U_j = 1$ si $C_j > d_j$ ou = 0 sinon

Il est évidemment possible pour le planificateur d'employer des objectifs totalement différents de ceux présentés ci-dessus. Par exemple, les fonctions peuvent tenir compte des coûts de stockage et de pénurie, elles peuvent favoriser la complétion de certaines tâches particulières en utilisant un paramètre de poids (w_j) ou encore minimiser les valeurs moyennes de ces objectifs. Les problèmes d'ordonnancement peuvent également satisfaire des objectifs multiples.

3.1.3 Problème d'ordonnancement dans la littérature

Depuis le début des années 1950, le problème d'ordonnancement a été le sujet d'une recherche exhaustive et un nombre impressionnant de travaux ont été réalisés à ce sujet, particulièrement dans le domaine déterministe (Lawler et al., 1993). Le tableau suivant présente quelques unes de ces recherches, réalisées dans des environnements similaires à celui de l'entreprise étudiée.

Tableau 3.5 : Problème d'ordonnancement dans la littérature

Auteur (s)	Année	Type de problème	Méthode (s) de solution
Bowers et al.	1995	$P_m / \text{inventaire}$ (aluminerie)	Méthode heuristique et programmation linéaire
De et al.	1990	$I/même d_i / C_i - d_i $	Programmation dynamique
Dos Santos-Meza et al.	2002	$P_m / \text{coûts production}$ (fonderie)	Programmation linéaire
França et al	1996	$P_m / s_{jk} / C_{\max}$	Recherche tabou
Gravel et al	2000	$P_m / s_{jk} / L_{\max}$ (aluminerie)	Algorithmes génétiques
Lee et Pinedo	1997	$P_m / (w_j * T_{\max})$	Règle de priorité et méthode du recuit simulé
Leong et Olliff	1990	$P_m / s_{jk} / \text{coûts mise en course}$ (production en lot)	Méthode heuristique séquentielle
Nicholls	1994	$P_m // \text{max quantité métal}$ (aluminerie)	Programmation linéaire
Ogbu et Smith	1990	$F_m / / C_{\max}$	Méthode du recuit simulé
Pan	2003	$I / (w_j * C_{\max})$	Méthode de séparation et d'évaluation progressive

3.2 Problème de découpe

Le problème de découpe (*cutting stock, trim-loss ou assortment problem*) est rencontré dans plusieurs usines manufacturières, mais plus particulièrement dans les industries du papier, du bois, du métal, du verre, du plastique et du textile (Pierce, 1964). Tel que résumé par Cheng et al. (1994), cette problématique vise à établir la méthode optimale de coupe des pièces désirées dans le matériel brut disponible tout en générant le moins de pertes possibles. La figure suivante illustre bien ce phénomène.

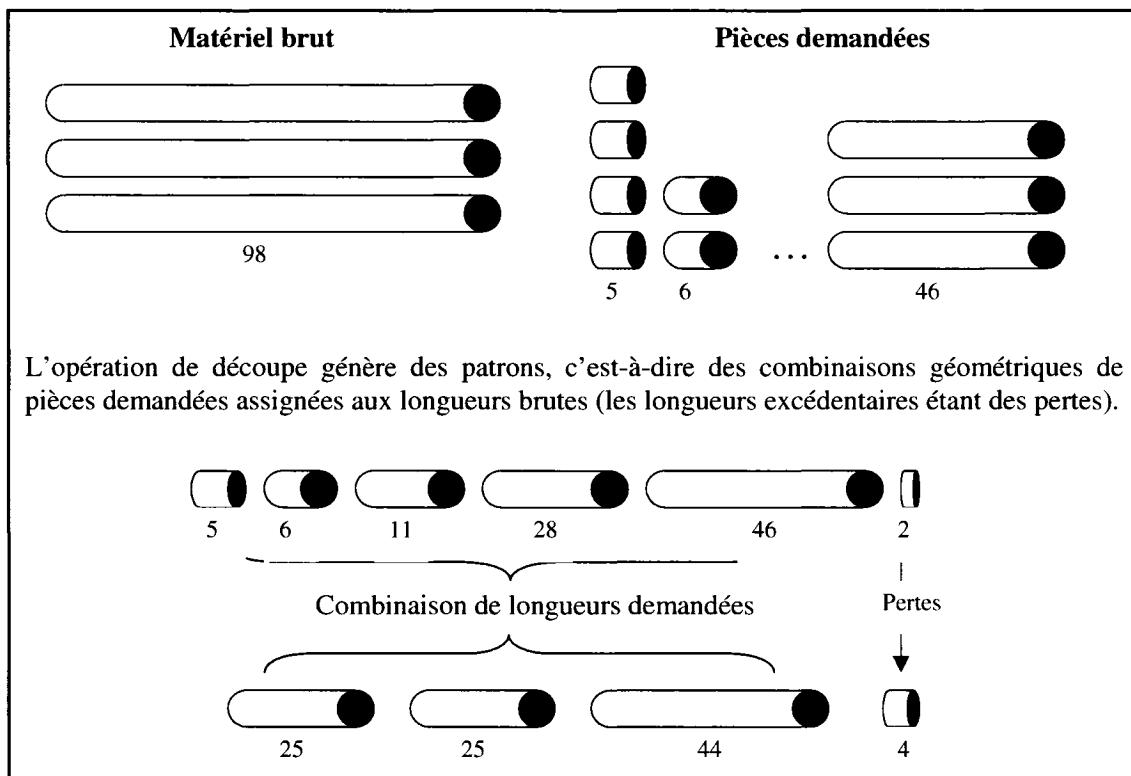


Figure 3.4: Illustration du problème de découpe (Dyckhoff, 1990)

D'un point de vue mathématique, le problème de découpe est généralement formulé de la façon suivante (Hinxman, 1980):

$$\begin{aligned} \text{Min } & \sum_j C_j X_j \\ \text{sujet à } & \sum_j A_{ij} X_j \geq N_i \\ & X_j \geq 0, \text{ entier} \end{aligned}$$

où X_j représente le nombre de fois que le patron de coupe j est utilisé, C_j les coûts associés à l'utilisation du patron j , A_{ij} le nombre de pièces de longueur l_i coupées selon le patron j et N_i la demande pour les produits de longueur i .

Dans la majorité des cas, les pièces résultant de la coupe sont les produits finis des opérations de production (figure 3.1). Cependant, ces dernières peuvent constituer les intrants d'une opération subséquente, par exemple dans le cas de pièces de tissu utilisées pour la confection de vêtements. Les pièces résiduelles, quant à elles, peuvent présenter un potentiel de revente intéressant mais impliquant des dépenses supplémentaires, telles que les coûts d'entreposage ou de transformation subséquente. Ces pièces sont donc habituellement traitées comme des pertes ou utilisées sous la forme de produits à valeur beaucoup moindre que le produit original (Metzger, 1958 et Kantorovich, 1960).

3.2.1 Plusieurs appellations pour un même problème

Les problèmes de découpe sont classés dans le domaine des combinaisons géométriques, dû au rôle prédominant joué par les patrons de coupe dans leur résolution. La structure de cette catégorie, telle que décrite par Dyckhoff (1990), est illustrée à la figure suivante.

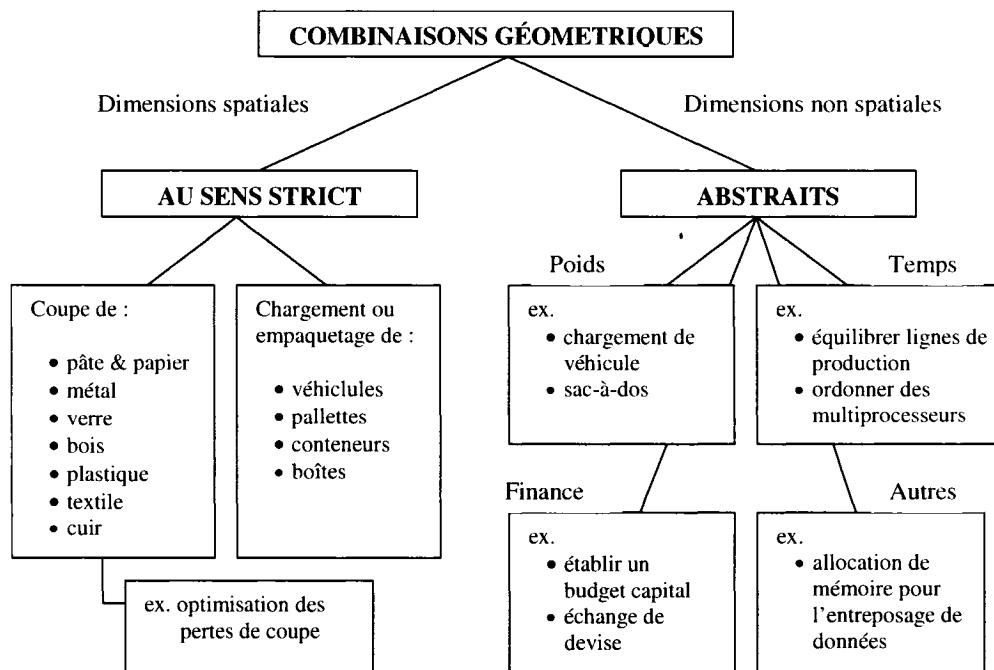


Figure 3.5: Catégorisation des problèmes de découpe (Dyckhoff, 1990)

Cette classification englobe plusieurs types de problèmes qui sont étroitement reliés les uns aux autres. En effet, comme le souligne Golden (1976), les problèmes de découpe sont apparentés aux problèmes de chargement (*loading problems*), aux problèmes d'empaquetage (*packing problems*) et aux problèmes de sac à dos (*knapsack problems*). Ces derniers proposent tous une division des ressources en sections de plus faible grandeur de façon à minimiser le volume ou la quantité de ressources requises (Sweeney et Paternoster, 1991). La dualité du matériel et de l'espace est ici mise en évidence : empaqueter de petits objets dans de plus grands peut être considéré comme le fait de couper l'espace vide des grands objets en sections d'espaces vides qui sont occupées par les petits objets, les espaces restants étant considérés comme des pertes (Dyckhoff, 1990).

3.2.2 Classification des problèmes

La grande variété de problèmes de découpe présents dans la littérature a incité Dyckhoff (1990) à élaborer une méthode de classification afin d'identifier les propriétés communes de problèmes qui, à première vue, semblent non reliés. Inversement, les différences entre des problèmes apparemment semblables deviennent évidentes suite à l'analyse de leurs principales caractéristiques. Il est à noter que cette classification s'applique aussi aux problèmes d'empaquetage, de chargement et de sac à dos puisque leur structure de base est similaire. Dyckhoff différencie ces problèmes selon quatre caractéristiques, représentées par les symboles (α | β | γ | δ).

3.2.2.1 Dimension (α)

La dimension des problèmes étudiés est sans doute la caractéristique la plus importante pour leur classification. Les valeurs que peut prendre le symbole α pour ce paramètre sont les suivantes :

- (1) Problème à une dimension
- (2) Problème à deux dimensions
- (3) Problème à trois dimensions
- (N) Problème à N dimensions, $N > 3$.

Puisque les problèmes de découpe concernent la division du matériel, les objets utilisés sont fondamentalement tridimensionnels. Cependant, dans bien des cas, seulement certaines dimensions des objets sont pertinentes à la détermination de la solution. Un exemple typique est retrouvé lorsque du matériel plat (feuilles de métal, de vitre ou de textile) doit être divisé en produits de dimensions carrées plus petites mais de la même épaisseur que le matériel original. Il y a une dimension qui est fixe et qui n'affecte pas la solution du problème (Dyckhoff et al, 1985). La figure 3.6 résume la différenciation des problèmes de découpe au niveau de leur dimension.

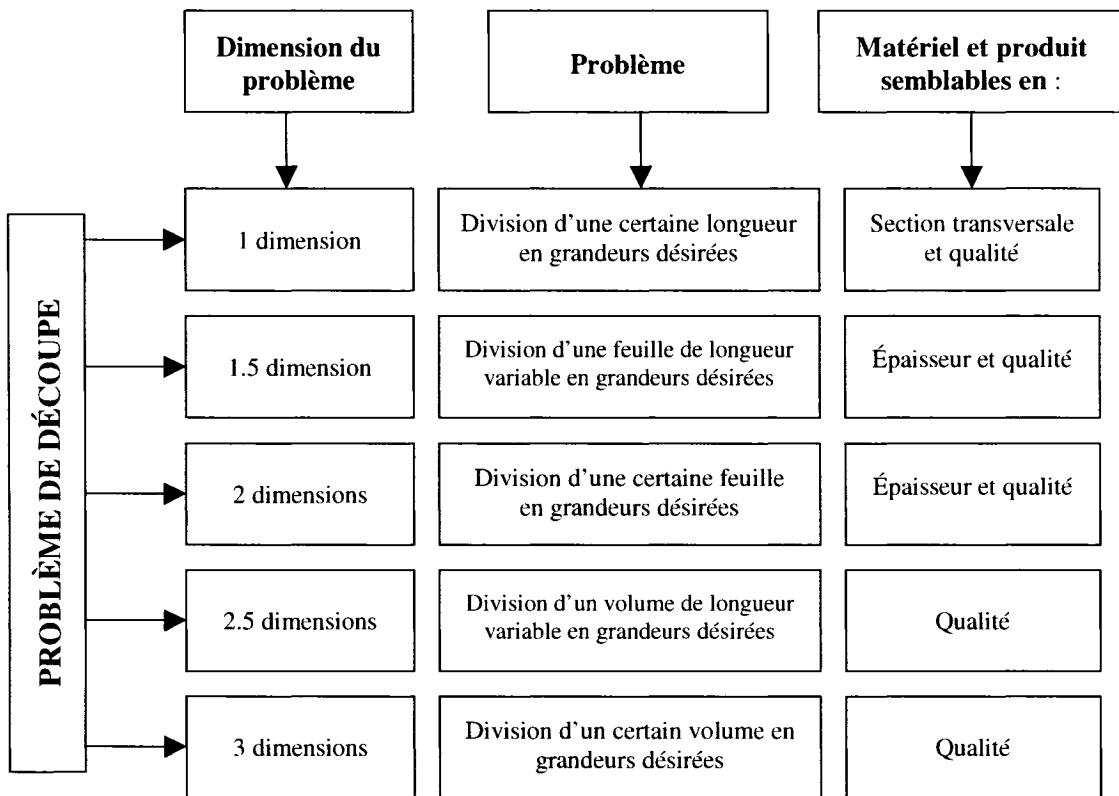


Figure 3.6 : Dimensions des problèmes de découpe (Dyckhoff et al., 1985)

3.2.2.2 Autres paramètres

Les valeurs possibles des symboles β , γ et δ , représentant le type de tâche à effectuer ainsi que les caractéristiques des gros et des petits objets, sont les suivantes :

1. Type de tâche à effectuer (β)
 - (B) Utiliser tous les gros objets et une sélection de pièces à fabriquer
 - (V) Utiliser une sélection de gros objets et toutes les pièces à fabriquer.

2. Caractéristiques des gros objets (γ)
 - (O) Un gros objet
 - (I) Plusieurs gros objets de forme identique
 - (D) Plusieurs gros objets de formes variées.

3. Caractéristiques des petits objets (δ)

- (F) Peu de pièces à fabriquer (de formes différentes)
- (M) Plusieurs pièces de formes variées
- (R) Plusieurs pièces ayant peu de formes variées (non congrues)
- (C) Pièces congrues.

3.2.3 Problème de découpe dans la littérature

Sweenay et Paternoster (1991), qui ont publié la bibliographie la plus vaste au sujet du problème de découpe depuis celle de Dyckhoff et al.(1985), ont dénoté une explosion d'intérêt dans le domaine depuis les années 1960. Ils ont en effet identifié plus de 500 articles traitant des problèmes de découpe et de leurs dérivées. Le tableau 3.6 présente quelques unes de ces recherches, réalisées dans des environnements similaires au CC5.

Tableau 3.6 : Problème de découpe dans la littérature

Auteur (s)	Année	Type de problème	Méthode (s) de solution
Alvarez et al.	2002	2/B/O/C	Recherche Tabou
Dowsland	1993	2/B/O/C	Recuit simulé
Goulimis	1990	1/V/I/M	Méthode de séparation et d'évaluation progressive
Harjunkoski et al.	1996	1/V/I/M	Programmation linéaire
Ostermark	1999	1/V/I/R	Algorithmes génétiques
Roodman	1986	1/V/D/R (aciérie)	Programmation linéaire Heuristique séquentielle
Sadowski	1960	1/V/D/M (aciérie)	Programmation dynamique
Stadtler	1990	1/V/I/R (aluminerie)	Programmation linéaire
Sweeney et Haessler	1990	1/V/D/M	Méthode heuristique séquentielle
Wolfson	1965	1/V/D/M (aciérie)	Programmation dynamique

3.3 Ordonnancement intégré

En règle générale, l'opération de découpe représente uniquement une partie de l'ensemble des activités de production d'une usine. Tel que mentionné précédemment, les pièces résultant des opérations de découpe sont souvent utilisées comme intrants pour une opération subséquente. Par exemple, les pièces sont coupées puis peintes (Bookbinder et Higginson, 1986), coupées puis cousues (Farley, 1988), coupées puis empaquetées... La plupart du temps, ces opérations sont considérées comme deux problèmes distincts et sont optimisées de façon indépendante (MacCathy et Liu, 1993, Bjorndal et al, 1995).

En effet, la plupart des articles traitant des problèmes d'ordonnancement entre une opération manufacturière quelconque et un poste de découpe touchent des problèmes « découpe-assignation » (*cutting stock assignment problem*), c'est-à-dire l'assignation des pièces produites à des centres opératoires différents, ou encore des combinaisons « découpe-grosseur de lot » (*cutting stock and lot-sizing problem*). Ces sujets ont entre autres été étudiés dans les textes de Haessler (1971), Coverdale et Wharton (1976), Masri et Warburton (1998) ainsi que Nonas et Thorstenson (2000). Un certain nombre d'études portent également sur l'ordonnancement de plusieurs postes de découpe, tels ceux proposés par Westerlund et Isaksson (1998) et Giannelos et Georgiadis (2001). Bien que ces travaux illustrent la nécessité de considérer les besoins et contraintes des procédés adjacents, ils ne s'intéressent pas à l'efficacité globale des systèmes de production.

Depuis le début des années 1990, quelques auteurs se sont cependant penchés sur cette problématique particulière. Entre autres, Van Vorhis et al (2001) ont développé un modèle de programmation en nombres entiers afin d'automatiser le processus d'ordonnancement des coulées d'une fonderie d'acier. L'objectif principal est d'estimer l'impact des séquences de coulée sur la quantité d'en-cours des opérations en aval tout en minimisant les réglages, les retards et la sous-utilisation des équipements.

De leur côté, Gravel et al (2000, 2002) ont étudié l'ordonnancement de la production dans une aluminerie. Dans ce cas particulier, la coulée est effectuée de façon horizontale continue, c'est-à-dire que les fours sont continuellement approvisionnés en métal liquide et que les opérations subséquentes sont réalisées sans interruption du flux de métal. La production n'est arrêtée que s'il faut changer l'alliage ou la section transversale du produit. L'objectif de cette étude est de déterminer les séquences de production qui minimisent les retards et les pénuries de métal, compte tenu des disponibilités des équipements.

Un problème d'ordonnancement similaire a été traité par Jacobs et ses collaborateurs (1988) dans une fonderie d'acier. Ces derniers cherchent à déterminer l'horaire optimal de production pour un poste de laminage à chaud, continuellement approvisionné par un poste de coulée. Le modèle repose sur la minimisation du niveau d'inventaire, la maximisation du revenu ainsi que de la production.

De leur côté, Bookbinder et Higginson (1986) ont réalisé un modèle de découpe intégré dans une usine de carton ondulé qui prend en considération la capacité et temps de traitement des postes de travail en aval (impression, pliage et assemblage) afin d'assurer un respect des dates de livraison, et non seulement la minimisation des pertes de coupe.

Chiotti et Montagna (1998) ont développé une approche globale afin de minimiser les pertes et la production supplémentaire dans une entreprise métallurgique. Cette approche prend en considération toutes les activités incluses dans l'approvisionnement des barres de métal, de l'achat des pièces à leur assemblage, et cherche à identifier les patrons de coupe optimaux de même que leur séquence de production.

Hendry et al (1996) ont étudié les problèmes de découpe et d'ordonnancement pour une fonderie de cuivre où les opérations de fonte, de coulée et de coupe des billettes sont intimement reliées. L'objectif de cette étude est de générer un plan de production de même que les plans de coupe utilisés afin de minimiser les coûts de production (l'utilisation des fours et les pertes de coupe) et de répondre à la demande.

3.4 Conclusion et proposition de résolution

Les travaux présentés ci-dessus permettent de constater que les recherches effectuées jusqu'à ce jour se concentrent principalement sur l'optimisation locale plutôt que globale. Chacun des éléments de la chaîne de décision (figure 3.1) a été étudié maintes fois mais généralement de façon isolée par rapport aux autres fonctions de l'entreprise.

Les modèles exposés dans les pages précédentes traitent évidemment des problèmes d'ordonnancement intégré dans les fonderies ou les ateliers monogammes mais aucun n'est susceptible d'éclairer la démarche de résolution entreprise. En effet, les méthodes d'ordonnancement pour les systèmes de production d'aluminium en continu ne sont pas pertinentes puisque la nature du procédé est totalement différente de l'environnement étudié. D'autre part, la majorité des travaux cités n'inclut pas la problématique de découpe et sont donc de faible utilité dans le cas présent. Bien sûr, les trois derniers articles abordent cette question mais ne présentent pas de potentiel intéressant pour deux principales raisons. En effet, ces travaux se réfèrent au problème classique de découpe dans lequel le matériel de longueur fixe est découpé en pièces selon un certain nombre de patrons, ce qui ne représente pas les contraintes étudiées dans le cadre de ce travail. De plus, la relation entre les dimensions des lots produits et la quantité de pièces demandées n'est adressée dans aucune de ces recherches et les intégrations sont pour la plupart basées sur le respect des dates de livraison.

La méthodologie de résolution proposée repose donc sur une intégration double, soit l'intégration des problèmes de planification et de découpe et l'intégration de l'ordonnancement des coupes (i.e. des coulées) et des expéditions. Ce regroupement s'est imposé naturellement vu l'étroite relation entre le poste de coupe et le puits de coulée (section 2.4).

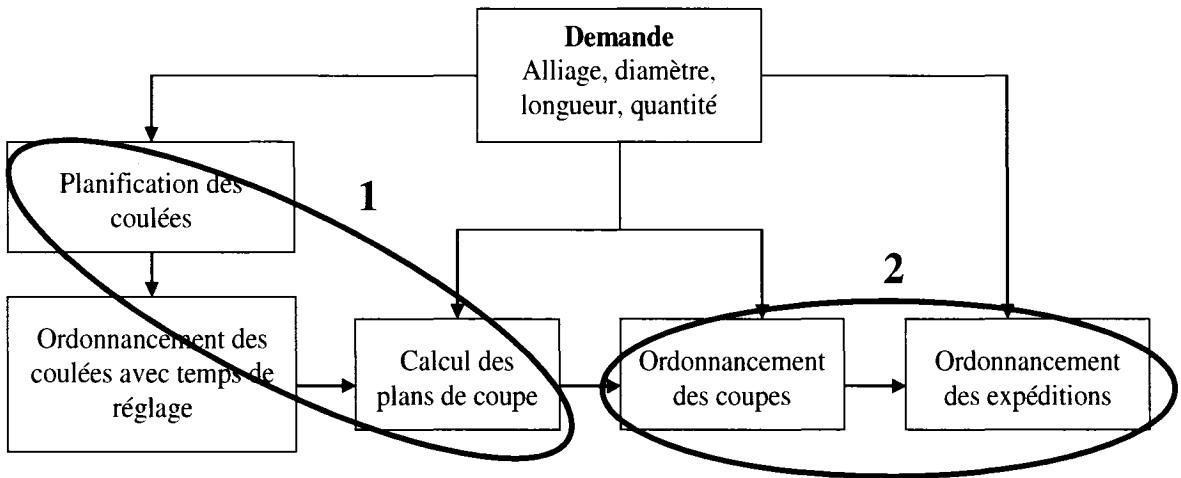


Figure 3.7 : Proposition d'une intégration double

L'ordonnancement de la production dans l'horizon de planification nécessite un effort de réflexion important. En effet, l'objectif de cette activité est de respecter les dates de livraison des commandes tout en minimisant les changements de diamètre et d'alliage. Cependant, un même lot de billettes peut être composé de produits destinés à plusieurs clients différents, donc présenter des dates de livraison distinctes. La commande d'un client, qui doit être livrée en une seule fois, peut ainsi être fragmentée sur plusieurs coulées et se traduire par un nombre important de produits en-cours.

En ce sens, le problème est contraint à la fois par des règles de priorité EDD – *Earliest Due-Date* (dates de livraison promises), par la minimisation des temps de complétion et par des temps de mise en course dépendants de la séquence de production (*sequence dependant set-up*). La combinaison de ces objectifs est difficile à mettre en place dans un seul modèle mathématique, compte tenu des contraintes explicitées précédemment.

Ainsi, puisque les opérations de planification et d'ordonnancement doivent être réalisées successivement, pour respecter des contraintes temporelles et pour s'assurer d'élaborer un modèle concis et de taille raisonnable, la priorité de résolution doit être accordée au premier regroupement. Ce projet de recherche présentera donc l'étude portant sur l'intégration des problèmes de planification et de découpe à la fonderie d'aluminium alors que l'ordonnancement intégré des coulées et des expéditions pourra faire l'objet d'un prochain travail.

CHAPITRE 4

MODÉLISATION

Ce chapitre englobe tout le travail de modélisation effectué dans le cadre de ce projet afin de résoudre les problématiques particulières du CC5. Tout d'abord, un aperçu de la reproduction du système d'optimisation de la fonderie est présenté. La deuxième section de ce chapitre est quant à elle consacrée à l'élaboration d'un modèle mathématique afin d'améliorer les processus de planification et d'ordonnancement de l'atelier. Ceci implique entre autres l'explication des hypothèses élaborées pour la construction du modèle ainsi que les simplifications qui lui sont apportées.

4.1 Logiciel d'optimisation

Le logiciel d'optimisation intervient lors de la troisième étape de la planification de la production à la fonderie d'aluminium (section 2.2.4). Puisqu'il est impossible d'utiliser l'application hors de l'entreprise, sa logique a été reproduite à l'aide du logiciel MS Excel et du langage VBA. Cependant, compte tenu du caractère confidentiel de ces informations, le code informatique élaboré n'est pas inclus dans ce travail. Les détails concernant les stratégies mises de l'avant par l'application sont également omis.

Puisque aucune documentation n'était disponible afin de guider l'élaboration du programme, la réplique du système d'optimisation fonctionne en réalité comme une boîte noire (i.e. intrants et sortants connus et comparables aux résultats obtenus par l'application originale). Une simplification de l'interface du logiciel est présentée à la figure 4.1.

**** Pour un diamètre et un alliage donné ****							
Demande							
Lng	NoPièce	Poids (kg)	NbrPièces	LngBrutOp	NoBrut	EtatCmd	
500	P1	19950	598	6430	B83	Fait	
550	P12	16800	420	5910	B71	Fait	
600	P16	4200	99	5800	B50	Fait	
700	P18	17850	360	5280	B47	Fait	
Total							
4							
Nombre de billettes par coulée				Longueur des sciures (mm)			
80				10			
Longueur tête/pied sans les sciures (mm)				Tonnage généré par mm			
300				0,0500			
Fournée	Coulée	LngBrute	LngPièces	NbrPièces	Kg	NbrBruts	Pièces/brut
1	1	6430	500	936	25077	78	12
1	1	6430	550	20	643	2	10
1	2	5910	550	800	23640	80	10
2	1	5800	600	720	23200	80	9
3	1	5800	600	441	14210	49	9
3	1	5800	700	217	8990	31	7
3	2	5280	700	560	21120	80	7

Figure 4.1 : Reproduction de l'interface du logiciel

4.1.1 Présentation générale de l'application

L'application utilise les informations entrées par le planificateur, c'est-à-dire la demande pour chacun des couples diamètre-alliage, afin de déterminer la longueur des billettes brutes à produire ainsi que les plans de coupe. Le logiciel sépare également la production en un nombre donné de fournées et de coulées. Le schéma suivant illustre les informations échangées par les deux parties lors de la planification :

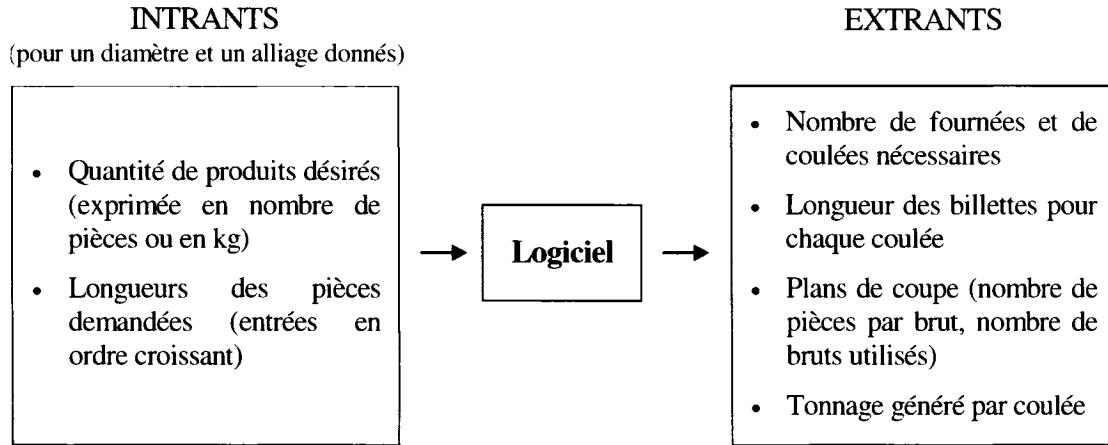


Figure 4.2 : Échange d’informations entre l’application et le planificateur

L’application détermine la longueur des billettes brutes à produire selon la liste des longueurs optimales. Il existe en effet une longueur de billette idéale pour chacune des pièces offertes par l’atelier, c’est-à-dire une dimension minimisant les pertes de coupe. Le système calcule ensuite le nombre de pièces qu’il est possible de couper par billette selon la formule suivante :

$$\text{pièces par brut} = \frac{(\text{longueur brute} - \text{longueur de la tête/pied} - \text{sciures})}{(\text{longueur des pièces} + \text{sciures})}$$

où la longueur correspondant à la tête et au pied d’une billette est constante ainsi que les pertes associées aux traits de scie. Il est à noter que la longueur totale d’une billette ne peut en aucun temps excéder 7000 mm (hauteur maximale du puits de coulée).

4.1.2 Stratégie de séparation d’une coulée

Lorsque la demande pour un produit n’est pas équivalente au tonnage total généré par une coulée, cette dernière est fractionnée en plusieurs morceaux. Le logiciel a cependant une démarche de séparation bien particulière qui se répercute directement sur les pertes engendrées par la coupe.

En effet, lorsqu'il doit partager les billettes d'une même coulée en plusieurs longueurs, le logiciel cherche toujours à minimiser les pertes de coupe de la plus petite pièce demandée et ce, peut importe la séquence d'entrée des commandes. Il suggère alors la production de billettes brutes optimales pour cette longueur, sans se soucier des autres pièces à produire dans la même coulée. Dans le cas d'une demande de produits « courts » et « longs », l'application avantage les grandes pièces alors que pour une commande constituée uniquement de produits « longs », il favorise la plus grande longueur de pièce.

4.1.3 Discussion à propos de la modélisation

Somme toute, la réplique du logiciel est une représentation réaliste du comportement de l'application originale. La compréhension du système d'optimisation de la fonderie d'aluminium a de nombreux avantages. Tout d'abord, le modèle facilite l'identification et l'évaluation des stratégies de planification mises de l'avant par l'entreprise. Le prototype permet également de cerner l'origine des pertes générées lors de la coupe des billettes et d'identifier les sources d'amélioration potentielles. Finalement, il sera un outil de comparaison afin de valider les résultats du modèle mathématique développé (section suivante).

L'étude de l'application, même sous la forme simplifiée d'une « boîte noire », indique que le système de planification est adéquat lorsque les commandes des clients représentent un multiple de coulées. La logique de l'application est cependant peu adaptée à la demande actuelle et représente une source de pertes importantes qui peuvent être évitées. Il est cependant impossible de modifier la structure logique du système par l'ajout de modules ou de simples requêtes (contraintes technologiques). L'amélioration des opérations de planification et d'ordonnancement du CC5 doit donc être réalisée à l'aide d'un nouvel outil de décision.

4.2 Modélisation mathématique

Tel que mentionné à la section 2.4, l'interdépendance des opérations de la fonderie d'aluminium nécessite l'élaboration d'une représentation intégrée des diverses activités de production. De plus, les recherches effectuées dans le cadre de ce travail ont démontré qu'aucune méthode de solution présentée dans la littérature scientifique jusqu'à ce jour n'englobe la totalité du problème présenté. Pour résoudre la problématique combinée rencontrée au CC5, il importe donc de développer une méthodologie adaptée à la situation particulière de l'atelier.

4.2.1 Construction du modèle mathématique

La construction d'un modèle mathématique représentant les contraintes des diverses activités de production est réalisée selon les spécifications du puits de coulée. Le rendement de ce poste de travail est important puisqu'il assure la performance globale du système. En effet, les opérations en aval dépendent de la production réalisée à ce poste, i.e. on coupe ce que l'on coule. De plus, il est moins laborieux de changer les paramètres de coupe des scies à chaque lot que de modifier la séquence d'alliages ou de diamètres des produits au puits de coulée. Les temps de coupe, incluant les mises en courses requises pour changer les paramètres des scies, sont grandement inférieurs aux temps de coulée des billettes. La capacité du poste de coupe est donc considérée comme une contrainte n'affectant pas le problème.

Les paramètres particuliers du poste de sciage sont inclus dans le modèle sous forme de contraintes supplémentaires. À ce niveau, quelques petites modifications au problème original de découpe (section 3.2) sont apportées, soit

- l'obligation de ne couper qu'une seule longueur de pièces par billette brute, donc absence de variable dédiée aux plans de coupe;

- la disponibilité limitée de billettes brutes d'une certaine combinaison diamètre-alliage-longueur (fonction du nombre de coulées réalisées);
- la dimension variable des billettes brutes d'un lot à l'autre.

Le modèle mathématique est résolu à l'aide du logiciel de programmation mathématique AMPL et du solveur CPLEX. Les données et résultats sont inscrits dans l'application Microsoft Excel et l'accès à ces derniers est géré par ODBC (*Open Database Connectivity*). La programmation de l'application est présentée en annexe A.

4.2.2 Hypothèses de résolution

Un certain nombre d'hypothèses ont été élaborées afin de simplifier la résolution de cette problématique de production.

1- Réception des commandes

Le modèle suppose que les commandes des clients, dont la production est prévue pour la semaine suivante, sont connues dès le milieu de la semaine et sont alors immuables.

2- Pièces supplémentaires

Les pièces supplémentaires générées par les coulées ne représentent pas des pertes au sens propre puisqu'elles peuvent être combinées à une commande ultérieure ou recyclées lors de la préparation des alliages. Cependant, elles sont traitées de la sorte afin d'éviter les coûts de refonte et d'entreposage. De plus, l'espace d'entreposage est très restreint et la priorité doit être accordée aux produits vendus en attente de livraison.

3- Diminution de l'éventail des pièces offertes

Tel que mentionné à la section 2.2.3, les produits peuvent présenter une dimension quelconque comprise entre 500 et 6 690 mm. Pour faciliter la résolution du problème, cet éventail est réduit à des multiples de 25,4 mm pour un total de 100 longueurs, soit 75 pièces « longues » et 25 « courtes ».

4- Discrétisation des longueurs des billettes brutes

La profondeur et les contraintes physiques du puits de coulée permettent de produire des billettes mesurant entre 5 et 7 mètres avec une précision d'un millimètre, ce qui représente de nombreuses possibilités. Il existe cependant une longueur de billette optimale pour chacune des pièces offertes par l'atelier, c'est-à-dire une longueur minimisant les pertes de coupe. Les dimensions possibles pour les billettes brutes sont donc limitées à ces longueurs optimales, soit 100 longueurs.

5- Pannes, bris et maintenance

Le modèle proposé exclut toute possibilité de pannes et de bris d'équipement qui sont considérés constants et prévisibles. Les interruptions de production pour les activités de maintenance et de réparation sont effectuées lors des changements de quart, des arrêts préventifs bisannuels ou des temps d'inactivité des équipements.

6- Paramètres constants

Les temps de coulée sont jugés similaires pour l'ensemble des produits puisque l'écart est minime entre la production de différents diamètres ou différentes longueurs de billettes. Il en est de même pour les temps d'inspection, de traitement thermique et de coupe des billettes.

4.2.3 Présentation du modèle mathématique

La première étape de résolution de la problématique consiste à déterminer le nombre de coulées d'un certain type (i.e. alliage, diamètre et longueur) à effectuer dans une période pour répondre à la demande des clients. Le modèle doit également minimiser les pertes totales, tant au niveau des têtes/pieds/sciures que des bouts inutilisés et des pièces supplémentaires générées.

La quantité de pièces produites dans une période dépend de deux principaux facteurs : le nombre de moules de la table de coulée (qui est fonction du diamètre des pièces) et le nombre de coulées effectuées d'une certaine combinaison diamètre-alliage. Le modèle doit également tenir compte des contraintes de découpe des pièces, c'est-à-dire la coupe d'une seule longueur de pièce par billette, ainsi que des tolérances au niveau des quantités de produits demandés par les clients. Voici le modèle développé :

Indices

$a = 1, \dots, X_a$	indice des alliages offerts ($X_a = 36$)
$d = 1, \dots, X_d$	indice des diamètres offerts ($X_d = 5$)
$l = 1, \dots, X_l$	indice des pièces demandées ($X_l = 100$)
$j = 1, \dots, X_j$	indice des billettes brutes produites ($X_j = 100$)

Paramètres

Q_{lda}	nombre de pièces l de diamètre d et d'alliage a demandées ²	
λ_j	longueur de la billette brute j (mm)	$\lambda_j \in \{5000, 5050, \dots, 7000\}$
λ_l	longueur de la pièce l (mm)	$\lambda_l \in \{500, 525, 4, \dots, 6690\}$
N_d	nombre de billettes par coulée de diamètre d	$N_d \in \{50, 60, \dots, 100\}$
μ_d	densité d'une billette de diamètre d (kg/mm)	$\mu_d \in \{0.050, \dots, 0.150\}$

² Cette quantité peut représenter les demandes de plusieurs clients (voir section 2.2.3)

σ	largeur du trait de scie pour la coupe (mm)	$\sigma = 10$
τ	largeur totale de la tête et du pied des billettes à retirer lors de la coupe (mm)	$\tau = 300$
θ_{min}	proportion minimale de la demande exigée par le client	$\theta_{min} = 0,9$
θ_{max}	proportion maximale de la demande exigée par le client	$\theta_{max} = 1,1$

Variables

n_{lj}	nombre de pièces l qu'il est possible de couper dans les billettes j ($n_{lj} = n_{ljda}$)
C_{jda}	nombre de coulées de billettes j de diamètre d et d'alliage a effectuées
B_{jlda}	nombre de billettes j de diamètre d et d'alliage a qui seront coupées en pièces l
V_{lda}	quantité de pièces l de diamètre d et d'alliage a vendues
S_{lda}	quantité de pièces l de diamètre d et d'alliage a excédentaires

Fonction objectif

La fonction objectif du modèle vise à minimiser les pertes totales, soit la différence entre la quantité de métal produite et la quantité de pièces vendues.

$$\text{Min} \quad \sum_{a=1}^{N_a} \sum_{d=1}^{N_d} \left[\sum_{j=1}^{N_j} (\Lambda_j * \mu_d * N_d * C_{jda}) - \sum_{l=1}^{N_l} (\lambda_l * \mu_d * V_{lda}) \right]$$

sujet à

$$\forall_j \quad \forall_l \quad [(\Lambda_j - \tau - \sigma) / (\lambda + \sigma)] - 1 < n_{lj} \leq (\Lambda_j - \tau - \sigma) / (\lambda + \sigma) \quad (\text{pièces par billette})$$

$$\forall_l \quad \forall_d \quad \forall_a \quad \theta_{min} * Q_{lda} \leq V_{lda} \leq \theta_{max} * Q_{lda} \quad (\text{satisfaire la demande})$$

$$\begin{aligned}
 \forall_j \quad \forall_d \quad \forall_a \quad & \sum_{l=1}^{N_l} B_{ljda} \leq (C_{jda} * N_d) && \text{(billettes disponibles)} \\
 \forall_l \quad \forall_d \quad \forall_a \quad & V_{lda} \leq \sum_{j=1}^{N_j} (n_{lj} * B_{ljda}) && \text{(pièces vendues)} \\
 \forall_l \quad \forall_d \quad \forall_a \quad & S_{lda} \geq \sum_{j=1}^{N_j} (n_{lj} * B_{ljda}) - V_{lda} && \text{(pièces supplémentaires)} \\
 \forall_j \quad \forall_l \quad \forall_d \quad \forall_a \quad & n_{lj}, B_{ljda}, C_{jda}, V_{lda}, S_{lda} \geq 0 \quad \text{et entiers}
 \end{aligned}$$

4.2.4 Simplification du modèle

Le modèle présenté ci-dessus comporte un nombre important de contraintes, dont l'une non linéaire, ainsi que des variables entières à plusieurs modalités (i.e. 5 diamètres, 36 alliages, 100 longueurs de pièces et 100 longueurs de billettes). La résolution d'un problème de cette taille est des plus délicates et il importe d'effectuer un certain nombre de simplifications afin d'obtenir des résultats viables sans engager de temps ni d'efforts importants.

4.2.4.1 Planification pour un seul couple diamètre-alliage

Les lots générés lors d'une coulée possèdent des caractéristiques fixes, c'est-à-dire un alliage, un diamètre et une longueur donnés. La planification de la production de ces coulées est indépendante de l'ordonnancement adopté c'est-à-dire que, peu importe la séquence choisie pour minimiser les changements de diamètre et d'alliage, il est nécessaire de produire les coulées nécessaires à la satisfaction de la demande. Dans cette optique, il est donc possible de réaliser la planification de la production pour une

seule combinaison diamètre-alliage à la fois. Les sommes $\sum_{a=1}^{N_a} \sum_{d=1}^{N_d}$, de même que les indices correspondants, peuvent alors être éliminés puisque $X_a = X_d = 1$.

Cette simplification permet également de comparer directement les plans de production générés par le modèle à ceux du système utilisé actuellement par la fonderie. En effet, le logiciel ne peut traiter qu'un couple diamètre-alliage à la fois (section 4.1).

4.2.4.2 Élimination de la contrainte non linéaire

Les valeurs de la variable n_{lj} , c'est-à-dire le nombre de pièces l qu'il est possible de couper dans les billettes j , sont déterminées au moyen de la contrainte non linéaire suivante : $[(\Lambda_j - \tau - \sigma)/(\lambda + \sigma)] - 1 < n_{lj} \leq (\Lambda_j - \tau - \sigma)/(\lambda + \sigma)$. Afin de simplifier la résolution du modèle, la variable correspondante a été convertie en paramètre. Cette simplification ne

pose pas de problèmes puisque les valeurs que peut prendre n_{lj} sont limitées à l'intérieur de l'horizon de planification. En effet, selon les données fournies par l'entreprise, 15 longueurs de pièces sont demandées en moyenne par semaine, dont 3 pour un même diamètre-alliage ($l = 15$). Il est donc relativement aisé de calculer les valeurs possibles du paramètre n_{lj} et de les inclure dans le modèle.

4.2.4.3 Diminution de l'éventail de longueurs des billettes

Afin de déterminer les coulées à produire lors d'une période donnée, il n'est pas nécessaire d'inclure l'éventail complet des longueurs brutes (A_j) dans le modèle. Tel que mentionné précédemment, il existe une longueur de billette optimale pour chacune des pièces offertes par l'atelier. Puisque le modèle cherchera à les utiliser à chaque résolution (l'objectif est de minimiser les pertes), il est donc possible de n'utiliser que les longueurs optimales pour les pièces demandées, c'est-à-dire une moyenne de 15 par semaine ($j = 15$). Cette simplification permet de comparer directement les résultats obtenus à ceux du logiciel d'optimisation qui procède de cette façon.

CHAPITRE 5

EXPÉRIMENTATION

Le cœur de ce travail de recherche consiste à évaluer la performance du système d'optimisation utilisé actuellement à la fonderie en fonction de l'évolution des demandes des clients. Cette évaluation a nécessité une méthodologie particulière d'élaboration des données qui est d'abord présentée dans ce chapitre. Le modèle mathématique développé est également mis en parallèle avec les stratégies de planification et d'ordonnancement de l'entreprise (section 2.2.4).

5.1 Stratégie d'élaboration des données expérimentales

Les résultats des tests présentés ci-après ont été obtenus en utilisant le tonnage moyen demandé par combinaison diamètre-alliage à l'intérieur de l'horizon de planification. Les données fournies par l'entreprise indiquent une demande hebdomadaire d'environ trois coulées par type de produit. En supposant un diamètre des pièces de 200 mm (demandé dans 70% des commandes), cela correspond à un total de 150 000 kg.

Les pièces demandées par les clients pour une combinaison diamètre-alliage sont déterminées aléatoirement parmi les longueurs les plus populaires. Les quantités correspondantes sont ensuite réparties arbitrairement sur les trois coulées, sans excéder 150 000 kg. Puisque aucune perte n'est générée lors de la demande d'une seule pièce, mis à part les inévitables pertes de coupe, les expériences visent à étudier l'impact de deux longueurs et plus sur ces trois coulées.

La logique utilisée pour générer les données expérimentales est expliquée à la figure suivante. Il est à noter que N représente le nombre de longueurs demandées par les clients et que Q est l'indice des essais effectués (10 combinaisons de tonnage pour

chaque N). Les paramètres de la formule pour déterminer Q_{lda} (nombre de pièces demandées) sont expliqués à la section 4.2.3.

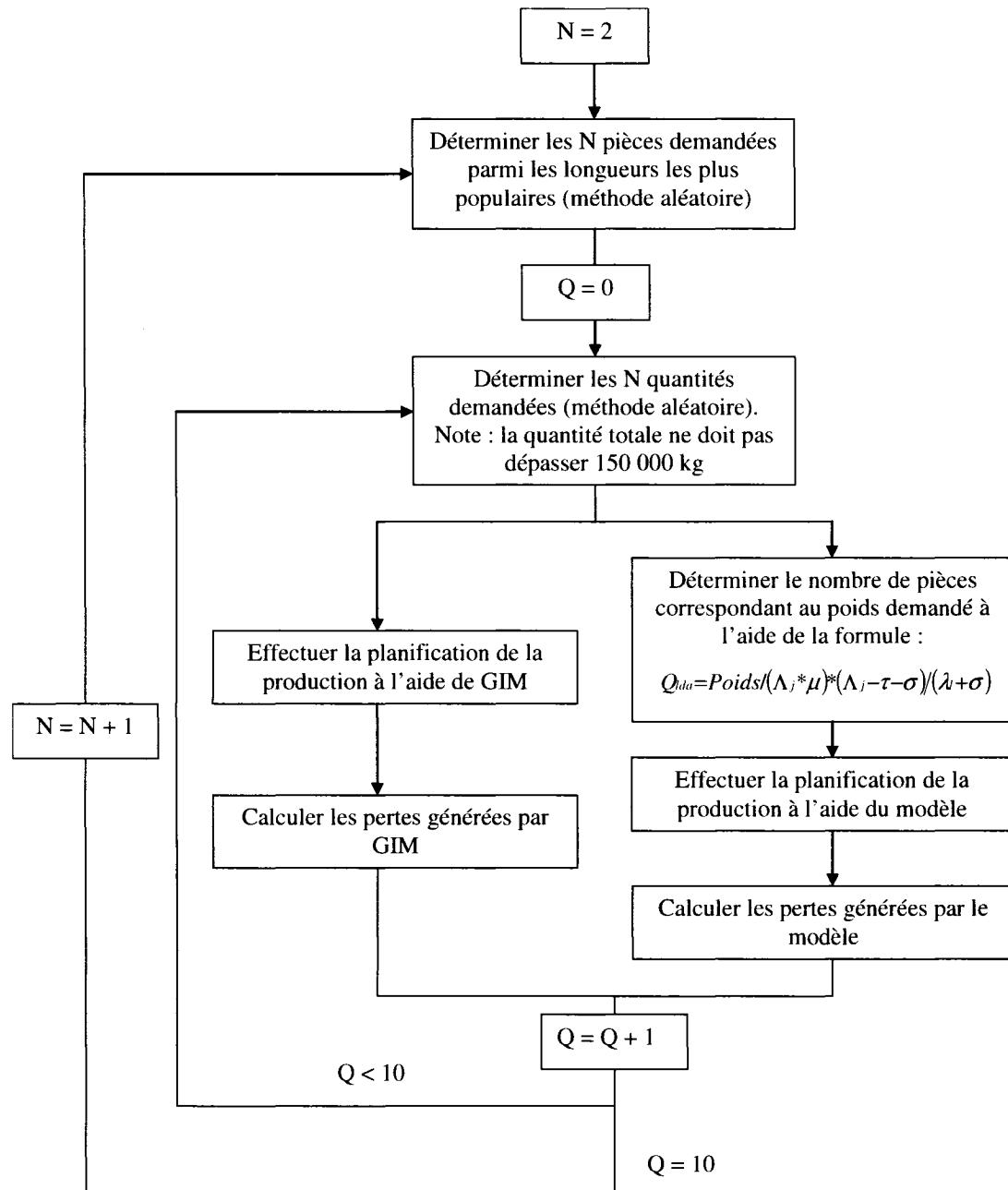


Figure 5.1 : Élaboration des données expérimentales

5.2 Présentation des résultats obtenus

Les résultats exposés dans cette section représentent la moyenne de tous les essais réalisés pour chacune des combinaisons de longueurs. Le système actuel est d'abord éprouvé afin de déterminer les conditions d'utilisation qui favorisent sa performance optimale et d'identifier ses limites. L'application actuelle est ensuite mise en parallèle avec le modèle mathématique élaboré afin de confronter les pertes de métal générées par chacune des méthodes ainsi que le tonnage vendu et expédié. Finalement, quelques modifications sont apportées au modèle mathématique afin de présenter une nouvelle approche de maximisation des profits.

5.2.1. Performance du système actuel

Tel que mentionné à la section 4.1.3, le système de planification et d'ordonnancement de la production employé actuellement à la fonderie ne semble pas être de pair avec les politiques de ventes de l'entreprise. Les résultats de trois tests sont donc présentés dans cette section afin de cibler les situations idéales d'exploitation du système.

5.2.1.1 Séquence d'entrée des commandes

En règle générale, l'application donne des bons résultats quand la demande pour un couple diamètre-alliage n'est constituée que d'une seule longueur. Les pertes totales correspondent alors aux pertes minimales de coupe. Dans ce cas, il n'y a bien sûr aucune perte reliée aux longueurs multiples. Par contre, lorsque plusieurs pièces différentes sont demandées, les rebuts générés dépendent directement de l'ordre dans lequel les commandes sont entrées dans l'application.

Divers tests ont été effectués afin de déterminer la séquence optimale d'entrée des commandes, c'est-à-dire celle qui minimisera les pertes totales. Bien que les résultats de ces tests ne soient pas mentionnés dans cette section, il est possible d'affirmer que l'entrée des couples diamètre-alliage en ordre de croissant de longueurs diminue les rebuts totaux d'environ 4%.

5.2.1.2 Augmentation du nombre de longueurs pour un diamètre-alliage

La relation entre la grosseur des lots de production et les demandes particulières des clients a également un impact important sur les rebuts de la fonderie. La figure 5.2 illustre la relation directe entre le nombre de longueurs demandées par couple diamètre-alliage et les pertes totales de l'atelier.

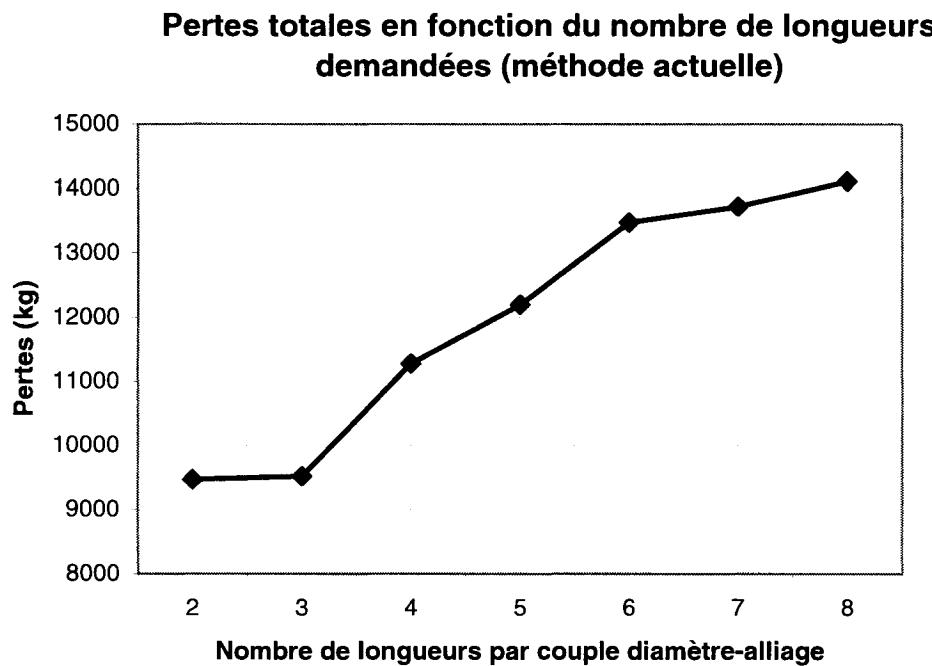


Figure 5.2 : Pertes totales en fonction du nombre de longueurs demandées (actuelles)

Ces rebuts incluent les chutes dues à l'inéquation entre les longueurs des billettes et celles des pièces demandées (i.e. longueurs multiples), aux pièces supplémentaires générées par les coulées ainsi qu'aux pertes inhérentes à la coupe qui sont inévitables mais supposées constantes. En effet, la largeur de la tête et du pied des billettes est toujours de 300 mm, sauf dans les rares cas où des défauts majeurs surviennent lors de la coulée. Les sciures ne sont pas constantes mais ne représentent que 10 mm par pièce coupée et sont donc négligeables par rapport aux rebuts globaux.

La courbe du graphique précédent démontre que l'application génère des pertes minimales lors de la demande de 2 ou 3 longueurs de billettes par diamètre-alliage dans l'horizon de planification. Ces pertes ne sont cependant pas nulles car les quantités commandées ne représentent pas un multiple de coulées. Il y a donc automatiquement des pièces qui sont coupées à partir de billettes brutes de longueur non optimale (longueurs multiples).

Le graphique démontre également une croissance importante des pertes pour une demande supérieure à 3 pièces. En réalité, plus le nombre de longueurs demandées est élevé, plus les rebuts de productions le sont. Cette augmentation est logique puisqu'il ne peut y avoir qu'un maximum de trois longueurs brutes pour ces coulées (une par coulée) et ces dernières sont uniquement optimales pour trois produits.

Les pertes engendrées par l'application sont jugées importantes puisqu'elles dénoncent l'incapacité du système à traiter de petites quantités (i.e. plusieurs longueurs différentes) pour une même combinaison diamètre-alliage. Cette situation est délicate vu l'évolution de la demande des clients et la capacité de l'application à planifier pour un seul type de produit à la fois (section 4.1). Par conséquent, le département des ventes ne devrait pas encourager la commande de plus de 3 longueurs pour un même type de produit. D'autant plus que, dans le cas où trois clients demandent chacun une longueur différente pour cette combinaison, l'atelier fait déjà face au maximum des pertes jugées raisonnables.

Cependant, selon les données recueillies, les clients demandent en moyenne 3 longueurs par couple diamètre-alliage dans l'horizon de planification. Cette situation problématique a donc de faibles chances de se produire.

5.2.1.3 Combinaison de produits « courts » et « longs » pour un diamètre-alliage

Il a été démontré que le système de planification actuel n'est pas adapté pour répondre à des commandes de plusieurs longueurs pour un même diamètre-alliage. La fonderie doit cependant agir de la sorte compte tenu de l'évolution des commandes des clients. Ces derniers peuvent en effet demander des produits « courts », « longs » ou un mélange des deux. Cependant, certaines combinaisons engendrent plus de pertes que d'autres et il est intéressant de les identifier.

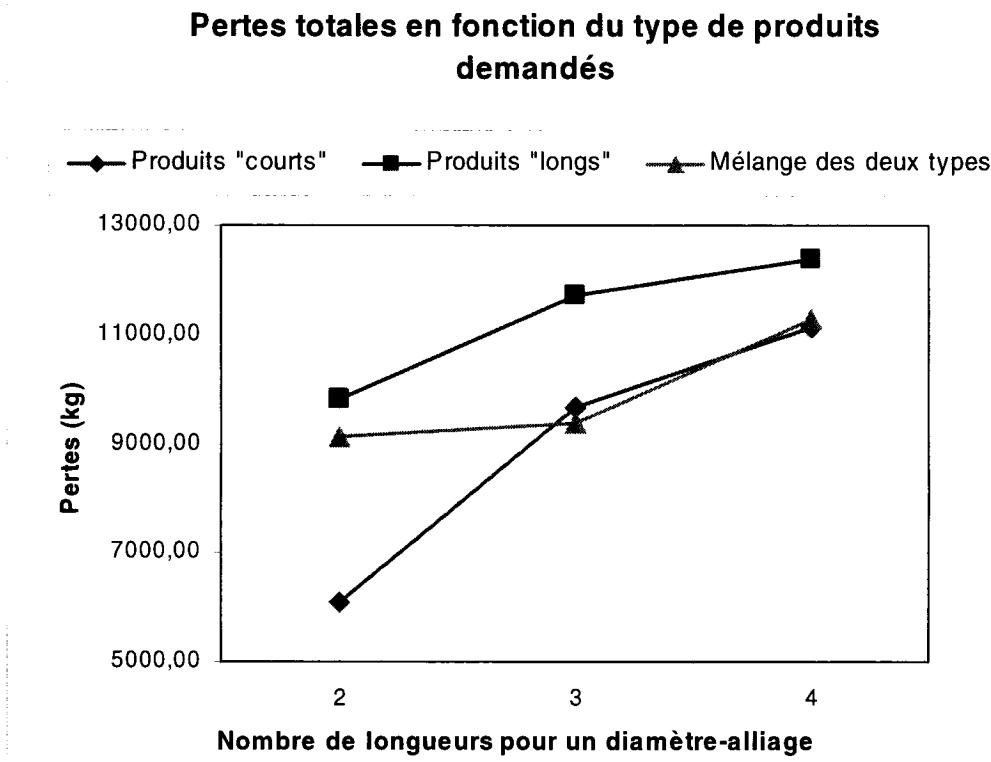


Figure 5.3 : Pertes totales en fonction du type de produits demandés (actuelles)

Les données du graphique 5.3 ont été obtenues à partir d'une demande de 2, 3 et 4 longueurs de chacune des combinaisons de produits. Puisque la liste des popularités ne contient que 4 longueurs de produits « longs », il est impossible d'effectuer des essais au-delà de cette demande. Les résultats obtenus permettent cependant de tirer quelques conclusions.

Tout d'abord, le graphique précédent démontre clairement que la demande pour des produits uniquement « longs » engendre des pertes plus importantes que toute autre combinaison de pièces. En effet, dans une billette brute, il n'est possible de couper qu'une seule pièce de grande taille. Si la longueur de cette billette n'est pas optimale pour la pièce demandée (i.e. longueurs multiples), l'excédent est rejeté en totalité. Cependant, lorsque la demande combine des produits « courts » et « longs », il existe une certaine probabilité pour que la longueur brute correspondant à la pièce de grande taille puisse convenir à la coupe de plusieurs petites pièces sans créer trop de pertes. Cette conclusion est également valide pour un mélange de produits « courts ».

Par conséquent, la fonderie devrait porter une attention particulière aux combinaisons de longueurs demandées pour un couple diamètre-alliage et vérifier à ce que les clients ne commandent pas plusieurs grandes pièces pour un même type de produits (ou encore veiller à ce que le tonnage demandé soit un multiple de coulée).

5.2.2 Comparaison des pertes engendrées par les deux méthodes

En considérant les conditions actuelles de production du CC5, il est possible d'affirmer que le système de planification est utilisé d'une façon optimale, c'est-à-dire en ne combinant pas plus de 3 longueurs de pièces par diamètre-alliage et en entrant la demande pour la plus petite pièce en premier. Cependant, il est intéressant de vérifier à quel point le modèle mathématique développé permet d'améliorer l'algorithme de découpe, plus particulièrement au niveau des rebuts de production. En effet, tel que présenté dans le tableau suivant, le modèle permet une diminution des pertes totales variant entre 20 et 43.5%.

Tableau 5.1 : Pertes totales selon le nombre de longueurs demandées

Nombre de longueurs	PERTES (KG)		Écart
	Méthode actuelle	Modèle proposé	
2	9467,16	7588,77	- 19,84 %
3	9513,99	7679,93	- 19,28 %
4	11279,40	7920,03	- 29,78 %
5	12193,46	8272,72	- 32,15 %
6	13467,92	8241,14	- 38,81 %
7	13717,97	8193,80	- 40,27 %
8	14112,61	7979,42	- 43,46 %
Moyenne			- 31,94 %

L'écart entre les pertes reliées à l'utilisation du modèle et celles générées par le logiciel d'optimisation augmente d'une façon importante en fonction du nombre de longueurs demandées. La figure 5.4 démontre que les deux courbes s'éloignent sensiblement au-delà de 4 longueurs.

Les pertes causées par le modèle mathématique semblent quant à elles atteindre leur valeur maximale pour la demande de 5 pièces. Ce sommet est uniquement relié à la méthodologie expérimentale (artefact) et on peut considérer que les pertes demeurent relativement constantes pour l'ensemble des longueurs demandées.

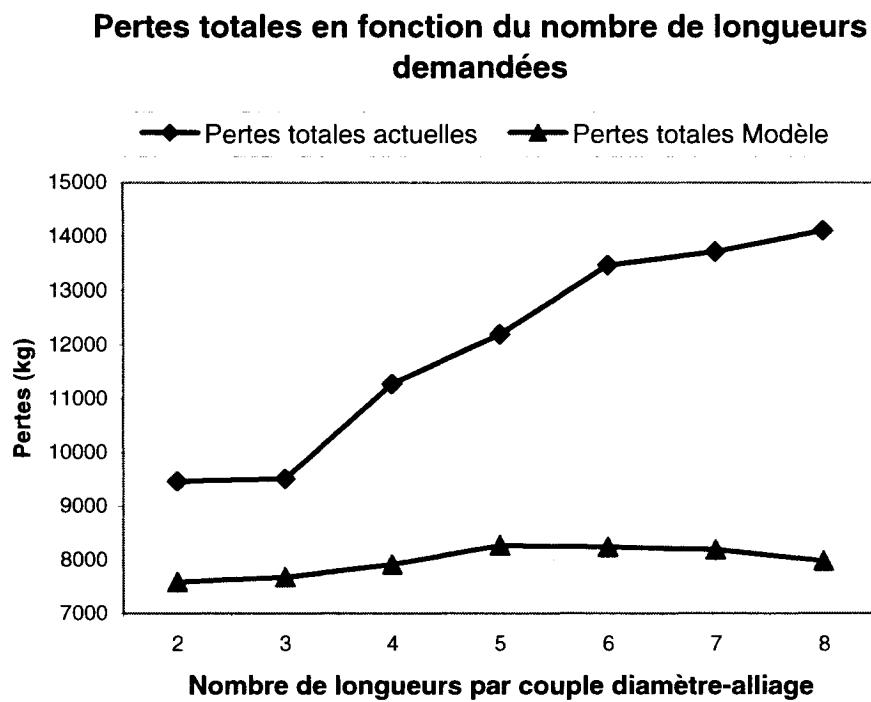


Figure 5.4 : Pertes totales en fonction du nombre de longueurs demandées

Puisque les pertes dues à la coupe proprement dite ne varient pratiquement pas pour les deux méthodes de planification (aucun changement d'équipement de production), cette diminution est principalement reliée à la réduction des deux autres types de pertes : les longueurs multiples et les pièces supplémentaires.

5.2.2.1 Pertes dues aux longueurs multiples

Les longueurs multiples sont le résultat direct de l'utilisation d'un système de planification qui ne tient pas compte des relations étroites entre les diverses opérations de production. En effet, lorsqu'il doit produire plus d'une pièce dans la même coulée, le système actuel génère des coulées de billettes ayant une longueur brute optimale pour la plus petite pièce demandée. L'application ne se soucie pas de l'impact de ce choix sur la coupe des autres produits et il en résulte des pertes reliées à l'inéquation entre les dimensions du matériel brut et des pièces demandées : les longueurs multiples. Ces rebuts sont principalement responsables de l'écart entre les deux courbes de la figure suivante.

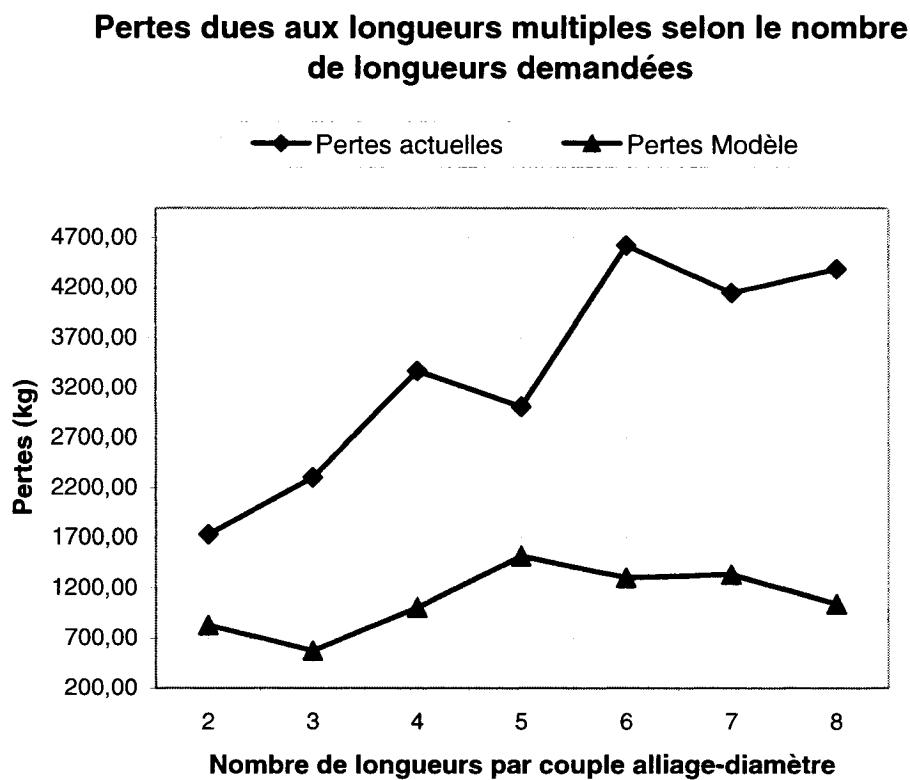


Figure 5.5 : Pertes dues aux longueurs multiples

L'échantillon des longueurs et des quantités utilisées lors des essais avec le logiciel d'optimisation permet d'évaluer entre 1,25 et 3,6 % les pertes dues aux longueurs multiples (tableau suivant). Ces résultats ne sont pas cependant conformes avec les taux de rejet actuels de l'entreprise puisque ces derniers ne sont calculés que pour une demande hebdomadaire moyenne variant entre 1 et 3 longueurs par couple diamètre-alliage et à partir d'un échantillon de données beaucoup plus large. Cependant, puisque les résultats des deux méthodes sont basés sur une demande similaire, il est tout de même possible de souligner l'inefficacité du système à minimiser les pertes en longueurs multiples, particulièrement lors de la demande de plus de 4 longueurs.

Tableau 5.2 : Pertes dues aux longueurs multiples

Nombre de longueurs	MÉTHODE ACTUELLE		MODÈLE PROPOSÉ	
	Pertes (kg)	Proportion de la production *	Pertes (kg)	Proportion de la production
2	1734,19	1,27 %	831,28	0,73 %
3	2304,00	1,34 %	604,62	0,58 %
4	3371,54	3,60 %	1009,47	1,19 %
5	3008,23	2,65 %	1519,15	1,23 %
6	4622,69	2,30 %	1306,71	1,06 %
7	4149,77	2,03 %	1337,72	1,09 %
8	4386,73	2,08 %	1046,03	0,88 %
Moyenne		2,18 %		0,97 %

* non-conforme au taux de rejet actuel

L'optimisation réalisée à l'aide du modèle mathématique réduit les pertes dues aux longueurs multiples à moins de 1,2% et ce, pour l'ensemble des longueurs demandées. Cette diminution de 66% est non négligeable pour une fonderie puisque le métal perdu lors de la coupe des billettes est refondu en totalité, impliquant des coûts de production supplémentaires. Chaque tonne non recyclée a également un potentiel de vente. De plus, la mise en alliage peut alors être réalisée à partir de rebuts ou de produits provenant d'entreprises externes, générant ainsi des revenus additionnels appelés incitatif de refonte.

5.2.2.2 Pertes dues aux pièces supplémentaires

Les divers essais effectués démontrent que les pièces supplémentaires (i.e. nombre excédant la proportion maximale de la demande exigée par le client) sont pratiquement éliminées par l'utilisation du modèle mathématique. En effet, puisque ces dernières sont considérées comme des pertes, la fonction objectif du modèle cherche à les minimiser à tous les coups. Dans bien des cas, ces produits pourraient tout de même être expédiés puisqu'ils ne représentent pas une violation importante de la limite supérieure demandée. Les clients seraient sans doute enclins à acheter une ou deux pièces excédentaires sans trop de problèmes.

Dans le tableau 5.3, la quantité de pièces est exprimée en unités plutôt qu'en kilogrammes afin de mieux représenter les résultats. En effet, les produits supplémentaires générés par le système actuel sont habituellement les pièces les plus longues car elles sont produites en dernier. Ces pertes sont donc plus importantes en termes de poids mais pas nécessairement en quantité.

Tableau 5.3 : Quantité de pièces supplémentaires générée par commande

Nombre de longueurs	NOMBRE MOYEN DE PIÈCES	
	Méthode actuelle	Modèle proposé
2	6,0	0,1
3	3,0	0,0
4	3,5	0,2
5	7,1	0,1
6	6,3	0,2
7	9,3	0,1
8	30,8	0,6
Moyenne	9,43	0,19

La réduction du nombre de pièces supplémentaires est un enjeu important puisque ces dernières sont la plupart du temps refondues, dû à l'impossibilité de les joindre à une autre commande dans un délai de 90 jours. Ces produits ont en plus occupé un espace dans l'entrepôt restreint et engendré des coûts d'entreposage.

5.2.3 Comparaison du tonnage vendu et expédié selon les deux méthodes

Les termes actuels du contrat permettent à la fonderie d'expédier une proportion variable de la quantité de produits désirés par les clients (entre 90 et 110%). Il semble donc plus qu'intéressant pour les producteurs de maximiser la quantité de pièces vendues. À ce niveau, le modèle développé permet l'entrée de revenus supplémentaires pour tous les essais effectués et ce, à partir du même nombre de coulées que le système actuel. Ce dernier ne semble pas profiter pleinement de la marge de manœuvre intéressante qu'offre le contrat puisque la satisfaction de la demande des clients pour plupart des essais se situe sous les 100%.

Les symboles * du tableau 5.4 indiquent que la quantité minimale demandée par les clients pour une ou plusieurs pièces n'est pas satisfaite. Cet écart par rapport à la demande est expliqué par la logique de planification particulière du logiciel (section 4.1).

Tableau 5.4: Satisfaction de la demande des clients

Nombre de longueurs	Méthode actuelle (%)	Modèle proposé (%)	Écart (%)
2	103,09	105,16	+ 2,07
3	100,51 *	102,01	+ 1,50
4	98,90 *	102,69	+ 3,79
5	99,54 *	103,61	+ 4,07
6	99,09 *	102,36	+ 3,27
7	98,79 *	103,28	+ 4,49
8	99,82 *	103,57	+ 3,75
Moyenne			+ 3,28

On remarque qu'aucun des essais effectués au moyen du modèle mathématique ne permet d'atteindre la satisfaction maximale des clients. Cela s'explique par la nature même de la fonction objectif qui consiste à minimiser les pertes totales (section 4.2.3). En effet, accroître le nombre de produits vendus (V_{lde}) implique l'augmentation de la production de coulées (C_{jde}). Pour chacune d'entre elles, une certaine quantité de rebuts inévitables est générée. Il y a donc un compromis à réaliser entre la minimisation des pertes (rebuts de coupe mais aussi de pièces supplémentaires) et la maximisation des profits. Le premier objectif est privilégié dans le cas présent.

5.2.4 Modification de la fonction objectif

Une entreprise peut augmenter ses profits de deux façons : en diminuant ses dépenses, représentées dans ce travail par les pertes de métal, et/ou en augmentant ses revenus (i.e. vente de pièces d'aluminium). Le modèle présenté précédemment vise principalement la réduction des pertes totales, soit les rebuts reliés à la coupe, aux longueurs multiples et aux pièces supplémentaires. Ce modèle fait également bonne figure au niveau des ventes puisqu'il permet une satisfaction moyenne de 103.24 % des demandes initiales. Cependant, il peut être intéressant d'aborder le problème sous l'angle inverse et de chercher à en premier lieu à maximiser la quantité de pièces vendues. Il serait peut-être alors possible d'atteindre la satisfaction maximale des clients. L'impact sur les pertes générées doit par la suite être évalué afin de déterminer si la vente de pièces supplémentaires est profitable à l'entreprise.

Afin d'étudier cette problématique, la fonction objectif du modèle est remplacée par :

$$\text{Max} \sum_{l=1}^{N_l} (\lambda_l * \mu_d * V_l)$$

où λ_l représente la longueur de la pièce l en mm, μ_d la densité d'une billette de diamètre d (kg/mm) et V_l la quantité de pièces l vendues pour une certaine combinaison diamètre-alliage. Les paramètres, contraintes et données utilisées lors de la résolution du premier modèle demeurent les mêmes pour fin de comparaison.

Tel que présenté dans la figure 5.6, les pertes générées lors de la maximisation des ventes sont plus élevées que celles reliées au modèle original. Les rebuts totaux de chacune des solutions suivent la même tendance mais présentent des écarts particulièrement importants au delà de 6 longueurs demandées. Cependant, ces taux de rejet sont en tout temps inférieurs aux résultats obtenus avec le logiciel d'optimisation de l'entreprise (figure 5.4). La valeur maximale des pertes est atteinte pour une

demande de 7 longueurs, comparativement à 5 pour le premier objectif, mais cela est encore une fois relié à l'élaboration des expériences.

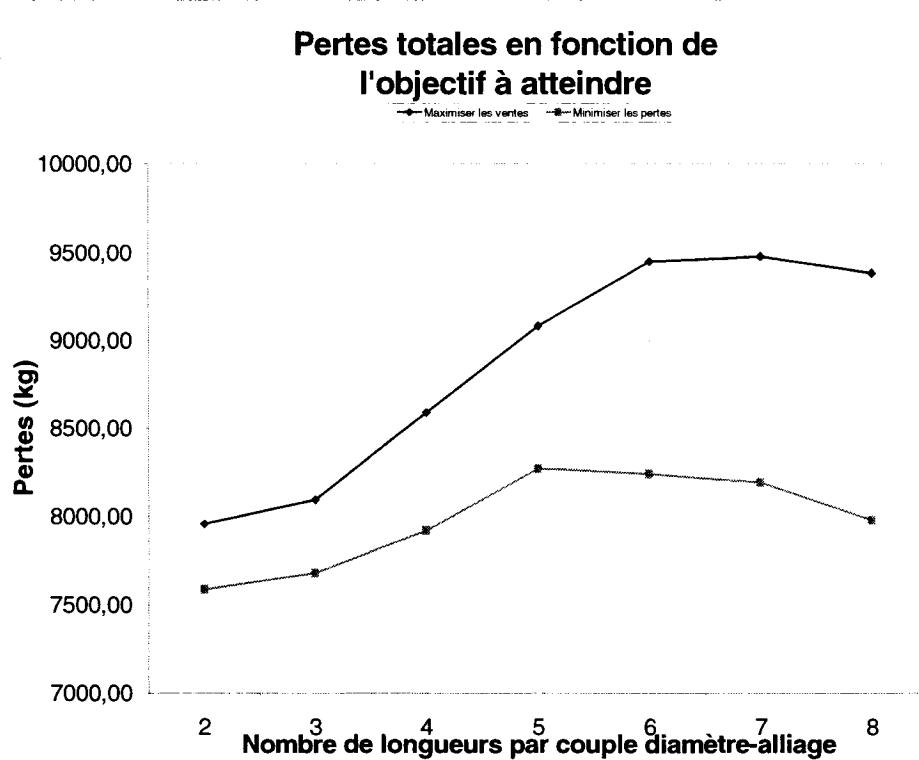


Figure 5.6 : Pertes totales en fonction de l'objectif à atteindre

L'augmentation des pertes reliées au nouvel objectif varie entre 4,5 et 15% (tableau 5.5). Cet écart relativement important peut cependant être toléré si les revenus générés par la vente de pièces supplémentaires sont supérieurs aux dépenses reliées à l'entreposage et à la refonte des rebuts. Il devient alors intéressant pour l'entreprise de considérer une politique inhabituelle favorisant l'augmentation de ses pertes.

Tableau 5.5 : Pertes totales engendrées par les deux modèles

Nombre de longueurs	PERTES TOTALES (KG)		Écart
	Minimisation des pertes	Maximisation des ventes	
2	7588,77	7957,45	+ 4,63 %
3	7679,93	8097,21	+ 5,15 %
4	7920,03	8590,12	+ 7,80 %
5	8272,72	9085,23	+ 8,94 %
6	8241,14	9450,49	+ 12,80 %
7	8193,80	9479,44	+ 13,56 %
8	7979,42	9384,77	+ 14,97 %
Moyenne			+ 9,69 %

Tableau 5.6 : Satisfaction de la demande des clients par les deux modèles

Nombre de longueurs	SATISFACTION DES CLIENTS (%)		Écart
	Minimisation des pertes	Maximisation des ventes	
2	105,16	103,85	- 1,31 %
3	102,01	103,13	+ 1,12 %
4	102,69	102,64	- 0,05 %
5	103,61	103,67	+ 0,06 %
6	102,36	104,84	+ 2,48 %
7	103,28	103,88	+ 0,60 %
8	103,57	102,02	- 1,55 %
Moyenne	103,24	103,43	+ 0,19 %

Les tests effectués démontrent que la quantité moyenne de métal vendu augmente de 0,19% pour un accroissement des pertes de l'ordre de 10%. Seulement la moitié des essais présentent un écart positif au niveau de la satisfaction des clients (2, 5, 6 et 7 longueurs) et cette faible augmentation se traduit par des rebuts très importants. Tel que

présenté dans le tableau suivant, il n'est possible pour l'entreprise de réaliser des profits que si les gains sont 5 fois plus élevés que les coûts d'entreposage et de refonte (les commandes des clients sont constituées en moyenne de 3 longueurs par couple diamètre-alliage). Les résultats obtenus laissent sous-entendre que le jeu n'en vaut pas la chandelle.

Tableau 5.7 : Validation des pertes engendrées par la maximisation des ventes

Nombre de longueurs	ÉCART AVEC LE PREMIER MODÈLE (%)		Ratio pertes/ventes
	Pertes totales	Satisfaction des clients	
2	+ 4,63 %	- 1,31 %	- 3,5
3	+ 5,15 %	+ 1,12 %	5
4	+ 7,80 %	- 0,05 %	--
5	+ 8,94 %	+ 0,06 %	--
6	+ 12,80 %	+ 2,48 %	5
7	+ 13,56 %	+ 0,60 %	22
8	+ 14,97 %	- 1,55 %	-9,66

La résolution du modèle au moyen des deux objectifs génère des résultats grandement similaires au point de vue de la satisfaction de la demande des clients (103,24% par rapport à 103,43%). Cela peut sembler étrange puisque le modèle vise une quantité de pièces vendues (V_{lde}) se rapprochant le plus possible de la proportion maximale permise par le contrat (θ_{max}). Cependant, le nombre de pièces vendues (V_{lde}) est limité par la quantité de billettes brutes disponibles (B_{lde}), laquelle doit être inférieure au nombre de coulées effectuées pour un certain type de produits (C_{jde}) (équations présentées à la section 4.2.3). Puisque tous les essais ont été effectués à partir du nombre moyen de coulées produites par semaine pour un couple diamètre-alliage, la variable C_{jde} demeure la même pour les deux objectifs, soit 3 coulées. La satisfaction des clients est donc limitée par l'élaboration même des données expérimentales.

Puisque la maximisation des ventes ne permet pas d'augmenter la satisfaction de la demande des clients et qu'elle génère en plus une quantité importante de rejets, il est possible de conclure que le premier modèle est réellement optimal, tant au niveau des pertes engendrées que du volume des ventes.

La résolution du modèle avec le deuxième objectif n'est pas viable principalement à cause de l'augmentation importante des longueurs multiples (43,73% en moyenne). Cela ne signifie cependant pas que le modèle en lui-même n'est pas adéquat : on ne cherche simplement plus à minimiser la mauvaise association des billettes aux pièces, ce qui constitue la principale source de rejet dans le cas du CC5. Les produits supplémentaires sont toujours inexistant et les pertes de coupe sont similaires à celles du premier modèle. La courbe de la figure 5.7 associée à la maximisation des ventes (courbe du haut) adopte en effet un comportement semblable à celle de la figure 5.6.

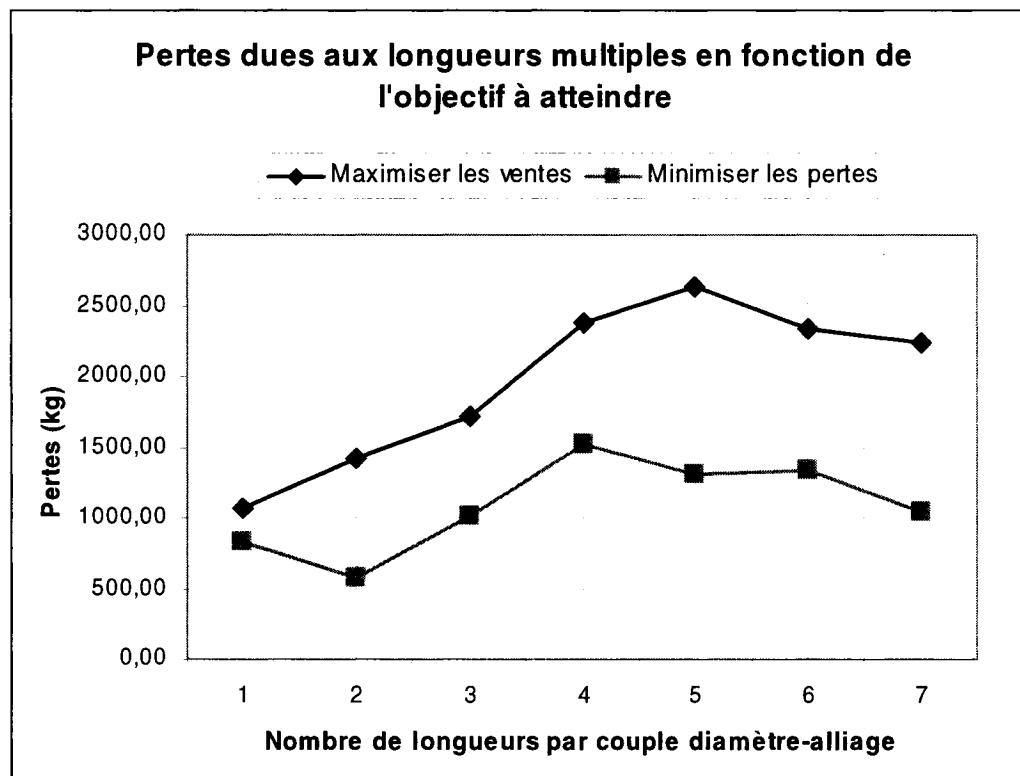


Figure 5.7 : Pertes dues aux longueurs multiples en fonction de l'objectif à atteindre

CHAPITRE 6

CONCLUSION

L'étude des environnements de fabrication sur commande et de production par lots, particulièrement dans l'industrie de l'aluminium, a conduit à l'examen des politiques de planification et d'ordonnancement de la production. Dans ces contextes industriels, les règles d'optimisation sont influencées non seulement par les conditions d'opération des équipements mais également par l'évolution du marché. L'objectif premier de cette recherche consistait donc à évaluer l'impact de l'inéquation entre l'unité de production (lot) et l'unité de vente (fraction de lot) dans les situations manufacturières présentées et à améliorer le système d'optimisation pour faciliter les politiques de gestion de la production.

L'absence de travaux portant sur l'ordonnancement intégré a été soulignée suite à une revue de la littérature exposant les concepts relatifs aux problématiques de découpe et d'ordonnancement. L'interdépendance des opérations de production de plusieurs systèmes, notamment celui du Centre de coulée 5, oblige cependant l'intégration des contraintes reliées aux divers postes de travail en un seul et même modèle afin d'optimiser globalement le processus. Cette amélioration vise principalement à réduire les inventaires, diminuer les temps de cycle par rapport au marché, minimiser les pertes et maximiser la vente de produits.

Afin de déterminer à quel moment le système de production actuel ne rencontrait plus les contraintes du département des ventes, il a été nécessaire d'élaborer une méthodologie de résolution à deux niveaux, soit l'intégration des problèmes de planification et de découpe et l'intégration de l'ordonnancement des coupes (i.e. des coulées) et des expéditions. Seule la résolution du premier regroupement a été présentée dans ce travail pour des considérations logiques (la planification doit être réalisée avant

l'ordonnancement), temporelles et pour s'assurer la conception d'un modèle concis et de taille raisonnable.

La première étape de résolution a d'abord consisté à reproduire le logiciel de planification utilisé par la fonderie. La réplique du système, qui fonctionne à la manière d'une boîte noire, a permis d'identifier les règles de planification mises de l'avant par l'entreprise et de cibler les principales causes de rejets. La pertinence des stratégies adoptées par le logiciel d'optimisation est toutefois discutable compte tenu de la demande actuelle. En effet, pour planifier la longueur des coulées, le logiciel utilise la longueur brute optimale des pièces demandées. Cette manœuvre est certes louable mais l'application adopte une mauvaise attribution des pièces aux billettes lors de la séparation d'un lot et génère ainsi des pertes au niveau des longueurs multiples. De plus, l'application utilisée par l'entreprise est limitée à la planification d'un seul couple diamètre-alliage à la fois. Cette caractéristique est très contraignante vu la diversité des commandes des clients.

La modélisation du système a également permis d'identifier les conditions d'utilisation optimales de l'application, soit l'entrée des commandes en ordre croissant de longueurs, la planification d'un maximum de 3 longueurs par type de produits et l'élimination de combinaisons de produits « longs » aux mêmes caractéristiques. La piètre performance de l'application à satisfaire la demande actuelle sans générer de pertes importantes a également été établie.

Puisqu'il était impossible d'ajouter des règles simples aux stratégies utilisées par le logiciel actuel (contraintes technologiques), la modification en profondeur de ces dernières s'est imposée. L'élaboration d'un modèle mathématique intégré pour la planification des opérations de fonte, de coulée et de découpe de la fonderie ainsi que sa résolution à l'aide de la programmation linéaire s'avère prometteuse. En effet, le prototype permet une diminution des pertes totales se situant entre 20 et 43,5%, selon le nombre de longueurs demandées. Les longueurs multiples, qui représentent la principale

source de pertes de l'atelier, sont réduites de 66%. Les pièces supplémentaires, considérées dans ce travail comme des rebuts de production, sont également éliminées. La réduction des pertes conduit évidemment à la diminution des coûts d'entreposage et de recyclage mais permet également d'effectuer les mises en alliage à partir de produits ou de rebuts provenant d'entreprises externes (activité lucrative).

En utilisant le même nombre de coulées que le système actuel, il est possible de maximiser la quantité de produits vendus aux clients, c'est-à-dire satisfaire en moyenne 103,24% de la demande plutôt que 99,96%. Il est également important de souligner la capacité du modèle à traiter plusieurs couples diamètre-alliage à la fois. En effet, certaines simplifications ont été apportées au modèle afin de comparer directement les résultats des deux systèmes et cette caractéristique du prototype est passée sous silence. Finalement, l'objectif visé par la modélisation a été modifié afin de mettre l'emphase sur l'augmentation des profits au moyen des ventes. Cette tentative s'est avérée infructueuse puisque le faible accroissement de la satisfaction des demandes s'est réalisé au détriment des pertes en longueurs multiples (+0,19% de ventes pour +9,69% de pertes). Il ne semble donc pas avantageux pour l'entreprise d'adopter cette tangente.

Les résultats de l'étude laissent entrevoir de nouvelles voies de recherche. En effet, il serait pertinent de poursuivre la résolution de la deuxième intégration (figure 3.7) afin d'effectuer l'ordonnancement de la production dans l'horizon de planification. Rappelons que l'objectif de cette activité est de respecter les dates de livraison des commandes tout en minimisant les changements de diamètre, les modifications d'alliage et la quantité de produits vendus mais non expédiés. Tel que mentionné à la section 3.4, la combinaison de ces objectifs est cependant difficile à mettre en place dans un seul modèle mathématique.

Il serait également intéressant de modifier certaines pratiques commerciales propres à la fonderie et d'étudier l'impact de ces changements sur la performance du modèle. En effet, comparativement aux autres entreprises du même type, le CC5 permet une grande latitude au niveau de l'élaboration d'une commande. Il serait donc intéressant d'analyser le resserrement des politiques sur les coûts de production, c'est-à-dire la diminution des longueurs de pièces offertes sur le marché (λ_l) et l'augmentation des quantités minimales et maximales à expédier aux clients (θ_{min} et θ_{max}). La modification des équipements de production pourrait également constituer un élément d'amélioration. Dans cette optique, l'impact de l'offre de billettes aux dimensions inférieures à 5000 mm ou supérieures à 7000 mm (A_j) sur les rebuts, la diminution des pertes de coupes liées aux sciures et à la tête/pied (σ et τ) ou l'utilisation de deux puits de coulée afin de faciliter les changements de diamètres constituent des éléments susceptibles d'être analysés lors de recherches futures.

BIBLIOGRAPHIE

PUBLICATIONS ET VOLUMES DE RÉFÉRENCES

ALVAREZ-VALDES, R., PARAJON, A., TAMARIT, J.M. (2002). A Tabu Search Algorithm for Large-Scale Guillotine (Un)Constrained Two-Dimensional Cutting Problems, Computers and Operations Research, vol. 29, pp. 925-947.

BAKER, K.R. (1974). Introduction to Sequencing and Scheduling, John Wiley & Sons, New York, 305 pages.

BJORNDAL, M.H., CAPARA A., COWLING P.I., DELLA CROCE F., LOURENÇO H.R., MALUCELLI F., ORMAN, A.J., PISINGER D., REGO C., SALAZAR J.J. (1995). Some Thoughts on Combinatorial Optimization, European Journal of Operational Research, 83, 253-270.

BOOKBINDER, J.H., HIGGINSON, J.K. (1986). Customer Service vs Trim Waste in Corrugated Box Manufacture, Journal of the Operational Research Society, vol. 37, pp. 1061-1071.

BOWERS, M.R., KAPLAN, L.A., HOOKER, T.L. (1995). A Two-Phase Model for Planning the Production of Aluminum Ingot, European Journal of Operational Research, vol. 81, pp.105-114.

CHENG, C.H., FEIRING, B.R., CHENG, T.C.E. (1994). The Cutting Stock Problem – A Survey, International Journal of Production Economics, vol. 36, pp. 291-305.

CHIOTTI, O.J.A., MONTAGNA, J.M. (1998). A Global Approach for the Provision of Bar Pieces in a Metallurgical Firm, Mathematical and computer modeling, vol. 29, pp. 73-89.

CONWAY, R.W., MAXWELL, W.L., MILLER, L.W. (1967). Theory of Scheduling, Addison-Wesley, Massachusetts, 294 pages.

COVERDALE, I., WHARTON, F. (1976). An Improved Heuristic Procedure for Nonlinear Cutting Stock Problem, Management Science, vol. 23, pp. 78-86.

DE, P., GHOSH, J.B., WELLS, C.E. (1990). CON Due-Date Determination and Sequencing, Computers and Operations Research, vol. 17, pp. 333-344.

DOS SANTOS-MEZA, E., DOS SANTOS, M.O., ARENALES, M.N. (2002). A Lot-Sizing Problem in an Automated Foundry, European Journal of Operational Research, vol. 139, pp. 490-500.

DOWSLAND, K.A. (1993). Some Experiments With Simulated Annealing Techniques for Packing Problems, European Journal of Operational Research, vol. 68, pp. 389-399.

DYCKHOFF, H., KRUSE, H.J., ABEL, D., GAL, T. (1985). Trim Loss and Related Problems, OMEGA, vol. 13, pp.59-72.

DYCKHOFF, H. (1990). A typology of cutting and packing problems, European Journal of Operational Research, vol. 44, pp.145-159.

EISEMANN, K. (1967). The trim problem, Management Science, vol.3, pp.279-284.

FARLEY, A.A. (1988). Mathematical Programming Models for Cutting-Stock Problems in the Clothing Industry, Journal of Operational Research Society, vol. 39, pp. 41-53.

FRANÇA, P.M., GENDREAU, M., LAPORTE, G., MÜLLER, F.M. (1996). A Tabu Search Heuristic for the Multiprocessor Scheduling Problem with Sequence Dependant Setup Times, International Journal of Production Economics, vol. 43, pp. 79-89.

FOURER, Robert., GAY, David M., KERNIGHAN, Brian W. (2003). AMPL: A Modeling Language for Mathematical Programming, 2e edition, Thomson Brooks/Cole, Californie, 517 pages.

GIANNELOS N.F., GEORGIADIS, M.C. (2001). Scheduling of cutting-stock processes on multiple parallel machines, Transactions of the Institute of Chemical Engineers, vol. 79, pp. 747-753.

GILMORE, P.C., GOMORY, R.E. (1961). A Linear Programming Approach to the Cutting-Stock Problem, Operations Research, vol. 9, pp.849-859.

GILMORE, P.C., GOMORY, R.E. (1963). A Linear Programming Approach to the Cutting-Stock Problem – Part II, Operations Research, vol. 11, pp.863-888.

GOLDEN, B.L. (1976). Approaches to the Cutting Stock Problem, AIIE Transactions, vol.8, pp.265-274.

GOULIMIS, C. (1990). Optimal Solutions for the Cutting Stock Problem, European Journal of Operational Research, vol. 44, pp.197-208.

GRAVEL, M., PRICE, W.L., GAGNÉ, C. (2000). Scheduling Jobs in an Alcan an Aluminium Foundry Using a Genetic Algorithm, International Journal of Production Research, vol. 38, pp.3031-3041.

GRAVEL, M., PRICE, W.L., GAGNÉ, C. (2002). Scheduling Continuous Casting of Aluminium Using a Multiple Objective Ant Colony Optimization Metaheuristic, European Journal of Operational Research, vol. 143, pp.218-229.

HAESSLER, R.W. (1971). A Heuristic Programming Solution to a Nonlinear Cutting Stock Problem, Management Science, vol.17, pp. B793-B-802.

HAESSLER, R.W., SWEENEY, P.E. (1991). Cutting Stock Problems and Solution Procedures, European Journal of Operational Research, vol. 54, pp.141-150.

HARJUNKOSKI, I., WESTERLUND, T., ISAKSSON, J., SKRIFVARS, H. (1996). Different Formulations for Solving Trim Loss Problems in a Paper-Converting Mill with ILP, Computers and Chemical Engineering, vol. 20, pp.S121-S126.

HENDRY, L.C., FOK, K.K., SHEK, K.W. (1996). A Cutting Stock and Scheduling Problem in the Copper Industry, Journal of the Operational Research Society, vol. 47, pp. 38-47.

HINXMAN, A.I. (1980). The Trim Loss and Assortment Problems: A Survey, European Journal of Operational Research, vol. 5, pp.8-18.

JACOBS, T.L., WRIGHT, J.R., COBBS, A.E. (1988). Optimal Inter-Process Steel Production Scheduling, Computers and Operations Research, vol. 15, pp. 497-507.

KANTOROVICH, L.V. (1960). Mathematical Methods of Organizing and Planning Production, Management Science, vol. 6. pp.366-422.

LASDON, L.S. (1970). Optimization Theory for Large Systems, Macmillan, New York, 523 pages.

LAWLER, E.L., LENSTRA, J.K., RINNOOY KAN, A.H.G., SHMOYS, D.B. (1993). Sequencing and Scheduling: Algorithms and Complexity (ch. 9), in: Logistics of Production and Inventory, GRAVES, S.C., ZIPKIN, P.H., RINNOOY KAN, A.H.G. (eds), North-Holland, New York, pp. 445-522.

LEE, Y.H., PINEDO, M. (1997). Scheduling Jobs on Parallel Machines with Sequence-Dependent Setup Times, European Journal of Operational Research, vol. 100, pp. 464-474.

LEONG, G.K., OLIFF, M.D. (1990). A Sequencing Heuristic for Dependent Setups in a Batch Processing Industry, OMEGA, vol.18, pp.283-297.

MACCARTHY, B.L., LIU, J. (1993). Addressing the Gap in Scheduling Research: A Review of Optimization and Heuristic Methods in Production Scheduling, International Journal of Production Research, vol. 31, pp. 59-79.

MASRI, K., WARBURTON, A. (1998). Using Optimization to Improve the Yield of an Aluminium Extrusion Plant, Journal of the Operational Research Society, vol. 49, pp. 1111-1116.

METZGER, R.W. (1958). Stock Slitting (ch. 8), in: Elementary Mathematical Programming, Wiley, New York, pp. 200-210.

- NICHOLLS, M.G. (1994). Optimizing the Operations of an Ingot Mill in an Aluminium Smelter, Journal of the Operational Research Society, vol. 45, pp. 987-998.
- NONAS, S.L., THORSTENSON. A. (2000). A Combined Cutting-Stock and Lot-Sizing Problem, European Journal of Operational Research, vol. 120, pp.327-342.
- OGBU, F.A., SMITH, D.K. (1990). The Application of the Simulated Annealing Algorithm to the Solution of the $n / m / C_{max}$ Flowshop Problem, Computers and Operations Research, vol. 17, pp. 243-253.
- OSTERMARK, R. (1999). Solving a Nonlinear Non-Convex Trim Loss Problem with a Genetic Hybrid Algorithm, Computers and Operations Research, vol. 26, pp. 623-635.
- PAN, Y. (2003). An Improved Branch and Bound Algorithm for Single Machine Scheduling with Deadlines to Minimize Total Weighted Completion Time, Operations Research Letters, vol. 31, pp. 492-496.
- PANWALKAR, S.S., ISKANDER, W. (1977). A Survey of Scheduling Rules, Operations Research, vol. 25, pp. 45-61.
- PAULL, A.E. (1956). Linear Programming : A Key to Optimum Newsprint Production, Pulp and Paper Magazine of Canada, vol. 57, pp. 85-90.
- PIERCE, J.F. (1964). Some Large-Scale Production Scheduling Problems in the Paper Industry, Englewood Cliffs, New Jersey, 255 pages.
- PINEDO, M. (2002). Scheduling: Theory, Algorithms and Systems, 2^e édition, Prentice-Hall, New Jersey, 586 pages.

RINNOOY KAN, A.H.G. (1976). Machine scheduling problems: classification, complexity and computations, Martinus Nijhoff, The Hague, 180 pages.

ROODMAN, G.M. (1986). Near-Optimal Solutions to One-Dimensional Cutting Stock Problems, Computers and Operations Research, vol. 13, pp. 713-719.

SADOWSKI, W. (1960). A Few Remarks on the Assortment Problem, Management Science, vol. 6. pp.13-24.

STADTLER, H. (1990). A One-Dimensional Cutting Stock Problem in the Aluminium Industry and its Solution, European Journal of Operational Research, vol. 44, pp. 209-223.

STOOP, P.P.M, WIERS, V.C.S. (1996). The Complexity of Scheduling in Practice, International Journal of Operations and Production Management, vol. 16, pp. 37-53.

SWEENEY, P.E., HAESSLER, R.W. (1990). One-Dimensional Cutting Stock Decisions for Rolls with Multiple Quality Grades, European Journal of Operational Research, vol. 44, pp. 224-231.

SWEENEY, P.E., PATERNOSTER, E.R. (1991). Cutting and Packing Problems: An Updated Literature Review, Working Paper No. 654, University of Michigan, School of Business, 41 pages.

THOMAS, L.J., MCCLAIN, J.O. (1993). An Overview of Production Planning (ch. 7), in: Logistics of Production and Inventory, GRAVES, S.C., ZIPKIN, P.H., RINNOOY KAN, A.H.G. (eds), North-Holland, New York, pp. 333-370.

VAN VOORHIS, T., PETERS, F., JOHNSON, D. (2001). Developing Software for Generating Pouring Schedules for Steel Foundries, Computers and Industrial Engineering, vol. 39, pp. 219-234.

WESTERLUND, T., ISAKSSON, J. (1998). Some Efficient Formulations for the Simultaneous Solution of Trim-Loss and Scheduling Problems in the Paper-Converting Industry, Transactions of the Institute of Chemical Engineers, vol. 76, pp. 677-684.

WOLFSON, M.L. (1965). Selecting the Best Lengths to Stock, Operations Research, vol. 13, pp.570-585.

TRAVAUX DE MAÎTRISE ET DE DOCTORAT

KARELAHTI, J. (2002). Solving the Cutting Stock Problem in the Steel Industry, 77 pages, Mémoire de maîtrise en recherché opérationnelle, Helsinki University of Technology, Finlande.

SMITH, N.R. (1997). An Integrated Solution Methodology for Two-Stage Manufacturing Operations, 193 pages, Thèse de doctorat en génie industriel, Georgia Institute of Technology, États-Unis.

LOGICIELS ET RESSOURCES INTERNET

AMPL : A Modeling Language for Mathematical Programming, (Bell Labs Innovations, Lucent Technologies) solveur utilisé : CPLEX 8.0 Student Edition, URL www.ampl.com et www.ampl.com/NEW/tables.html (2.53 Mo).

ANNEXE A

PROGRAMMATION DU MODÈLE ÉLABORÉ

1. Interface de saisie de données

L'interface du modèle élaboré pour améliorer la planification de la production a été développée à l'aide du logiciel Microsoft Excel.

Pièces demandées		Bruts disponibles		Alliages demandés	
PIECE	LNG_PIECE	BRUT	LNG_BRUT	ALLIAGE	No_ALLIAGE
P1	500	B83	6430	A1	00000
P12	550	B71	5910		
P16	600	B50	5800		
P18	700	B42	5280		

Autres paramètres					
TETE	PIED	TRAIT	SCIE		
300		10			

Diamètres demandés				QTE_MIN QTE_MAX	
DIAMETRE	DIAM	NB_BILLETTES	TON_MM	QTE_MIN	QTE_MAX
D2	200	80	0,0500	0,9	1,1

Pièces par brut					
		BRUT			
		6430	5910	5800	5280
PIECE		B83	B71	B50	B42
500	P1	10	10	10	9
550	P12	8	9	8	8
600	P16	7	7	7	7
700	P18	7	7	7	7

Demande (qté pièces)					
		PIECE			
		500	550	600	700
DIAMETRE	ALLIAGE	P1	P2	P3	P4
D2	A1	1200	1107	63	77

Figure A.1 : Interface du modèle développé

2. Programmation de l'application

La résolution de ce modèle est effectuée au moyen des liens ODBC (*Open Database Connectivity*) entre Microsoft Excel et le logiciel de programmation mathématique AMPL (solveur CPLEX). Deux types de fichiers sont utilisés par AMPL : le fichier contenant le modèle (.mod) et le fichier d'exécution (.run).

Fichier .mod

```

‘ Définition des ensembles
set PIECE;                                # pièces demandées (l)
set BRUT;                                   # billettes brutes (j)
set ALLIAGE;                                 # alliages disponibles (a)
set DIAMETRE;                               # diamètres possibles des billettes brutes et des pièces (d)

‘ Définition des paramètres
param LNG_BRUT {BRUT} >=0;                  # longueur des bruts j (mm)
param LNG_PIECE {PIECE} >=0;                 # longueur des pièces l (mm)
param NB_BILLETES {DIAMETRE} >=0;             # nbr de billettes de diamètre d par coulée
param TON_MM {DIAMETRE} >=0;                  # tonnage généré par mm
param PIECE_BRUT {PIECE, BRUT} >=0;           # nombre de pièces l dans brut j
param DEMANDE {PIECE, DIAMETRE, ALLIAGE} >=0; # nbr de pièces de type lda demandées
param TRAIT_SCIE := 10;                        # largeur du trait de scie (mm)
param TETE_PIED := 300;                        # longueur de la tête et du pied (mm)
param QTE_MIN := 0.9;                          # proportion min envoyée au client
param QTE_MAX := 1.1;                          # proportion max envoyée au client

‘ Définition des variables
var COULEE {j in BRUT, d in DIAMETRE, a in ALLIAGE} >=0, integer;
var BRUT_PIECE {l in PIECE, j in BRUT, d in DIAMETRE, a in ALLIAGE} >=0, integer;
var NB_VENDUES {l in PIECE, d in DIAMETRE, a in ALLIAGE} >=0, integer;
var PIECE_SUPP {l in PIECE, d in DIAMETRE, a in ALLIAGE} >=0, integer;

‘ Fonction objectif
minimize TONNAGE {d in DIAMETRE, a in ALLIAGE}:
    sum {j in BRUT} (LNG_BRUT [j] * TON_MM [d] * NB_BILLETES [d] * COULEE
    [j,d,a]) - sum {l in PIECE} (LNG_PIECE [l] * TON_MM [d] * NB_VENDUES [l,d,a]);

```

```

‘ Définition des contraintes
subject to DEM {l in PIECE, d in DIAMETRE, a in ALLIAGE} :
    (QTE_MIN * DEMANDE [l,d,a]) <= NB_VENDUES [l,d,a] <= (QTE_MAX *
    DEMANDE [l,d,a]);

subject to DISPO {j in BRUT, d in DIAMETRE, a in ALLIAGE} :
    sum {l in PIECE} BRUT_PIECE [l,j,d,a] <= (COULEE [j,d,a] * NB_BILLETTES [d]);

subject to VENTE {l in PIECE, d in DIAMETRE, a in ALLIAGE} :
    NB_VENDUES [l,d,a] <= sum {j in BRUT} (PIECE_BRUT [l,j] * BRUT_PIECE [l,j,d,a]);

subject to SUPP {l in PIECE, d in DIAMETRE, a in ALLIAGE}:
    PIECE_SUPP [l,d,a] >= sum {j in BRUT} (PIECE_BRUT [l,j] * BRUT_PIECE [l,j,d,a]) -
    NB_VENDUES [l,d,a];

```

Fichier .run

```

option solver cplex;

model Planif.mod;

‘ Lecture des tables de données
table LireBrut IN "ODBC" "TestModele.xls" "Bruts":
    BRUT <- [BRUT], LNG_BRUT;

table LirePiece IN "ODBC" "TestModele.xls" "Pieces":
    PIECE <- [PIECE], LNG_PIECE;

table LireDiametre IN "ODBC" "TestModele.xls" "Diametres":
    DIAMETRE <- [DIAMETRE], NB_BILLETTES, TON_MM;

table LireAlliage IN "ODBC" "TestModele.xls" "Alliages":
    ALLIAGE <- [ALLIAGE];

table LireDemande IN "ODBC" "TestModele.xls" "Demande":
    [d ~ DIAMETRE, a ~ ALLIAGE], {l in PIECE} <DEMANDE [l,d,a] ~ (l)>;

table LirePiecesBrut IN "ODBC" "TestModele.xls" "PiecesBrut":
    [l ~ PIECE], {j in BRUT} <PIECE_BRUT [l,j] ~ (j)>;

read table LireBrut;
read table LirePiece;
read table LireDiametre;
read table LireAlliage;
read table LireDemande;
read table LirePiecesBrut;

```

```
solve;  
‘ Écriture des résultats  
table EcrireCoulees OUT "ODBC" "TestModele.xls" "Coulees":  
[BRUT, DIAMETRE, ALLIAGE], COULEE;  
  
table EcrireNBVendues OUT "ODBC" "TestModele.xls" "NBVendues":  
[PIECE, DIAMETRE, ALLIAGE], NB_VENDUES;  
  
table EcrireSupp OUT "ODBC" "TestModele.xls" "Suppl":  
[PIECE, DIAMETRE, ALLIAGE], PIECE_SUPP;  
  
table EcrireBrutPieces OUT "ODBC" "TestModele.xls" "BrutPieces":  
[PIECE, BRUT, DIAMETRE, ALLIAGE], BRUT_PIECE;  
  
write table EcrireCoulees;  
write table EcrireNBVendues;  
write table EcrireSupp;  
write table EcrireBrutPieces;
```

ANNEXE B

PRÉSENTATION D'UN ARTICLE

L'article suivant a été présenté lors 6^e Congrès international de génie industriel qui avait lieu du 7 au 10 juin 2005 à Besançon, France. Ce dernier expose les résultats partiels du présent travail de recherche.

Planification intégrée de la fonte, de la découpe et de l'ordonnancement des commandes dans une fonderie d'aluminium

Martin TRÉPANIER¹, Pierre BAPTISTE¹, Annie VINCENT¹

¹ École Polytechnique de Montréal, Département de mathématiques et de génie industriel, C.P. 6079, succursale Centre-Ville, Montréal, Québec, Canada, H3C 3A7 (mtrepanier@polymtl.ca , pierre.baptiste@polymtl.ca , annie.vincent@polymtl.ca)

RÉSUMÉ : Bien que largement étudiés dans la littérature, les problèmes d'ordonnancement pris un à un ne peuvent généralement pas être appliqués en industrie à cause des conditions de terrain. Dans cet article, nous présentons plutôt un modèle intégrant diverses activités d'un atelier monogamme, soit les opérations de fonte, de coulée et de découpe de billes d'aluminium. Le modèle vise non seulement à identifier les meilleures pratiques devant être instituées en relation avec la demande actuelle, mais il pourra être utilisé pour évaluer l'impact de différentes mesures pouvant conduire à l'amélioration globale du processus, tel que l'ajustement des politiques de prix afin d'uniformiser les commandes des clients, la maximisation du tonnage généré par coulée, le re-séquencement des alliages fondus, la modification des équipements, etc.

MOTS-CLÉS : Planification et ordonnancement, planification intégrée, fonderie, découpe

1. Introduction

Les problèmes d'ordonnancement pris un à un (monomachine, atelier monogamme simple ou hybride) ont largement été étudiés dans la littérature. On trouve malheureusement peu d'entreprises où ces modèles d'ordonnancement sont applicables en totalité car les conditions du terrain viennent influer la configuration et le pilotage de la production (Stoop et Wiers, 1996). L'interdépendance des activités commande – production – entreposage – expédition ajoute au défi.

Dans cet article, nous présentons un modèle intégrant les opérations de fonte, de coulée et de découpe en vue d'effectuer l'ordonnancement des commandes pour une fonderie d'aluminium. Cette intégration s'est avérée nécessaire après l'étude, en vain, des trois

activités de façon indépendante. Nous montrerons la nécessité de traiter les opérations simultanément, malgré la complexité de modélisation qui y est associée. Nous tenterons également d'identifier les meilleures pratiques (*best practices*) découlant de cette modélisation, ce qui est, à notre avis, une excellente façon de rendre l'ordonnancement utile aux planificateurs de l'entreprise.

Après une mise en contexte du problème, l'article présente des travaux pertinents portant sur l'ordonnancement en fonderie et sur l'ordonnancement intégré en général. Un modèle mathématique est présenté et mis en parallèle aux méthodes actuellement adoptées par la fonderie. Suite à la présentation des résultats et des analyses de l'expérimentation, la problématique sera remise en perspective.

2. Contexte

Le système de production étudié est une fonderie d'aluminium. Le métal en fusion, provenant d'un centre d'électrolyse, est déversé dans deux fours au sein desquels sont réalisés les alliages. Le métal liquide est ensuite versé dans des moules afin de produire des billes d'aluminium aux dimensions variables. Les lots fabriqués sont caractérisés par un alliage, un diamètre et une longueur donnés. La grosseur de ces lots dépend uniquement du diamètre sélectionné. La production est effectuée alternativement à partir du contenu de chacun des fours à raison de deux coulées par four. Évidemment, deux coulées successives sont couplées du fait du volume d'un four. Les billes ainsi produites sont par la suite coupées afin d'obtenir les pièces demandées par les clients. Le nombre de pièces obtenues à partir d'une bille dépend de la taille de celle-ci, de la longueur de la pièce désirée et des pertes inhérentes à la coupe. Finalement, ces pièces sont entreposées par longueur, diamètre et alliage.

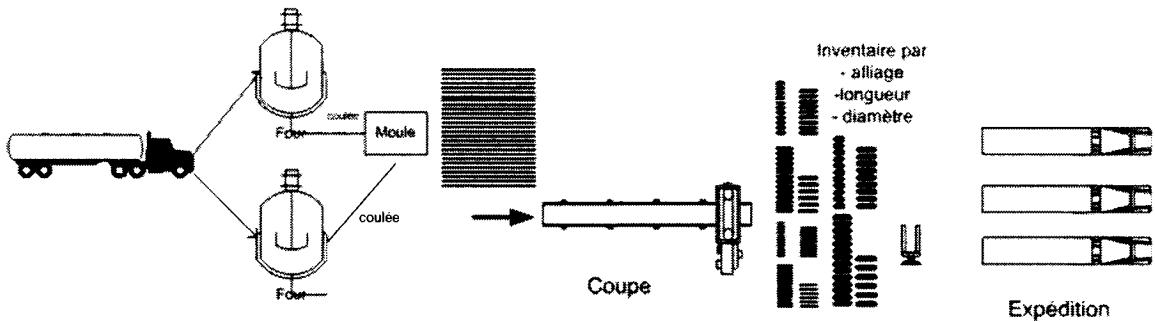


Figure B.1 : Organisation de la fonderie

La vision actuelle de ce système est très fonctionnelle:

- Optimisation des coulées, c'est-à-dire détermination de la quantité à produire en fonction des besoins d'alliages et de diamètres. Le coût de passage d'un alliage à l'autre est variable et dépend de la séquence (les fours ne doivent pas forcément être vidés). Les coûts de changements de diamètres sont importants et doivent être évités;
- Optimisation de la découpe afin de minimiser les chutes. La coupe est effectuée selon la séquence d'arrivée des lots tout en sachant qu'une bille n'est coupée qu'en une seule longueur à la fois et que la longueur des billes varie d'un lot à l'autre;
- Optimisation des expéditions en minimisant les retards selon les pièces disponibles.

Schématiquement, en termes d'ordonnancement, on peut dire que chaque niveau est pris comme un problème d'ordonnancement de machines parallèles ou monomachine qui prend les données du niveau amont et cherche à optimiser ses propres critères en prenant au mieux les critères du niveau aval sous forme de contraintes.

Notons aussi une certaine flexibilité. D'une part, les déchets (pertes de coupe dues à l'inéquation entre la taille des pièces et celles des billes, les sciures, la tête et le pied des billes ainsi que les pièces supplémentaires) ne sont pas des pertes sèches : elles peuvent être recyclées lors de la préparation des alliages. On tente cependant de les minimiser afin d'éviter les coûts de refonte et d'entreposage. D'autre part, les clients sont tenus d'accepter une quantité livrée de plus 10% ou moins 10% par rapport à la commande effectuée (termes actuels du contrat).

Malgré ces marges de manœuvre, le traitement indépendant de chaque niveau n'est intéressant que si l'espace de décision de chacun est assez important. Cependant, puisque la production est effectuée en continu, qu'il n'y a pas d'entreposage intermédiaire ni de permutation de la séquence d'arrivée des billes entre deux postes de travail (dû à l'équipement de manutention et aux caractéristiques physiques importantes des billes), la performance du poste de découpe dépend étroitement de l'ordonnancement adopté à la coulée. Le traitement indépendant de chaque niveau induit alors des inventaires très importants et en conséquence, des temps de cycle trop longs vis-à-vis du marché.

Une vision intégrée de la fonderie sous la forme d'un atelier monogamme hybride permet d'aborder le problème sous une forme globale en intégrant les préoccupations de chaque acteur:

- la mise en four (affectation au four et ordonnancement des alliages);
- la coulée (choix et ordonnancement des moules, choix des longueurs);
- la coupe (choix du plan de coupe pour chaque bille);
- l'expédition (remplir les camions par client).

3. Fondements

Les travaux comparables et susceptibles de nous éclairer sont trouvés dans l'ordonnancement de fonderies, d'ateliers monogammes ou dans l'ordonnancement intégré (utilisation de l'ordonnancement comme outil d'intégration entre fonctions). Voici une liste de travaux qui ont attiré notre attention.

Van Vorrhis et al. (2001) ont développé un modèle de programmation en nombres entiers afin d'automatiser le processus d'ordonnancement des coulées d'une fonderie d'acier. L'objectif principal est d'estimer l'impact des séquences de coulée sur la quantité d'en-cours des opérations en aval tout en minimisant les réglages, les retards et la sous-utilisation des équipements.

De leur côté, Gravel et al. (2000, 2002) ont étudié l'ordonnancement de la production dans une aluminerie. Dans ce cas particulier, la coulée est effectuée de façon horizontale continue, c'est-à-dire que les fours sont continuellement approvisionnés en métal liquide et que les opérations subséquentes sont réalisées sans interruption du flux de métal. La production n'est arrêtée que s'il faut changer l'alliage ou la section transversale du produit. L'objectif de cette étude est de déterminer les séquences de production qui minimisent les retards et les pénuries de métal, compte tenu des disponibilités des équipements.

Un problème d'ordonnancement similaire a été traité par Jacobs et ses collaborateurs (1988) dans une fonderie d'acier. Ces derniers cherchent à déterminer l'horaire optimal de production pour un poste de laminage à chaud, continuellement approvisionné par un poste de coulée. Le modèle repose sur la minimisation du niveau d'inventaire, la maximisation du revenu ainsi que de la production.

De leur côté, Bookbinder et Higginson (1986) ont réalisé un modèle de découpe intégré dans une usine de carton ondulé qui prend en considération la capacité et temps de traitement des postes de travail en aval (impression, pliage et assemblage) afin d'assurer un respect des dates de livraison, et non seulement la minimisation des pertes de coupe.

Chiotti et Montagna (1998) ont développé une approche globale afin de minimiser les pertes et la production supplémentaire dans une entreprise métallurgique. Cette approche prend en considération toutes les activités incluses dans l'approvisionnement des barres de métal, de l'achat des pièces à leur assemblage, et cherche à identifier les patrons de coupe optimaux de même que leur séquence de production.

Hendry et al. (1996) ont étudié les problèmes de découpe et d'ordonnancement pour une fonderie de cuivre où les opérations de fonte, de coulée et de coupe des billettes sont intimement reliées. L'objectif de cette étude est de générer un plan de production de même que les plans de coupe utilisés afin de minimiser les coûts de production (l'utilisation des fours et les pertes de coupe) et de répondre à la demande.

Tous les modèles présentés ci-dessus traitent des problèmes d'ordonnancement intégré dans les fonderies ou les ateliers monogammes. Cependant, la plupart d'entre eux n'incluent pas la problématique de découpe et sont donc de faible utilité pour la présente étude. Certes, les trois derniers articles abordent cette question mais ne présentent pas de potentiel intéressant pour deux principales raisons. En effet, ces travaux se réfèrent au problème classique de découpe dans lequel le matériel de longueur fixe est découpé en pièces selon certains patrons, ce qui ne représente pas les contraintes étudiées. De plus, la relation entre les dimensions des lots produits et la quantité de pièces demandées n'est adressée dans aucune de ces recherches.

4. Méthodologie

4.1 Modèle mathématique

Afin de résoudre le problème expliqué précédemment, il faut tout d'abord déterminer le nombre de coulées d'un certain type (i.e. alliage, diamètre et longueur) à effectuer dans une période pour répondre à la demande des clients. Le modèle doit également minimiser les pertes totales, tant au niveau des têtes/pieds/sciures que des bouts inutilisés et des pièces supplémentaires générées.

La quantité de pièces produites dans une période dépend de deux principaux facteurs : le nombre de moules de la table de coulée (qui est fonction du diamètre des pièces) et le nombre de coulées effectuées d'une certaine combinaison diamètre-alliage. Le modèle doit également tenir compte des contraintes de découpe des pièces, c'est-à-dire la coupe d'une seule longueur de pièces par bille, ainsi que des tolérances au niveau des quantités de produits demandés par les clients. Il est à noter que les pièces d'un certain couple diamètre-alliage produites dans une même coulée peuvent être destinées à satisfaire les demandes de plusieurs clients différents. Voici le modèle proposé.

Indices

$a = 1, \dots, X_a$	indice des alliages offerts ($X_a = 36$)
$d = 1, \dots, X_d$	indice des diamètres offerts ($X_d = 5$)
$l = 1, \dots, X_l$	indice des pièces demandées ($X_l = 100$)
$j = 1, \dots, X_j$	indice des billes brutes produites ($X_j = 100$)

Paramètres

$Q_{l da}$	nombre de pièces l de diamètre d et d'alliage a demandées par les clients (cette quantité peut représenter les demandes de plusieurs clients)
------------	---

Λ_j	longueur de la bille brute j (mm)	$\Lambda_j \in \{5000, 5050, \dots, 7000\}$
λ_l	longueur de la pièce l (mm)	$\lambda_l \in \{500, 525, 4, \dots, 6690\}$
N_d	nombre de billes par coulée de diamètre d	$N_d \in \{50, 60, \dots, 100\}$
μ_d	poids par mm d'une bille de diamètre d (kg)	$\mu_d \in \{0.05, \dots, 0.150\}$
σ	largeur du trait de scie pour la coupe (mm)	$\sigma = 10$
τ	largeur totale de la tête et du pied des billes à retirer lors de la coupe (mm)	$\tau = 300$
θ_{\min}	proportion minimale de la demande exigée par le client	$\theta_{\min} = 0,90$
θ_{\max}	proportion maximale de la demande exigée par le client	$\theta_{\max} = 1,1$

Variables

n_{lj}	nombre de pièces l qu'il est possible de couper dans les billes j (indépendamment du diamètre d et de l'alliage a, i.e. $n_{lj} = n_{ljda}$)
C_{jda}	nombre de coulées de billes j de diamètre d et d'alliage a effectuées
B_{jlda}	nombre de billes j de diamètre d et d'alliage a qui seront coupées en pièces l
V_{lda}	quantité de pièces l de diamètre d et d'alliage a vendues
S_{lda}	quantité de pièces l de diamètre d et d'alliage a excédentaires

Fonction objectif

La fonction objectif du modèle vise à minimiser les pertes de coupe totales, soit la différence entre la quantité de métal produite et la quantité de pièces vendues.

$$\text{Min} \quad \sum_{a=1}^{N_a} \sum_{d=1}^{N_d} \left[\sum_{j=1}^{N_j} (\Lambda_j \cdot \mu_d \cdot N_d \cdot C_{jda}) - \sum_{l=1}^{N_l} (\lambda_l \cdot \mu_d \cdot V_{lda}) \right]$$

sujet à

$$\forall j \forall l \quad [(\Lambda_j - \tau - \sigma) / (\lambda + \sigma)] - 1 < n_{lj} \leq (\Lambda_j - \tau - \sigma) / (\lambda + \sigma) \quad (\text{nombre de pièces par bille})$$

$$\forall l \forall d \forall a \quad \theta_{\min} Q_{lda} \leq V_{lda} \quad (\text{satisfaire la demande})$$

$$\forall l \forall d \forall a \quad V_{lda} \leq \theta_{\max} \cdot Q_{lda}$$

$$\forall j \forall d \forall a \quad \sum_{l=1}^{N_l} B_{ljda} \leq (C_{jda} \cdot N_d) \quad (\text{nombre de bruts disponibles})$$

$$\forall l \forall d \forall a \quad V_{lda} \leq \sum_{j=1}^{N_j} (n_{lj} \cdot B_{ljda}) \quad (\text{pièces vendues})$$

$$\forall l \forall d \forall a \quad S_{lda} \geq \sum_{j=1}^{N_j} (n_{lj} \cdot B_{ljda}) - V_{lda} \quad (\text{pièces supplémentaires})$$

$$\forall j \forall d \forall a \forall l \quad n_{lj}, B_{jlda}, C_{jda}, V_{lda}, S_{lda} \geq 0 \text{ et entiers}$$

4.2 Simplification du modèle

Le modèle global présenté ci-dessus comporte un nombre important de contraintes et de variables à plusieurs modalités (5 diamètres, 36 alliages, 100 longueurs de pièces et 100 longueurs de billes). La résolution d'un problème de cette taille est des plus délicates et il importe d'effectuer un certain nombre de simplifications afin d'obtenir des résultats viables.

4.2.1 Élimination de la contrainte non linéaire

Tout d'abord, la variable n_{lj} , c'est-à-dire le nombre de pièces l qu'il est possible de couper dans les billes j , a été convertie en paramètre. En effet, puisque les valeurs que peut prendre cette variable sont limitées à l'intérieur de l'horizon de planification, il est relativement aisés de les calculer et de les inclure dans le modèle. La contrainte non linéaire correspondante, $[(\Lambda_j - \tau - \sigma)/(\lambda + \sigma)] - 1 < n_{lj} \leq (\Lambda_j - \tau - \sigma)/(\lambda + \sigma)$, a donc été éliminée pour faciliter la résolution du problème.

4.2.2 Planification pour un seul couple diamètre-alliage

Les lots générés lors de la coulée possèdent des caractéristiques fixes (alliage, diamètre et longueur) et la planification de la production de ces lots est indépendante de la séquence adoptée, i.e. peu importe l'ordonnancement des lots, il est nécessaire de produire les coulées demandées. Dans cette optique, il est donc possible de réaliser la planification de la production pour un seul couple diamètre-alliage à la fois. Les sommes $\sum_{a=1}^{N_a} \sum_{d=1}^{N_{ad}}$ peuvent alors être éliminées puisque $a=d=1$.

De plus, cette simplification permet de comparer directement les plans de production générés par le modèle à ceux du système utilisé actuellement par la fonderie. En effet, le logiciel employé ne peut traiter qu'un couple diamètre-alliage à la fois.

4.2.3 Diminution de l'éventail de longueurs des billes

Afin de déterminer les coulées à produire lors d'une période donnée, il n'est pas nécessaire d'inclure l'éventail complet des longueurs de billes brutes (Λ_j) dans le modèle. En effet, il est possible de considérer uniquement les longueurs dans lesquelles il est possible de couper une grande pièce ou plusieurs petites pièces (de la même longueur), tout en considérant les pertes associées à la coupe. De plus, il existe une longueur optimale pour chacune des pièces demandées, c'est-à-dire une longueur générant peu ou pas de pertes de coupe. À chacune des résolutions, il sera donc possible de n'utiliser qu'une sélection des longueurs de billes disponibles.

5. Expérimentation

Les résultats des tests présentés dans ce travail ont été obtenus en utilisant les demandes moyennes pour un seul couple diamètre-alliage à l'intérieur de l'horizon de planification, c'est-à-dire l'équivalent de trois coulées (150 000 kg). Les pièces demandées sont déterminées aléatoirement parmi les longueurs les plus populaires et les quantités correspondantes sont réparties arbitrairement sur les trois coulées. Les résultats exposés représentent la moyenne des essais réalisés pour plusieurs combinaisons de longueurs différentes. Puisque aucune perte n'est générée lors de la demande d'une seule longueur, mis à part les inévitables pertes de coupe, les expériences visent à étudier l'impact de deux longueurs et plus sur ces trois coulées.

5.1 Comparaison des pertes engendrées

Tel que présenté dans le tableau 1, le modèle élaboré permet une diminution des pertes totales entre 20 et 39%, comparativement au système de planification utilisé actuellement à la fonderie. Ces pertes incluent les chutes inhérentes à la coupe (têtes/pieds/sciures), à l'inéquation entre les longueurs des billes et celles des pièces demandées (longueurs multiples) ainsi qu'aux pièces supplémentaires générées par les coulées. Puisque les pertes dues à la coupe proprement dite sont pratiquement constantes pour les deux méthodes de planification (aucun changement d'équipement de production), cette diminution est principalement reliée à la réduction des deux autres types de pertes : les longueurs multiples et les pièces supplémentaires.

Tableau B.1 : Pertes totales selon le nombre de longueurs demandées

Nombre de longueurs	Pertes (kg) Système actuel	Pertes (kg) Modèle proposé	Écart
2	9467,16	7588,77	-19,84 %
3	10897,12	7510,85	-31,07 %
4	11279,40	7920,03	-29,78 %
5	12193,46	8272,72	-32,15 %
6	13467,92	8241,14	-38,81 %

Les longueurs multiples sont le résultat direct de l'utilisation d'un système de planification qui ne tient pas compte des contraintes des diverses opérations de production. En effet, le système actuel cherche uniquement à minimiser les pertes de la plus petite pièce demandée (ou de la pièce la plus longue si ces dernières sont supérieures à 4690 mm). Pour cela, il génère une ou plusieurs coulées de billes ayant une longueur brute optimale pour cette pièce, c'est-à-dire une longueur qui ne produit que des pertes de coupe. Le système ne se soucie pas de l'impact de ce choix sur la coupe des autres pièces. Les résultats présentés dans le tableau B.2 soulignent la pertinence d'un modèle intégré.

Tableau B.2 : Pertes dues aux longueurs multiples

Nombre de longueurs	Système actuel		Modèle proposé	
	Pertes (kg)	Proportion de la production annuelle	Pertes (kg)	Proportion de la production annuelle
2	1734,19	1,23 %	831,28	0,73 %
3	2304,00	1,42 %	604,62	0,54 %
4	3371,54	2,00 %	1009,47	0,85 %
5	3008,23	1,65 %	1519,15	1,23 %
6	4622,69	2,30 %	1306,71	1,06 %

L'échantillon des longueurs et des quantités utilisées lors des essais permet de réduire les pertes dues aux longueurs multiples de 66%, ce qui non négligeable pour une fonderie produisant plus de 100 000 tonnes d'aluminium annuellement.

Les divers essais effectués démontrent que les pièces supplémentaires (i.e. nombre excédant la proportion maximale de la demande exigée par le client) sont pratiquement éliminées par l'utilisation du modèle linéaire. Dans bien des cas, les quelques produits excédentaires pourraient tout de même être expédiés aux clients puisqu'ils ne représentent pas une violation importante de la limite supérieure demandée (ajout d'une pièce supplémentaire < 112%). Dans le tableau B.3, la quantité de pièces est exprimée en unités plutôt qu'en kilogrammes afin de mieux représenter les résultats. En effet, les produits excédentaires générés par le système actuel sont habituellement les pièces les plus longues car elles sont produites en dernier et on cherche à compléter les coulées. Ces pertes sont donc plus importantes en termes de poids mais pas nécessairement en quantité.

Tableau B.3 : Quantité de pièces supplémentaires générée par commande

Nombre de longueurs	Nombre moyen de pièces Système actuel	Nombre moyen de pièces Modèle proposé
2	6,0	0,1
3	22,3	0,0
4	3,5	0,2
5	7,1	0,1
6	6,3	0,2

5.2 Comparaison du tonnage total vendu et expédié

Les termes actuels du contrat permettent à la fonderie d'expédier une proportion variable de la quantité de produits désirés par les clients (entre 90 et 110%). Il semble donc plus qu'intéressant pour les producteurs de maximiser la quantité de pièces vendues. À ce niveau, le modèle développé permet l'entrée de revenus supplémentaires pour tous les essais effectués (tableau B.4) et ce, à partir du même nombre de coulées

que le système actuel. Les symboles * indiquent que la demande minimum pour une ou plusieurs pièces lors de ces essais n'est pas satisfaite.

Tableau B.4: Satisfaction de la demande des clients

Nombre de longueurs	Système actuel (%)	Modèle proposé (%)
2	103,09	105,16
3	100,92 *	100,49
4	98,90 *	102,69
5	99,54 *	103,61
6	99,09 *	102,36

6. Conclusion

L'utilisation d'un modèle intégré pour la planification des opérations de fonte, de coulée et de découpe d'une fonderie d'aluminium est prometteuse. En effet, en utilisant le même nombre de coulées que le système de planification employé actuellement, il est possible de diminuer grandement les pertes de toutes sortes (i.e. coupe, longueurs multiples et pièces supplémentaires) et d'augmenter la quantité de produits vendue aux clients. Des tests additionnels pourraient être effectués afin de vérifier l'impact d'une variation des longueurs de pièces offertes (λ_j), des quantités minimales et maximales à expédier (θ_{\min} et θ_{\max}) ou des longueurs de billes brutes (Λ_j).

7. Perspectives

La prochaine étape de résolution consiste à réaliser l'ordonnancement des coulées nécessaires dans l'horizon de planification. L'objectif de cette démarche est de respecter les dates de livraison des commandes tout en minimisant les changements de diamètres et les modifications d'alliages. En effet, ces activités sans valeur ajoutée génèrent des temps de mise en course importants et doivent être évitées.

Ce problème n'est cependant pas simple à résoudre car un même lot de billes peut être composé de produits destinés à plusieurs clients différents, donc présenter des dates de livraison distinctes. La commande d'un client, qui doit être livrée en une seule fois, peut ainsi être fragmentée sur plusieurs coulées. En ce sens, il apparaît impossible de réaliser l'ordonnancement des coulées selon la règle de priorité EDD – *Earliest Due-Date*, soit à partir des dates de livraison promises, ou encore chercher à minimiser le temps de complétion total. Le problème ne peut non plus être considéré comme un cas pur d'ordonnancement soumis à des temps de mise en course dépendants de la séquence (*sequence dependant set-up*) car les dates de livraison doivent être respectées. La combinaison de ces deux objectifs est difficile à mettre en place dans un seul modèle mathématique, compte tenu des contraintes explicitées précédemment.

Une des pistes de solution serait de minimiser les changements de diamètres et d'alliages au moyen de la méthode du voyageur de commerce. L'analogie entre ce problème et celui d'un atelier monogamme a été effectuée entre autres par El Houda Saadani et al. (2005) ainsi que par Widmer et Hertz (1989). Il serait par la suite nécessaire de modifier cette séquence afin de minimiser le stock de produits vendus mais non expédiés, c'est-à-dire terminer la production de la commande d'un client le plus rapidement possible pour éviter de l'entreposer trop longtemps. La faisabilité de cette solution sera étudiée lors de futures recherches.

8. Remerciements

Les auteurs désirent remercier leur partenaire industriel, l'usine Alcan de Jonquière, Qc. (Alexandre Brassard et Claude Bernard).

9. Références

- BOOKBINDER, J.H., HIGGINSON, J.K. (1986). Customer Service vs Trim Waste in Corrugated Box Manufacture, Journal of the Operational Research Society, vol. 37, pp. 1061-1071.
- CHIOTTI, O.J.A., MoNTAGna, J.M. (1998). A Global Approach for the Provision of Bar Pieces in a Metallurgical Firm, Mathematical and computer modeling, vol. 29, pp. 73-89.
- EL HOUDA SAADANI, N., GUINET, A., MOALLA, M. (2005). A Travelling Salesman Approach to Solve the F/no-idle/C_{maz} Problem, European Journal of Operational Research, vol. 61, pp :11-20.
- GRAVEL, M., PRICE, W.L., GAGNÉ, C. (2000). Scheduling Jobs in an Alcan Aluminium Foundry Using a Genetic Algorithm, International Journal of Production Research, vol. 38, pp. 3031-3041.
- GRAVEL, M., PRICE, W.L., GAGNÉ, C. (2002). Scheduling Continuous Casting of Aluminium Using a Multiple Objective Ant Colony Optimization Metaheuristic, European Journal of Operational Research, vol. 143, pp. 218-229.
- HENDRY, L.C., FOK, K.K., SHEK, K.W. (1996). A Cutting Stock and Scheduling Problem in the Copper Industry, Journal of the Operational Research Society, vol. 47, pp. 38-47.
- JACOBS, T.L., WRIGHT, J.R., COBBS, A.E. (1988). Optimal Inter-Process Steel Production Scheduling, Computers & Operations Research, vol. 15, pp. 497-507.
- STOOP, P.P., WIERS, V.C. (1996). « The complexity of scheduling in practice », International Journal of Operations & Production Management, 16 (10), pp. 37-53.

VAN VOORHIS, T., PETERS, F., JOHNSON, D. (2001). Developing Software for Generating Pouring Schedule for Steel Foundries, Computers & Industrial Engineering, vol. 39, pp. 219-234.

WIDMER, M., HERTZ, A. (1989). A New Heuristic Method for the Flowshop Sequencing Problem, European Journal of Operational Research, vol. 41, pp :186-193.

ANNEXE C

COULÉE DES BILLETTES ET INSPECTION

1. Description et objectifs du mandat

Ce travail consiste à étudier les temps de mise en course de l'intercoulée en vue d'y cibler les gains potentiels. Cette période correspond au temps entre deux coulées de billettes au puits, soit le temps de sortie des produits et la préparation pour la coulée suivante. L'augmentation de la cadence de production du CC5 est nécessaire à la hausse prévue de la production pour 2006.

Afin d'étudier le processus de l'intercoulée de façon globale, ce mandat a été réalisé en deux parties. En effet, comme la vitesse de l'intercoulée est régie par celle de l'inspection (opération suivante), il est inutile de réduire le temps de la première activité si la seconde ne peut absorber le nouveau rythme. De plus, la durée d'inspection des produits se doit d'être réduite puisque les opérateurs du puits doivent fréquemment interrompre la sortie des billettes faute d'espace sur les transporteurs de l'inspection. L'étude des temps d'opération à ce poste a donc été réalisée en premier. Il est à noter qu'un Kaizen (SMED) de trois jours a également porté sur le sujet et qu'une autre activité de ce type est prévue dans un avenir rapproché.

2. Activités réalisées

L'analyse a débuté au poste d'inspection où un bon nombre d'observations et d'études de temps et mouvements ont été effectuées. Les tâches des employés ont ainsi été détaillées et le temps d'inspection par lingot, selon son diamètre et sa longueur, a pu être déterminé.

La deuxième partie du mandat consistait à analyser le processus de l'intercoulée selon les mêmes méthodes. Il était également pertinent d'évaluer l'impact des changements de four et de diamètre sur le temps total d'intercoulée, de même que les temps d'inactivité et d'attente des employés. Finalement, certaines pistes de solutions ont été identifiées pour tenter de diminuer les temps de mise en course de ces deux activités.

3. Conclusion

Lors du Kaizen, des idées ont été émises afin de diminuer le temps d'inspection d'une billette de près de 45%. Il est cependant difficile de déterminer l'impact réel de cette diminution sur le temps d'intercoulée puisque les changements n'ont pas encore été apportés. Un certain nombre de tests doivent être mis sur pied pour s'assurer que la nouvelle cadence d'inspection permettra la sortie des billettes du puits sans interruption. Si tel est le cas, il sera alors possible de produire une coulée supplémentaire durant la journée de travail.

ANNEXE D

TRAITEMENT THERMIQUE DES BILLETTES

1. Description et objectifs du mandat

Ce travail vise à modéliser une partie du processus opératoire du CC5 à l'aide du logiciel Taylor ED (Flexsim, URL : <http://www.flexsim.com/>). Les opérations représentées dans cette simulation sont l'inspection des billettes et le traitement thermique de ces dernières par l'activité des fours d'homogénéisation et des refroidisseurs. L'objectif de la modélisation est de déterminer le mode de refroidissement optimal des billettes demandées par un client important afin de résoudre un problème d'extrusion.

2. Activités réalisées

L'identification de la problématique et la suggestion de solutions potentielles ont été effectuées par une équipe de métallurgistes. Ce mandat consistait donc à élaborer le modèle de simulation afin de valider la solution jugée optimale. L'analyse des résultats a été réalisée par le métallurgiste chargé du projet.

3. Conclusion

Les résultats des simulations ont démontré que le rendement optimal est obtenu lorsque le système d'homogénéisation fonctionne en continu, contrairement au mode de fonctionnement par lots employé actuellement. Il est également préférable d'ordonner la production de façon à ce qu'il n'y ait jamais plus de deux commandes de produits nécessitant un long refroidissement dans le même 24 heures. Ce nouveau mode de refroidissement permet également au CC5 d'augmenter sa production annuelle.

ANNEXE E

INFORMATISATION DE L'OPÉRATION DE COUPE

1. Description et objectifs du mandat

Ce mandat consiste à analyser et à élaborer les éléments du système informationnel pour permettre le suivi et la mesure de la performance du système manufacturier. Plus particulièrement, ce travail vise l'élaboration de formulaires électroniques au poste de sciage à l'aide du logiciel MS Access. L'informatisation des formulaires de travail sera étendue aux postes de travail du secteur chaud dans un avenir rapproché.

L'objectif principal de ce mandat est de fournir une méthode diagnostique afin d'identifier les taux de rejet ainsi que la nature des pertes (rebuts et bon métal) entre l'inspection des billettes et leur empaquetage (secteurs chaud et froid).

2. Activités réalisées

L'élaboration de diagrammes de processus a tout d'abord permis d'identifier la quantité et la nature de l'information échangée entre les tiers. L'analyse des formulaires papier existants a également facilité la compréhension du mode opératoire des employés de ce poste de travail. À la lumière des informations recueillies, la standardisation des formulaires existants selon les nouvelles exigences d'Alcan Inc. a été réalisée de même que la conception de nouvelles interfaces. Ces formulaires ont par la suite été présentés aux opérateurs et revus selon les commentaires reçus lors de la présentation.

3. Conclusion

La mise en place des postes informatiques dans l'atelier n'étant pas réalisée à la fin du mandat, il est impossible de quantifier les bénéfices reliés à l'informatisation des données. Les formulaires électroniques vont cependant assurer un meilleur suivi de la production et seront grandement utiles pour effectuer des actions correctives. Ces derniers permettront également de réaliser des gains non quantifiables tels que l'économie de papier, l'élimination de l'écriture redondante d'informations et la perte de ces dernières, la vérification automatique de l'erreur, la rapidité de saisie de l'information grâce aux listes déroulantes, etc.

Pour parvenir à identifier et quantifier les rebuts de ce secteur, les employés doivent cependant enregistrer des données supplémentaires telles que les raisons de rejets et les valeurs des compteurs. Par contre, ce léger surplus de travail est largement compensé par les avantages que procurent les bases de données.