



**HAL**  
open science

# Optimisation des coûts de la ferraille lors de la production d'acier dans un four à arc électrique.

Patrick Henri Jacobs, Patrick Henri Jacobs

## ► To cite this version:

Patrick Henri Jacobs, Patrick Henri Jacobs. Optimisation des coûts de la ferraille lors de la production d'acier dans un four à arc électrique.. Sciences de l'environnement. Université McGill, 2020. Français. NNT: . tel-04275282

**HAL Id: tel-04275282**

**<https://theses.hal.science/tel-04275282v1>**

Submitted on 15 Nov 2023

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License

# Optimisation des coûts de la ferraille lors de la production d'acier dans un four à arc électrique

Patrick JACOBS

Doctorat en ingénierie

Département de génie mécanique

Université McGill

Montréal, Québec

2010-02-03

Thèse présentée à l'Université McGill en vue de satisfaire aux exigences du  
diplôme de Doctorat en génie mécanique.

Patrick JACOBS, 2010

## REMERCIEMENTS

Tout d'abord, j'aimerais exprimer mes remerciements les plus sincères à mon superviseur, le professeur Vincent Thomson, pour son soutien et ses conseils constants tout au long de ma maîtrise. Il est l'une des personnes les plus patientes que j'ai connues à McGill, et ce fut vraiment un plaisir de travailler avec lui. Je suis également reconnaissant à mon ami et collègue, le Dr Onur Hisarciklilar, pour le temps qu'il a passé à m'aider dans mes recherches.

divers aspects de ma recherche. Sa passion pour l'amélioration continue est contagieuse et a ravivé mon intérêt pour le sujet. Je remercie le Dr Hisarciklilar pour son aide en matière de programmation à l'aide de Visual Basic for Applications.

Je tiens à remercier mes collègues du laboratoire et les ingénieurs d'Arcelor Mittal qui se sont consacrés à ce projet. Mes collègues de McGill, Kailash Bathy Voeyar Math et le professeur Jung Eui Hong ; les ingénieurs d'ArcelorMittal, Pascal Gaudreau et Simon Chevalier. Je voudrais remercier mes amis et ma famille d'avoir été là pour moi dans les bons et les mauvais moments. Je n'aurais pas pu aller aussi loin sans votre soutien et vos encouragements. Enfin, j'aimerais remercier le

Le programme MITACS (Mathématiques of Information Technologie and Complexe Systèmes) et Arcelor Mittal pour leur soutien financier au cours de ce projet.

## RÉSUMÉ

Dans la production d'acier, un four électrique à arc (FEA) est le plus souvent utilisé pour fondre les matières premières afin de produire de l'acier liquide. La ferraille est la principale matière première, qui diffère par sa teneur en fer et en certains éléments chimiques.

Le prix de la ferraille dépend de ces caractéristiques. Afin d'obtenir la qualité et la quantité souhaitées, chaque unité de bain de fusion de l'acier a soit ses propres contraintes matérielles, soit les contraintes du four à arc électrique, telles que la capacité du FEA. En outre, la disponibilité et le transport de la ferraille sont également limités car ils nécessitent de l'espace. La recherche dans cette thèse consiste à créer un modèle d'optimisation qui minimise le coût de la matière première et charge efficacement le four à arc électrique tout en respectant les contraintes de la recette de la ferraille et du système de transport de la ferraille. Ce problème est un problème d'optimisation combinatoire et le modèle est développé sur la base de la théorie de la programmation linéaire. La vitesse d'exécution du modèle est raisonnablement garantie en concevant correctement la structure combinatoire avec des règles de branchement et de liaison et des heuristiques. Enfin, un logiciel est créé en représentant le modèle dans le tableur, qui peut être utilisé dans la production quotidienne réelle. Les résultats de la simulation montrent une amélioration significative par rapport à la stratégie appliquée aujourd'hui chez ArcelorMittal (Contrecoeur, Québec) : le coût de la ferraille est réduit de 2 à 6% et le temps de chargement des bennes est de 2 à 10 minutes plus rapide.

Dans la production d'acier, four arc électrique (FEA) est la technologie la plus couramment utilisée pour faire fondre les matières premières afin d'obtenir de l'acier liquide. La ferraille est la matière première principale dont les types se diffèrent selon le contenu de fer et d'autres éléments chimiques. Le prix de la ferraille dépend de ces attributs. Afin d'obtenir la qualité et la quantité souhaitées, chaque unité bain de fusion de l'acier a subi à ses propres contraintes matérielles ou des contraintes liées au four à arc électrique, telles que la capacité du FEA. En outre, la disponibilité et la capacité à transporter de la ferraille sont également en raison d'espace limité. L'objectif dans cette thèse est de créer un modèle d'optimisation qui minimise le coût des matières premières et charge le FEA efficacement afin de satisfaire des contraintes de la recette de ferraille et de transport de ferraille. Le modèle est développé sur la base de théories de la programmation linéaire. La vitesse de l'exécution du modèle est raisonnablement garantie par une bonne conception de la structure combinatoire avec les règles de 'branch and bound' et heuristiques. Enfin, un logiciel qui applique le modèle est créé. Celui-ci peut être utilisé dans la production réelle quotidienne. Les résultats des simulations montrent une amélioration significative par rapport aux pratiques actuelles de planification de production appliquées aujourd'hui dans Arcelor Mittal le coût de la ferraille est réduite de 2 à 6 pour cent et le temps de godets de charge est de 2 à 10 minutes plus vite.

## TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	ii
RÉSUMÉ .....	iii
<del>ABGE</del> .....	iv
LISTE DES TABLEAUX .....	viii
LISTE DES FIGURES .....	ix
1 Introduction .....	1
1.1 Énoncé du problème .....	2
1.2 Objectif de la thèse .....	4
1.3 Organisation de la thèse .....	4
2 Informations générales .....	6
2.1 Types de déchets et recettes .....	6
2.2 Opérations de chargement de la ferraille .....	9
2.2.1 Chargement des wagons .....	11
2.2.2 Chargement des seaux .....	13
3 Analyse documentaire.....	16
3.1 Concepts généraux.....	16
3.1.1 Optimisation.....	16
3.1.2 Règles relatives aux branches et aux liens.....	21
3.1.3 Heuristique.....	24
3.2 Modèle d'optimisation de la ferraille .....	26
3.3 Modèle de distribution de la ferraille.....	28
4 Modèle d'optimisation des déchets dans un four à arc électrique .....	31
4.1 Configuration du modèle mathématique.....	32

4.1.1	Modèle de coût de la ferraille .....	33
4.1.2	Matières premières .....	34
4.1.3	Capacité du FEA .....	37
4.1.4	Disponibilité des stocks et de la ferraille .....	39
4.2	Résolution du modèle de programmation linéaire .....	41
4.2.1	Données initiales .....	43
4.2.2	Stratégie de sélection .....	44
4.2.3	Incrément .....	44
4.2.4	Règles de branchement .....	45
4.2.5	Fonction de délimitation .....	46
4.3	Accélérer le processus de résolution des modèles .....	48
5	Modèle de chargement de la ferraille .....	57
5.1	Représentation mathématique .....	58
5.1.1	Modèle de capacité de transport de ferraille .....	58
5.1.2	Contraintes liées à la ferraille .....	59
5.1.3	Dimension de la voiture .....	59
5.1.4	Capacité de la salle des ferrailles .....	60
5.2	Algorithme d'optimisation .....	61
5.2.1	Initialisation .....	62
5.2.2	Itérations .....	63
5.3	Analyse des résultats .....	64
6	Modèle de chargement de godet .....	66
6.1	Représentation mathématique .....	69
6.1.1	Modèle de temps de chargement des déchets .....	70
6.1.2	Contraintes .....	71
6.2	Algorithme de superposition des godets .....	74
6.2.1	Structure de l'algorithme .....	75
6.2.2	Données initiales .....	77
6.2.3	Règles de branchement .....	77
6.2.4	Fonction de délimitation .....	78
6.2.5	Réduire le nombre de solutions réalisables .....	79

6.3	Algorithme d'agencement des voitures	80
6.3.1	Structure de l'algorithme	80
6.3.2	Règles de branchement	83
6.3.3	Fonction de délimitation	83



6.3.4	Règles heuristiques pour réduire le nombre d'implantations de voitures réalisables outs.....	85
6.4	Algorithme de combinaison .....	86
6.4.1	Structure de l'algorithme.....	87
6.4.2	Accélérer un algorithme avec des heuristiques.....	89
6.5	Analyse des résultats.....	91
7	Application industrielle.....	95
7.1	Introduction à l'interface graphique .....	96
7.2	Validation du modèle.....	97
7.2.1	Validation du modèle d'optimisation de la ferraille dans la pratique de la production tice .....	97
7.2.2	Validation du modèle de distribution de la ferraille par la production historique tion Données.....	100
7.3	Test de performance du modèle.....	102
7.3.1	Modèle d'optimisation de la ferraille Analyse des performances ..	103
7.3.2	Analyse des performances du modèle de distribution de la ferraille	110
8	Conclusion et travaux futurs.....	114
8.1	Modèle d'optimisation de la ferraille .....	114
8.2	Modèle de distribution de la ferraille.....	115
8.3	Travaux futurs.....	116
	Références.....	117
	Annexe A.....	119
	Annexe B.....	120

## LISTE DES TABLEAUX

<u>Table</u> <u>au</u>		<u>page</u>
2-1	Exemple de recettes .....	10
4-1	Types d'acier .....	34
4-2	Ferrailles d'acier avec limitation de quantité .....	36
4-3	Densité de la ferraille .....	39
4-4	Ferrailles d'acier avec sous-types .....	46
4-5	Règle de délimitation test de force .....	48
4-6	Comparaison des performances des heuristiques .....	56
5-1	Dimension de la voiture .....	60
5-2	Recette de chargement des voitures .....	65
6-1	Un résumé des différents temps de chauffe .....	71
6-2	Poids moyen de la ferraille par chargement .....	73
6-3	Vérification de la règle de délimitation .....	85
6-4	Modèle d'étude des performances .....	93
6-5	Étude heuristique des risques .....	94
7-1	Réduction des coûts .....	100
7-2	Temps de chargement du seau .....	102

## LISTE DES FIGURES

<u>Chiffre d'affaires</u>	<u>page</u>
1-1 Four à arc électrique [4].....	2
2-1 Processus de production de l'acier.....	6
2-2 Un wagon contenant de la ferraille.....	11
2-3 Disposition de la salle des ferrailles.....	12
2-4 La stratification des déchets dans le seau.....	14
2-5 L'aimant utilisé pour transporter la ferraille.....	15
4-1 Illustration des règles de branchement et de liaison.....	43
4-2 Illustration des règles de branchement et de liaison avec l'ordre de priorité des coûts. 50	52
4-3 Règle prédictive appliquée dans l'arbre de recherche.....	52
4-4 Logique heuristique.....	54
5-1 Règle générale pour le modèle de chargement des voitures.....	58
5-2 Crâne à côté des voitures dans le hall des ferrailles.....	59
6-1 Disposition de la halle à ferraille.....	67
6-2 Organigramme de l'optimisation de la couche de godets.....	69
6-3 Arbre de recherche de l'algorithme de la couche à godets.....	76
6-4 Arbre de recherche de l'algorithme d'agencement des voitures.....	83
6-5 Résumé des temps de remplissage du premier godet de 12 wagons.....	87
6-6 Récapitulatif des temps de remplissage du deuxième godet de 12 wagons.....	87
6-7 L'organigramme de l'heuristique dans le modèle d'optimisation des godets..	89

6-8 Recette de chargement de ferraille et de wagons utilisée pour tester le modèle.	92
6-9 Chargement optimisé des godets par couches. ....	92
6-10 Disposition des voitures dans le hall des ferrailles. ....	92
7-1 Résumé des besoins en acier liquide.....	97
7-2 Propriétés de la ferraille usagée dans le four à arc électrique.....	98
7-3 Recette de rebut dans le modèle d'optimisation et dans la production réelle.	99
7-4 Propriétés de l'acier liquide et production dans le modèle d'optimisation et en production réelle.....	99
7-5 Recette de chargement des wagons.....	100
7-6 Seau stratifié avec déchets du modèle.....	101
7-7 Seau à couches avec rebut en production réelle.....	101
7-8 Disposition des wagons dans le hall des ferrailles.....	101
7-9 Le temps nécessaire pour obtenir la recette lorsque le nombre de types de déchets est compris entre 6 et 13.....	104
7-10 Coût de rebut optimisé lorsque le nombre de types de rebut varie de 6 à 13 ans. ....	105
7-11 Le temps nécessaire pour obtenir la recette tout en augmentant la quantité de ferraille de 0 à 80000 lbs.....	106
7-12 Le coût optimisé de la ferraille lorsque la quantité de ferraille passe de 0 à 80000 lbs. ....	107
7-13 Le temps nécessaire pour obtenir la recette avec le changement d'incrément de 2000 à 10000.....	108
7-14 Le coût de la ferraille optimisé avec l'incrément changeant de 2000 à 10000.....	109
7-15 Le temps d'exécution de l'algorithme avec l'incrément passant de 2000 à 5000.....	111

7-16 Le temps de chargement optimisé avec l'incrément changeant de 2000 à 5000.....	112
--	-----

## **CHAPITRE 1**

### **Introduction**

L'acier est l'un des matériaux les plus importants au monde. Les marchés de l'acier au Canada sont de plus en plus influencés par les marchés mondiaux, où plus d'un tiers de la production mondiale d'acier fait l'objet d'échanges internationaux. Selon Statistique Canada, le Canada produit 13 millions de tonnes d'acier par an [1].

L'élaboration de l'acier au Canada prend deux formes de base : le procédé intégré et le procédé du four électrique à arc (FEA).

i) Processus intégré (BOF). Ce procédé utilise trois matières premières : le minerai de fer, le coke et le calcaire, à partir desquels le fer fondu est produit dans un haut fourneau. Le fer fondu et de petites quantités de ferraille sont transformés en acier liquide dans un convertisseur basique à oxygène (BOF). Enfin, l'acier liquide est coulé en brames et en billettes en vue d'un traitement ultérieur.

ii) Four à arc électrique (FEA). La principale matière première est la ferraille d'acier, qui est réchauffée, fondue en acier liquide et coulée en nouvelles barres d'acier en vue d'un traitement ultérieur. Le four à arc électrique est largement utilisé dans la fabrication de l'acier. Actuellement, un tiers de la production mondiale est réalisée au moyen d'un four électrique à arc [3]. Dans le four électrique à arc, l'acier recyclé est fondu et transformé en acier liquide de haute qualité à l'aide d'un arc électrique de forte puissance. L'installation de base d'un four à arc électrique est

illustrée à la figure 1-1.

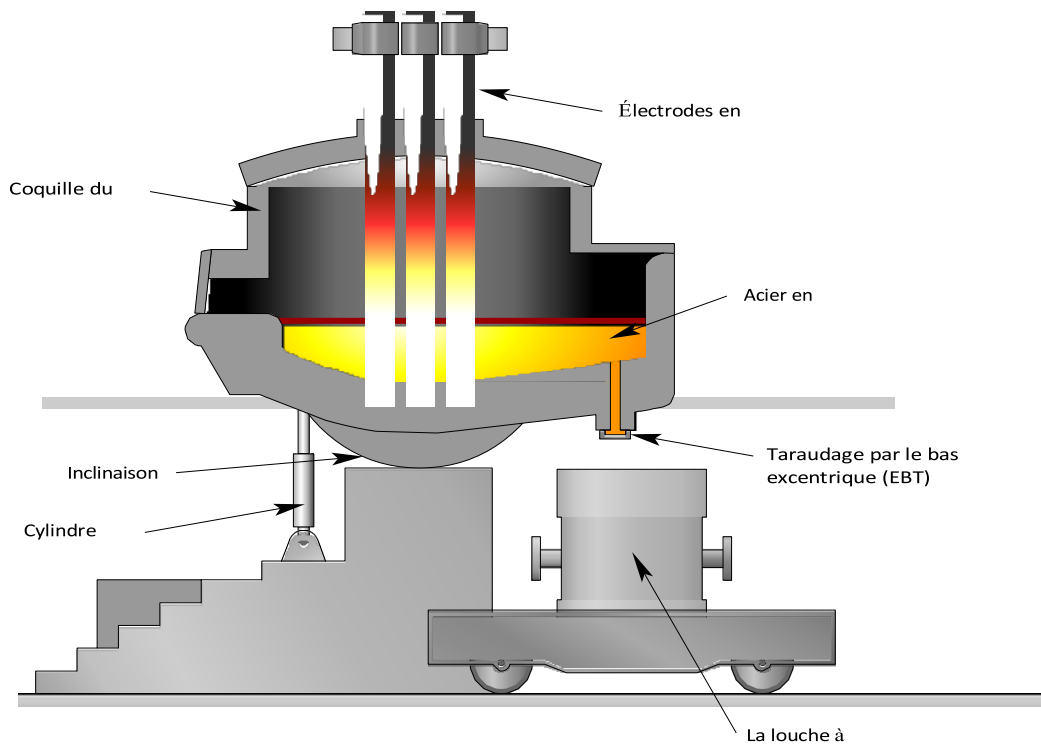


Figure 1-1 : Four à arc électrique [ 4]

Les usines sidérurgiques sont implantées là où il est économiquement possible de réunir de grandes quantités de matières premières. Les grandes aciéries du Canada ont été construites le long du réseau des Grands Lacs et de la Voie maritime du Saint-Laurent. ArcelorMittal, l'entreprise sidérurgique que nous étudions dans ce projet, est située à Contrecoeur, au Québec, près du fleuve Saint-Laurent, avec des connexions ferroviaires.

### 1.1 Problème Déclaration

En général, la production d'acier peut être divisée en plusieurs étapes [10] :

- Traitement des matières premières



- Métallurgie des procédés

- Coulée et solidification
- Formage à chaud et à froid
- Traitement mécanique

Dans la production d'acier, le coût des matières premières représente 85 % du coût total de la production d'acier brut [12]. Il existe de nombreux types de ferraille ayant des propriétés différentes, telles que la teneur en éléments chimiques, le rendement, la densité et le prix. L'annexe A donne une liste des différents types de ferraille. Une recette utilisant des déchets d'acier est préparée afin de répondre aux exigences de production des types d'acier souhaités à un faible coût. C'est pourquoi de nombreuses entreprises sidérurgiques ou sociétés de services technologiques tentent d'obtenir une recette optimale à partir de différents types de matières premières afin de réduire les coûts de production.

Toutes les étapes de la production d'acier doivent être bien coordonnées pour garantir la cohérence de la production et le bon déroulement des opérations. Au cours de la phase de traitement des matières premières, de nombreuses opérations sont effectuées, notamment le transport de la ferraille et le chargement du four électrique à arc. Une bonne coordination de ces opérations est nécessaire pour accélérer le processus.

Dans cette thèse, nous nous intéressons aux deux premières étapes de la production d'acier : le traitement des matières premières et la métallurgie des procédés. L'objectif de ce projet est de construire des modèles d'optimisation pour obtenir (1) une recette de ferraille basée sur la production journalière en mettant l'accent sur la réduction des coûts, et (2) une meilleure coordination entre les opérations de

chargement de la ferraille afin d'augmenter le taux de production.

## **1.2 Thèse Objectif**

Nous avons deux objectifs principaux dans ce travail : (1) optimiser la recette pour réduire les coûts, et (2) optimiser le transport de la ferraille et les opérations de chargement pour augmenter le taux de production.

La production actuelle ne peut pas être ajustée assez rapidement en fonction du coût, de la demande et de la capacité de production. Pour répondre au premier objectif de cette thèse, un modèle intelligent est construit, qui peut mettre à jour dynamiquement la recette en fonction des informations flexibles sur le prix du marché de la ferraille et optimiser le coût de production. Outre la réduction des coûts, le modèle doit fonctionner dans un délai raisonnable afin de servir d'outil utile dans la production quotidienne.

Il doit également être en mesure d'intégrer de nouveaux types de déchets, à mesure que le portefeuille de déchets de l'installation s'élargit.

Une mauvaise coordination des opérations de transport et de chargement de la ferraille peut entraîner une interruption ou un retard de la production et avoir un impact sur les coûts de production. Le deuxième objectif est donc d'optimiser le processus de chargement de la ferraille afin que les bennes de ferraille destinées au four électrique à arc soient chargées le plus rapidement possible. Il est donc nécessaire de coordonner les opérations du système d'approvisionnement en ferraille, y compris la disposition des wagons et le chargement des bennes, afin d'assurer un fonctionnement rapide et sans faille.

## **1.3 Thèse Organisation**

Cette thèse traite du développement et de la validation d'un modèle d'optimisation dynamique pour la production d'acier dans un four électrique à arc.

Le chapitre 2 présente des informations générales sur les types de ferraille et les opérations de chargement pendant la production d'acier.

Le chapitre 3 présente une revue de la littérature sur les techniques d'optimisation et les modèles existants

pour l'optimisation des opérations du four électrique à arc. Ensuite, au chapitre 4, un modèle d'optimisation du coût de la ferraille pour la production d'acier par FEA est développé à l'aide de la programmation linéaire. Des règles de branchement et de liaison, ainsi que des heuristiques et d'autres techniques, sont utilisées pour améliorer la vitesse du modèle. Les chapitres 5 et 6 présentent le modèle de distribution de la ferraille, qui se compose d'un modèle de chargement des wagons et d'un modèle de chargement des godets. Le chapitre 5 illustre le fonctionnement du modèle de chargement des wagons et reproduit les opérations de chargement des wagons dans le parc à ferrailles, une zone située près de l'entrée du four électrique à arc. Le chapitre 6 détaille la distribution des wagons dans le hall des ferrailles. Ce modèle se compose de trois algorithmes : l'algorithme de disposition des wagons, l'algorithme de couche de godets et l'algorithme de combinaison. Ensuite, le chapitre 7 montre l'application industrielle de notre modèle avec des études de cas chez ArcelorMittal. Enfin, dans le chapitre 8, des remarques finales sont formulées et des suggestions sont faites pour améliorer le modèle à l'avenir.

## CHAPITRE 2

### Informations générales

La figure 2-1 présente un modèle simple du processus de production d'acier chez ArcelorMittal. Les paragraphes suivants détaillent les opérations d'élaboration des recettes et de chargement de la ferraille qui ont lieu au début du processus afin d'introduire la bonne ferraille dans le four électrique à arc pour produire l'acier approprié à la commande d'un client.

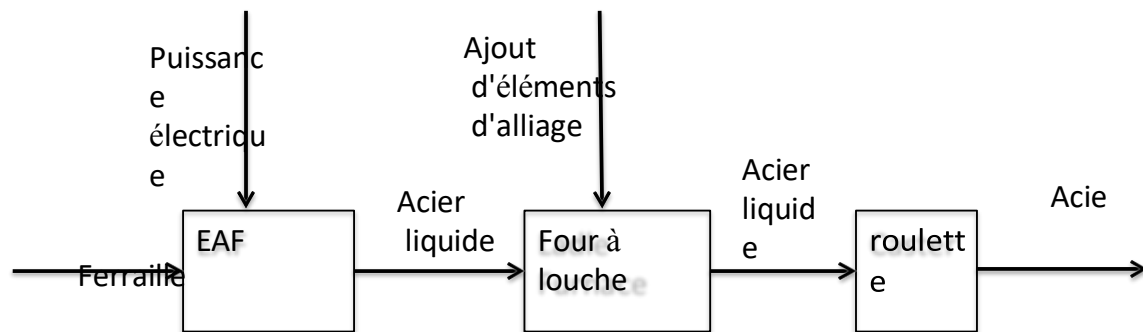


Figure 2-1 : Processus de production de l'acier

### 2.1 Types de déchets et Recette

Alors que la qualité de l'acier solide est généralement basée sur les propriétés mécaniques telles que la résistance à la traction et à la corrosion, la qualité de l'acier liquide est la suivante

est généralement basée sur sa composition chimique. La composition chimique

cible définit les limites souhaitées de certains éléments chimiques critiques dans l'acier liquide. Ces éléments comprennent le cuivre, le chrome, le nickel, le soufre, etc.



La ferraille d'acier recyclée est la principale matière première utilisée dans un four à arc électrique.

Au Canada, le taux de recyclage de l'acier dépasse les 60 % et 7 millions de tonnes métriques d'acier ont été recyclées en 2010 [1].

La ferraille d'acier de haute qualité présente un faible taux d'impuretés et sa taille peut être modifiée par des moyens mécaniques. Plusieurs types de ferraille sont disponibles sur le marché de la ferraille et sont classés en fonction de plusieurs propriétés :

- Composition chimique de l'acier
- Niveau des éléments d'impureté, par exemple Cu, Cr, Sn, S
- Coulée et solidification
- Forme et propriétés physiques, par exemple la dureté
- Le rendement de fusion, c'est-à-dire le pourcentage d'acier liquide produit à partir de la ferraille.

Quelques types de ferraille sont décrits ci-dessous. Ces ferrailles ont des noms standard pour faciliter les échanges sur le marché. Les noms utilisés ici suivent les recommandations de l'Institute of Scrap Recycling Industries (ISRI), basé aux États-Unis. Chez ArcelorMittal, il existe un code interne pour chaque type de ferraille, qui est indiqué entre parenthèses.

- Déchiqueter(104, 204, 404, 504)

Pièces d'acier léger provenant (on entend par là les aciéris, les forgerons, les machinistes). Ils doivent être exempts de saleté, de métaux non ferreux et de matières étrangères, sans humidité excessive, y compris la fonte, les tournures et les forages. Doivent respecter les spécifications suivantes : densité minimale de 0,8 tonne par  $m^3$ , teneur moyenne en Cu de 0,35 %.

- Busheling(105, 126, 305)

Ferraille d'acier propre, par exemple coupures de tôles, estampages, etc. A l'exclusion des vieilles carrosseries et des ailes. Exempt de métal revêtu, d'émail vitreux et de tôles modifiées électriquement. Teneur en cuivre de 0,12 %.

- Plaque et structure (111)

Se compose de débris de construction et de tôles coupés d'une épaisseur de 6 mm et dont les dimensions ne dépassent pas  $15\text{ m} \times 0,6\text{ m} \times 0,6\text{ m}$ . Peut inclure des matériaux de wagons correctement préparés d'une épaisseur inférieure à 6 mm. Le wagon est un véhicule à quatre roues destiné au transport de marchandises volumineuses et tiré à l'origine par des animaux. Ne comprend pas les tubes et les sections creuses.

- J 1 (101)

Principalement d'une épaisseur de 6 mm, d'une taille inférieure à  $1,5\text{ m} \times 0,6\text{ m} \times 0,6\text{ m}$ . Peut inclure les tubes et les sections creuses, les câbles métalliques, les matériaux correctement préparés provenant de véhicules commerciaux lourds, y compris les roues, mais à l'exclusion de la carrosserie et des roues des véhicules légers.

- J 2 (112, 326)

Principalement d'une épaisseur de 3 mm et d'une taille inférieure à  $1\text{ m} \times 0,6\text{ m} \times 0,6\text{ m}$ . Peut inclure des matériaux correctement préparés provenant de véhicules démontés, y compris des roues de véhicules légers. À l'exclusion de la carrosserie et des équipements des véhicules.

L'annexe A donne des informations sur les types de ferraille utilisés par ArcelorMittal, y compris la teneur en éléments chimiques (tels que Cu, Cr, Sn, S), le rendement de la fonte et le coût.

Une recette de ferraille est la composition de la ferraille à fondre dans un four électrique à arc, qui répond (1) aux exigences chimiques pour obtenir le produit final et (2) aux exigences mécaniques découlant de la conception et des opérations du four électrique à arc. En tant que base de l'acier

Dans le cadre de la production, une recette est un mélange de rebuts en différentes quantités, construit pour répondre à ces exigences. Un exemple de recette est présenté dans le tableau 2-1. Comme on peut le voir

Dans le tableau 2-1, le contenu d'une recette comprend les informations suivantes : les nuances d'acier, la quantité de ferraille nécessaire, la teneur en cuivre estimée, le coût et le rendement. La quantité de ferraille nécessaire est utilisée pour organiser les activités de production, notamment le chargement des wagons et des bennes avec la ferraille, le chargement du four électrique à arc, l'aide apportée aux acheteurs pour l'acquisition de ferraille auprès d'entreprises extérieures et l'analyse de la production. La teneur en cuivre est utilisée pour distinguer une recette d'une autre. Une estimation du coût est également fournie pour être utilisée dans le cadre du coût total de production. Chez ArcelorMittal (Contrecoeur, Québec), le coordinateur de production produit manuellement une recette en fonction de son expérience.

## **2.2 Chargement de la ferraille Opérations**

Lorsqu'une recette est déterminée, la ferraille provenant du parc à ferrailles est chargée dans des wagons et transportée vers le hall des ferrailles. À l'intérieur du parc à ferrailles, la ferraille est empilée séparément. Ces piles se trouvent à côté d'une voie ferrée, ce qui permet aux wagons de les rassembler et les transportent vers le hall des ferrailles. Une fois dans le hall des ferrailles situé à côté du four électrique à arc, les ferrailles sont placées dans des bennes à l'aide d'une grue magnétique ; les ferrailles sont déversées des bennes dans le four électrique à arc. La proximité de chaque ferraille dans les wagons par rapport aux

les godets détermine la vitesse du processus de chargement. Celle-ci peut être contrôlée par deux paramètres : la façon dont les wagons sont chargés et la façon dont les bennes sont chargées (superposition des bennes).

Tableau 2-1 : Exemples de recettes

Ferraille	0,50-0,80% Cu max	0,35-0,40 % Cu max	0,3%Cu max	0,25%Cu max
DRI	0	0	0	0
Busheling	0	30000	60000	40000
Plaques et structures	0	20000	30000	70000
Déchiqeter	60000	60000	70000	70000
/ 1	70000	60000	30000	20000
/ 2	30000	20000	0	0
Fil de pneu	0	0	20000	20000
Tournants	30000	20000	0	0
Boîtes de conserve	20000	0	0	0
Fonte	0	0	0	0
Crânes externes	30000	20000	0	20000
Crânes internes	0	0	10000	0
Billetes	0	0	10000	0
Revers roulé	0	10000	10000	0
Charges (lbs)	240000	240000	240000	240000
Cu (%)	0.32	0.30	0.24	0.21
Rendement à l'état fondu (%)	88.71	90.92	92.94	92.31
Coût (\$/T)	324.92	341.46	335.79	357.29

### 2.2.1 Wagon de chemin de fer Chargement

La ferraille est acheminée depuis le parc à ferrailles par wagons. La figure 2-2 présente les dimensions d'un wagon couramment utilisé. Dans le hall, les wagons sont maintenus sur la voie.

Le chargement des wagons fait référence au nombre de wagons requis pour chaque type de ferraille et à la manière dont ils sont assemblés sur la voie. La figure 2-3 illustre la disposition du hall de ferraille. Comme le montre la figure 2-3, les wagons sont divisés en deux parcs et chaque voie compte généralement six wagons dans le hall. Certaines ferrailles, telles que les crânes externes et internes (un crâne est une couche de métal solidifié ou d'écume sur la paroi d'une cuve de coulée, souvent lorsque le métal a été coulé.), ne sont pas chargées dans des wagons. Ils sont placés à côté des deux voies. Outre les crânes, 2 ou 3 autres types de ferraille doivent être entièrement chargés dans les wagons. Une grue charge les bennes qui sont situées dans deux terminaux du hall.



Figure 2-2 : Un wagon contenant de la ferraille.



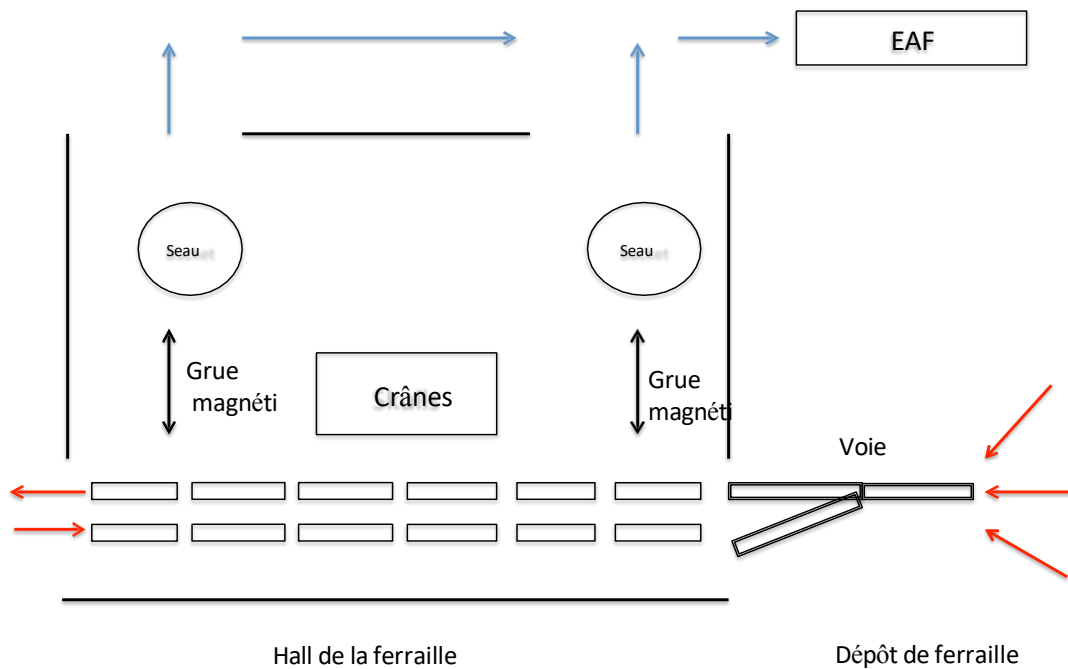


Figure 2-3 : Disposition de la halle à ferraille

Selon la recette de production, tous les wagons sont d'abord remplis dans le parc à ferraille. Il existe deux types de wagons dont les volumes sont respectivement de 3510 et 3360 *pieds*<sup>3</sup>. Une fois le chargement terminé, la ferraille est prélevée sur les wagons dans le hall des ferrailles. Le répartiteur de ferraille vérifie les wagons dans le hall de ferraille pour décider quand appeler le système de transport pour sortir les wagons vides et aller chercher les wagons pleins. Le système de répartition de la ferraille et le système de transport coopèrent pour obéir aux mêmes contraintes afin de garantir que le train arrive à l'heure dans le hall et d'assurer la continuité de l'ensemble du processus.

### 2.2.2 Godet Chargement

La ferraille est chargée dans le four à arc électrique à l'aide de godets, et 2 à 3 godets de ferraille sont généralement fondus par cycle. Chaque godet est chargé de quelques couches de ferraille différentes (généralement 6 à 8 couches). Après avoir chargé chaque godet, trois électrodes en graphite sont abaissées vers la ferraille, l'alimentation électrique est activée et la ferraille est fondue. Ensuite, le godet de ferraille suivant est chargé dans le four. Ce processus est répété jusqu'à ce que la quantité d'acier fondu requise soit obtenue. Lorsque le bassin d'acier liquide a atteint la composition et la température requises, l'alimentation électrique est coupée et le four est vidé.

Les ruptures d'électrodes se produisent occasionnellement dans le four à arc électrique, principalement lorsque les électrodes sont abaissées et heurtent de l'acier dur. Le coût associé à la rupture des électrodes est généralement très élevé et la production d'acier est interrompue jusqu'à ce que les électrodes cassées soient remplacées par de nouvelles. Il faut donc éviter les ruptures d'électrodes. Les ruptures d'électrodes résultent généralement d'une charge mécanique exercée sur l'électrode par la ferraille à l'intérieur du four électrique à arc. Lorsque l'électrode pénètre dans le tas de ferraille dans le four, si elle heurte directement la ferraille dure, elle risque de se briser. Chez ArcelorMittal, la ferraille située au sommet de la pile est choisie pour être très molle et facile à pénétrer.

La figure 2-4 présente un exemple de superposition de godets. Une benne est divisée en trois couches. La ferraille de chaque couche doit respecter certaines contraintes. Par exemple, la ferraille de la couche supérieure du godet doit être suffisamment molle et épaisse pour ne pas casser les électrodes. Lorsqu'elles

pénètrent dans la couche supérieure du four électrique à arc, les électrodes ne doivent pas heurter de la ferraille dure. L'épaisseur de cette couche doit donc être au moins supérieure à

que la longueur de l'électrode dans le four. Ce type de ferraille est également chargé dans la couche inférieure du godet afin de faciliter le chargement et de protéger le four. Chez ArcelorMittal, la ferraille de ces deux couches est généralement remplie de des matériaux déchiquetés. D'autres types de ferraille sont chargés dans la couche intermédiaire. La façon de disposer les déchets dans la benne est décidée par le système de répartition de la ferraille en fonction de la recette de production.

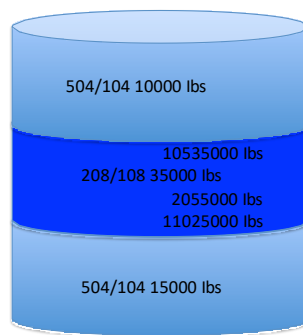


Figure 2-4 : Stratification de la ferraille dans la benne.

Une grue équipée d'un effecteur magnétique est utilisée pour charger et décharger le métal des wagons au four électrique à arc. Une grue est illustrée à la figure 2-5.



Figure 2-5 : L'aimant utilisé pour transporter la ferraille.

## CHAPITRE 3

### Revue de la littérature

#### 3.1 Concepts généraux

##### 3.1.1 Optimisation

En mathématiques, en informatique ou en sciences de gestion, l'optimisation fait référence à la sélection du meilleur élément parmi un ensemble d'alternatives disponibles [13]. Un problème d'optimisation consiste à maximiser ou à minimiser une fonction réelle en sélectionnant systématiquement des valeurs d'entrée dans un ensemble défini et en calculant la valeur de la fonction. L'optimisation joue un rôle important dans la science des décisions et dans l'analyse des systèmes physiques.

Les algorithmes d'optimisation sont généralement itératifs. Au début, les valeurs optimales sont initiées par une supposition, une estimation des variables. Ensuite, une séquence d'estimations améliore les valeurs optimales. Au terme de plusieurs itérations, une solution finale est atteinte.

Un problème d'optimisation peut être représenté comme suit :

*Étant donné* : une fonction  $f : \mathbf{A} \rightarrow \mathbf{R}$  d'un ensemble  $\mathbf{A}$  aux nombres réels

*Recherche* : un élément  $x_0$  dans  $\mathbf{A}$  tel que  $f(x_0) \leq f(x)$  pour tout  $x$  dans  $\mathbf{A}$  (minimisation) ou tel que  $f(x_0) \geq f(x)$  pour tout  $x$  dans  $\mathbf{A}$  (maximisation).

Une telle formulation est appelée problème d'optimisation ou problème de programmation mathématique. La fonction  $f$  est appelée fonction objectif, fonction de coût (généralement pour un problème de minimisation) ou fonction

d'utilité (généralement pour un problème d'optimisation).

un problème de maximisation).  $\mathbf{A}$  est un sous-ensemble de l'espace euclidien  $\mathbf{R}^n$ , souvent spécifié par un ensemble de contraintes, d'égalités ou d'inégalités que les membres de  $\mathbf{A}$  doivent satisfaire. Le domaine  $\mathbf{A}$  de  $f$  est appelé espace de recherche, et les éléments de l'ensemble  $\mathbf{A}$  sont appelés solutions réalisables.

Nous représentons aussi mathématiquement ce problème d'optimisation :

$x$  est le vecteur des *variables*

$f$  est la fonction objective, une fonction de  $x$  que nous voulons maximiser ou minimiser

$c$  est le vecteur des *contraintes que les résultats doivent satisfaire*, y compris l'égalité et l'inégalité.

Minimiser

$$f(x)$$

Sous réserve de

$$c(x) = 0$$

$$c(x) \geq 0$$

$$c(x) \leq 0$$

Une solution réalisable est un membre d'un ensemble de solutions possibles à un problème donné. Une solution réalisable ne doit pas nécessairement être une solution probable au problème. Elle fait simplement partie de l'ensemble qui satisfait toutes les contraintes.

Une solution optimale pour un problème de minimisation est un point où la fonction objective est plus petite dans l'ensemble de la région réalisable, ce qui est également appelé une solution optimale globale par rapport aux optima locaux. Les



solutions globales sont très

Les solutions locales sont souhaitables, mais elles sont difficiles à identifier et encore plus difficiles à localiser dans les problèmes complexes. Dans ces cas, l'algorithme d'optimisation le plus rapide ne cherche qu'une solution locale, un point où la fonction objective est plus petite que tous les autres points réalisables dans son voisinage. Cela ne garantit pas toujours que la solution optimale globale soit trouvée. Il faut donc trouver un compromis entre la vitesse d'exécution et la qualité de la solution.

**Programmation linéaire** La programmation linéaire est un cas spécifique d'optimisation mathématique avec une fonction objectif linéaire et des contraintes linéaires, qui peuvent inclure à la fois des égalités et des inégalités. La région réalisable est un polyèdre convexe, qui est un ensemble défini comme l'intersection d'un nombre fini de demi-espaces, chacun d'eux étant défini par une inégalité linéaire.

Les programmes linéaires sont généralement énoncés sous la forme canonique suivante Minimiser

$$c^T x$$

sous réserve de

$$Ax = b, x \geq 0$$

$$Ax \geq b$$

En comparant la formulation mathématique ci-dessus avec la formulation générale, [la fonction objectif et les contraintes sont linéaires, ce qui indique que la programmation linéaire est un sous-ensemble de l'optimisation mathématique.

La programmation linéaire est utilisée dans le domaine des affaires et de

l'économie, mais elle peut également être utilisée pour certains problèmes d'ingénierie. Les industries, telles que le transport, l'énergie,

les télécommunications et l'industrie manufacturière utilisent des modèles de programmation linéaire. La programmation linéaire s'est avérée utile pour modéliser divers types de problèmes de planification, d'acheminement, d'ordonnancement, d'affectation et de conception.

### **Programmation en nombres entiers**

Dans certains problèmes d'optimisation, les variables n'ont de sens que si elles prennent des valeurs entières. Supposons que dans le problème du transport, les usines produisent des tracteurs. Dans cet exemple, la variable  $x$  représente une valeur entière plutôt qu'un nombre réel. Cette stratégie consiste à résoudre le problème avec des variables réelles en ignorant l'exigence d'intégralité, puis à arrondir toutes les composantes à l'entier le plus proche, ce qui ne garantit nullement l'obtention de solutions proches de l'optimum. Les problèmes de ce type doivent être traités par optimisation discrète. En ce qui concerne la formulation mathématique, la contrainte suivante est ajoutée aux contraintes existantes

$$x_i \in \mathbf{Z}, \text{ pour tout } i$$

où  $\mathbf{Z}$  est l'ensemble des entiers. Ce problème est connu sous le nom de problème de programmation en nombres entiers. Certains modèles comprennent des variables qui varient continuellement, tandis que d'autres ne peuvent prendre que des valeurs entières. On parle alors de problèmes de *programmation mixte en nombres entiers*.

### **Optimisation combinatoire**

L'optimisation combinatoire [5], [15], [16] est un domaine dynamique de la mathématique appliquée, qui combine des techniques issues de la combinatoire, de la programmation linéaire et de la théorie des algorithmes, afin de résoudre des

problèmes d'optimisation sur des structures discrètes. En tant que

Comme le montrent plusieurs études, la plupart des problèmes d'optimisation combinatoire appartiennent à la classe  $NP$  - hard pour laquelle il n'existe souvent pas d'algorithmes efficaces. Cette classe de problèmes résolubles en temps polynomial est généralement désignée par  $P$ . Comme pour la classe  $NP$ , ils sont une classe de problèmes qui pourraient être plus importants.  $NP$  ne signifie pas "temps non polynomial", mais "temps polynomial non déterministe".

Pour accroître la solvabilité du problème, différentes approches de représentation mathématique du problème peuvent le reformuler avant d'obtenir une solution optimale à une programmation en nombres entiers de grande taille en un temps de calcul raisonnable. À cet égard, ces problèmes fonctionnent bien en augmentant le nombre de variables entières, le nombre de contraintes ou les deux. Contrairement à la programmation linéaire, la région réalisable du problème combinatoire n'est pas un ensemble convexe, ce qui rend difficile la recherche d'une solution optimale aux problèmes d'optimisation combinatoire.

Différents problèmes ont été étudiés pour construire le modèle, tels que le problème du transport, le problème de l'affectation et le problème de l'ordonnancement. Les détails peuvent être consultés à [20]. Il existe de nombreuses approches différentes pour résoudre les problèmes de programmation en nombres entiers, telles que les techniques énumératives et les plans de coupe.

*Approches énumératives :* Cette approche énumère toutes les possibilités finiment nombreuses, ce qui est l'approche la plus simple pour résoudre un problème de programmation pure en nombres entiers. L'approche énumérative la plus couramment utilisée est le branch and bound, qui est largement utilisé dans

notre modèle et est illustré dans la section suivante.

*Algorithmes de plans de coupe basés sur la combinatoire polyédrique* : Cette approche permet de réaliser des progrès considérables en matière de calcul dans le domaine de l'optimisation exacte. Lorsque la combinatoire polyédrique

Si la théorie des polyèdres, développée au cours des vingt-cinq dernières années, est appliquée à la résolution de problèmes numériques, la taille et la complexité des problèmes s'en trouvent considérablement accrues. Un polyèdre est l'intersection d'un nombre fini d'espaces, qui est l'ensemble des solutions réalisables à la programmation linéaire avec des algorithmes efficaces et les solutions peuvent être réduites à des problèmes d'optimisation linéaire sur le polyèdre également. L'idée

La théorie polyédrique sous-jacente consiste à utiliser une convexification alternative des points réalisables et des rayons extrêmes du problème au lieu de l'ensemble des contraintes d'un problème de programmation en nombres entiers.

### **3.1.2 Règles relatives aux branches et aux liens**

Les problèmes d'optimisation combinatoire partagent les propriétés suivantes :

- Il s'agit de problèmes d'optimisation qui présentent un nombre fini, mais généralement très élevé, de solutions réalisables.
- Pour la majorité des problèmes, il n'existe pas de méthode qui puisse être résolue en temps polynomial.

Tous ces problèmes sont *NP*-hard. Par exemple, l'acheminement des véhicules, l'ordonnancement des équipes et la planification de la production. Ces problèmes sont souvent résolus à l'aide d'un grand nombre de calculs. Des algorithmes très efficaces sont donc nécessaires. La méthode Branch and Bound (B&B) est de loin l'outil le plus utilisé pour résoudre les problèmes d'optimisation combinatoire *NP*-hard à grande échelle [11]. La méthode consiste en une énumération systématique de toutes les solutions possibles dans laquelle de grands sous-ensembles de problèmes infructueux sont écartés en utilisant des limites sur la variable à



optimiser. Les solutions sont obtenues par une recherche dans l'espace des solutions. Au départ, il n'existe qu'un seul ensemble de solutions. Le sous-espace non traité est représenté sous forme de nœuds dans un espace dynamique.

arbre de recherche généré, qui est exploré par chaque itération d'un algorithme B&B. Chaque itération comporte trois outils principaux : la stratégie de sélection des nœuds, le calcul des bornes et le branchement (passage à une nouvelle section de l'espace de solution). Afin d'explorer les nœuds le plus tôt possible, une bonne solution initiale réalisable est également très importante.

Ce problème est illustré dans la section sur l'heuristique. Nous présentons maintenant la manière de développer une fonction de délimitation, des règles de branchement et une stratégie de sélection des nœuds.

### **Fonction de délimitation**

Une fonction de bornage fournit des bornes supérieures et inférieures pour la valeur minimale de  $f(x)$  dans un sous-ensemble donné. Une borne est dite forte si elle donne une valeur proche de la valeur optimale pour le sous-problème borné, et faible si la valeur est éloignée de l'optimum. Une fonction de bornage est le composant le plus important d'une méthode B&B. Plus le temps consacré au calcul de la borne est important, meilleure est la valeur de la borne. Normalement, une fonction d'encadrement doit être aussi forte que possible tout en maintenant la taille de l'arbre de recherche aussi petite que possible.

Prenons l'exemple du problème de minimisation. Il existe principalement deux façons de calculer une limite. La première consiste à utiliser la relaxation, c'est-à-dire à omettre certaines contraintes dans le problème de manière à élargir le sous-ensemble. La solution optimale du problème relaxé est utilisée comme borne inférieure si elle ne satisfait pas toutes les contraintes du problème original ou comme nouveau titulaire dans le cas contraire.

La deuxième approche consiste à modifier la fonction objective de manière à ce

que, pour toutes les solutions réalisables, la fonction modifiée ait des valeurs inférieures ou égales à la fonction originale, tout en conservant la solution réalisable du problème. Une borne inférieure peut être obtenue en résolvant le problème modifié.

## **Stratégie de sélection**

Cette stratégie est utilisée pour sélectionner le sous-espace de la solution vivante à étudier dans l'itération en cours, ce qui reflète un compromis entre le maintien d'un faible nombre de nœuds explorés dans l'arbre de recherche et le respect de la capacité de mémoire de l'ordinateur.

La première stratégie couramment utilisée est appelée "meilleure stratégie de recherche en premier". Dans cette approche, on sélectionne toujours l'espace de solution dont la borne est la plus basse dans tous les sous-problèmes. Si un sous-problème a une valeur de fonction limite inférieure à la solution optimale du problème exploré, ce problème est critique. Seul un nœud critique est exploré ; sinon, il est écarté.

L'utilisation de la meilleure stratégie de recherche en premier pose un problème de mémoire informatique si le nombre de problèmes critiques est élevé. Dans cette situation, une stratégie de recherche "breadth first" est utilisée, dans laquelle l'algorithme traite d'abord tous les nœuds d'un niveau de l'arbre de recherche avant tout nœud d'un niveau supérieur. Lorsque le nombre de nœuds à chaque niveau de l'arbre de recherche croît de manière exponentielle avec le niveau, cette stratégie n'est pas réaliste pour les problèmes de grande taille.

La troisième stratégie est appelée "recherche en profondeur". Dans ce cas, un nœud vivant ayant le niveau le plus élevé dans l'arbre de recherche est choisi pour l'exploration. L'avantage pour la programmation est l'utilisation de la récursivité pour rechercher l'arbre, ce qui permet de stocker les informations sur le sous-problème actuel de manière incrémentale. En revanche, si le titulaire est loin de la solution optimale, les calculs sont très exigeants.

Selon le cas, il est possible de combiner deux de ces stratégies. Ce type de combinaison est détaillé plus loin.

## **Branchement**

Une règle de branchement est appliquée pour subdiviser le sous-espace en plusieurs sous-espaces à étudier lors des itérations suivantes si un sous-espace ne peut pas être écarté après l'étude. La méthode la plus courante consiste à attribuer des valeurs aux variables. Si le sous-espace est divisé en deux, la branche de ce type est appelée branche dichotomique, sinon branche polytomique.

### **3.1.3 Heuristique**

Une heuristique est une technique utilisée pour accélérer la recherche d'une solution satisfaisante à un problème lorsqu'une recherche exhaustive n'est pas possible. Les heuristiques se traduisent par simplifier un problème complexe et produire une bonne solution, [15]. Ainsi, les heuristiques ont désormais deux objectifs très importants : fournir de bonnes solutions aux problèmes pour lesquels les algorithmes actuels sont incapables de prouver l'optimalité dans un délai raisonnable et contribuer à améliorer l'efficacité de l'exploration d'un algorithme exact.

La recherche locale est introduite dans la recherche sur les heuristiques. Elle permet d'obtenir une solution réalisable et de l'améliorer de manière itérative en se déplaçant localement.

Les algorithmes constructifs tentent d'appliquer des stratégies simples pour choisir le meilleur mouvement unique sans tenir compte de l'impact de l'arrondissement à la hausse ou à la baisse d'une variable donnée dans une solution de programmation linéaire. D'autres mouvements plus compliqués sont également proposés, comme l'algorithme de Lin-Kerningham pour le problème du voyageur de commerce.

Beaucoup de ces techniques sont basées sur des analogies du monde naturel, telles

que les propriétés des matériaux, la sélection naturelle, le traitement neuronal ou les propriétés d'apprentissage trouvées chez les animaux.

Dans les algorithmes de type "branch-and-bound", une heuristique est utilisée pour construire la solution initiale réalisable et les branches de l'arbre de recherche. Pour générer une bonne solution initiale réalisable, les heuristiques telles que le recuit simulé, les algorithmes génétiques et la recherche Tabu sont les plus populaires.

Les algorithmes de recuit simulé s'inspirent des propriétés de la mécanique statistique où un processus de recuit nécessite le refroidissement lent des métaux pour améliorer leur résistance. L'analogie est que l'on converge lentement vers une solution réalisable en insérant une composante de randomisation. De même, les algorithmes génétiques ou évolutifs sont basés sur les propriétés de la mutation naturelle. En ce qui concerne l'analogie, chaque solution réalisable au problème d'optimisation combinatoire est équivalente à une chaîne d'ADN et une valeur est attribuée à chacune de ces chaînes. Deux individus s'accouplent en fonction de la valeur de leur fonction objective et créent une nouvelle solution dont les attributs sont une combinaison des attributs de chaque parent. Cependant, une progéniture peut également contenir une mutation, c'est-à-dire un attribut qu'aucun des parents ne possède.

Dans l'arbre de recherche, une heuristique sélectionne des branches plus susceptibles de produire des solutions que d'autres branches. Par exemple, lorsque l'écart entre les limites supérieure et inférieure devient inférieur à un certain seuil, la ramification est interrompue et ce nœud est immédiatement écarté. Dans ce cas, la solution est suffisamment bonne pour des raisons pratiques et peut réduire l'effort de calcul. Une heuristique de ce type est applicable dans le cas où la fonction de coût est le résultat d'estimations statistiques ; ainsi, elle n'est pas connue très



précisément ou se situe dans une fourchette de valeurs avec une certaine probabilité.

### **3.2 Modèle d'optimisation de la ferraille**

La plupart des usines de production d'acier disposent de leur propre logiciel d'optimisation de la ferraille, que certains appellent "optimiseur de ferraille". La complexité des optimiseurs de ferraille varie d'une usine à l'autre. Le plus simple est un couple de recettes basées sur l'expérience, comme celle utilisée par ArcelorMittal, Contrecoeur. Les ingénieurs élaborent des recettes de ferraille pour différentes qualités d'acier sur la base de leur expérience passée. Les recettes dépendent des exigences de production et des propriétés de la ferraille, telles que la composition chimique, le rendement et le volume, et tiennent compte des prix et de la disponibilité sur le marché de la ferraille. Lors de l'élaboration de la recette, les ingénieurs prennent également en compte les limites logistiques afin d'éviter les problèmes tels que les retards de production et les ruptures d'électrodes.

Un cas plus complexe consiste à construire un modèle théorique basé sur des principes chimiques et physiques connus tels que la thermodynamique, la mécanique, l'électricité, la dynamique des fluides et la cinétique des réactions. MacRosty et Swartz [9] ont présenté un modèle détaillé du processus de fusion et des réactions chimiques dans un four à arc électrique basé sur des principes fondamentaux et comportant un certain degré d'empirisme lorsque les mécanismes réels étaient difficiles à modéliser ou que les informations n'étaient pas suffisantes. Contrairement à la prise en compte du processus de fusion dans un modèle, d'autres facteurs, comme la consommation des électrodes, l'oxygène ou l'énergie, ont été introduits dans le modèle par Snell [14] afin d'optimiser le coût total.

L'optimisation de la ferraille peut être compliquée par l'utilisation de recettes de ferraille "dynamiques". Les paramètres de l'optimiseur, tels que le coût, la

composition chimique et la densité, sont mis à jour régulièrement. La plupart des modèles d'optimisation de la ferraille sont dynamiques dans une certaine mesure.

Une autre solution consiste à construire un modèle empirique basé sur l'évaluation statistique des mesures de processus provenant d'une production normale ou d'essais expérimentaux. Dans les modèles théoriques, il est essentiel de connaître les propriétés des matières premières et les mécanismes de réaction, car tout écart par rapport aux propriétés supposées entraîne un biais de calcul. Par rapport aux modèles théoriques, les modèles empiriques sont plus avantageux pour éviter les écarts importants car ils sont basés sur des relations statistiques relatives entre les variables mesurées plutôt que sur les propriétés physiques. Sandberg [10] ont élaboré un modèle statistique multivarié qui évalue la manière dont les données de production stockées dans le système d'enregistrement des processus peuvent être utilisées pour améliorer les pratiques d'exploitation et optimiser l'utilisation de l'énergie et de la ferraille. Ce modèle prévoyait l'analyse chimique finale de l'acier, la consommation d'énergie, le rendement métallique et certaines estimations des propriétés de la ferraille. Cependant, si la qualité de la matière première fluctue, la capacité de modéliser le processus est limitée et les variations systématiques rendent le modèle peu fiable.

La composition chimique de la ferraille est très incertaine, ce qui peut faire en sorte qu'un mélange de ferraille ne réponde pas aux exigences de composition du produit final. Rang et Lahdelma [19] ont mis au point un modèle de programmation linéaire à contraintes floues et ont représenté l'incertitude sur la base de la théorie des ensembles flous. Ainsi, le risque de défaillance peut être couvert par une combinaison appropriée des niveaux d'aspiration et des facteurs de confiance pour représenter les nombres flous.

Récemment, des techniques d'intelligence artificielle ont été employées pour optimiser le coût des rebuts, telles que les réseaux neuronaux artificiels [6] [18] et l'algorithme de la colonie de fourmis [12]. Un modèle de réseau neuronal est souvent développé pour contrôler le four électrique à arc.

et d'optimiser le coût des matériaux et le coût de la fonte. Wilson [6] a développé le système ScrapMaster de NEURAL pour minimiser le coût des matières premières. Ce système d'optimisation de la ferraille permet de tenir compte de la variabilité des propriétés de la ferraille et de fournir des mises à jour en ligne des estimations des propriétés de la ferraille sur la base de mesures chimiques antérieures de la fusion. Liu [12] a présenté un modèle efficace pour le problème de la minimisation du coût des matières premières avec une grande incertitude. Dans son travail, il a principalement pris en compte les matériaux d'alliage et a basé son modèle sur les propriétés suivantes d'éléments d'alliage, d'éléments nocifs et de normes d'entreprise. Un algorithme heuristique, l'algorithme de la colonie de fourmis, a été proposé. Les résultats ont montré que l'algorithme proposé était plus performant que les solveurs de programmation linéaire en ce qui concerne la qualité des solutions et les performances globales.

### **3.3 Modèle de distribution de la ferraille**

Outre l'optimisation des coûts de la ferraille, il existe généralement un système d'optimisation des processus d'approvisionnement en ferraille. L'objectif du système d'optimisation des processus est d'augmenter la productivité. Bernatzki [8] a développé un modèle d'optimisation de la ferraille en tenant compte à la fois du système de transport de la ferraille et du four électrique à arc. Cependant, dans son modèle, la dilution avec la ferraille a été utilisée pour réduire la température excessive produite par le soufflage d'oxygène sur le métal chaud. Un répartiteur de ferraille a été pris en compte dans la modélisation de l'ensemble du système. Ainsi, la capacité d'approvisionnement en ferraille a également été traitée comme une

contrainte.

Cependant, seul un modèle à train unique a été développé, alors qu'un modèle à trains multiples est souhaitable dans le cadre d'une planification globale générale.

Les règles de branchement et de délimitation ont été largement utilisées dans l'optimisation du coût de la ferraille dans les travaux de Bernatzki

[8] ; il a mis en œuvre une méthode de programmation en nombres entiers mélangés (MIP) basée sur la méthode branch and bound.

algorithme. Des techniques basées sur l'optimisation polyédrique ont été employées pour améliorer le modèle et réduire le temps de résolution. Ces techniques comprennent la fixation et l'élimination des variables, la réduction des coefficients, les plans de coupe et l'ordre de priorité.

La fixation des variables est un processus dans lequel les valeurs des variables peuvent être facilement déterminées à l'avance et sont remplacées par des valeurs constantes. Dans le modèle de Bernatzki, tous les wagons contenant plus de  $k$  tonnes de ferraille n'ont jamais été nécessaires. Les règles de délimitation ont également été rendues plus strictes grâce à la réduction des coefficients. Par exemple, la quantité totale maximale de ferraille sur une seule voie a été ramenée de 600 à 400 tonnes, de sorte que certaines solutions non entières étaient irréalisables.

Dans la structure combinatoire d'un problème, si deux ou plusieurs variables sont équivalentes, l'une d'entre elles peut être réservée et les autres supprimées. Cette technique s'appelle l'élimination des variables. Dans le modèle de distribution de la ferraille de Bernatzki, certains wagons ont été considérés comme équivalents et le nombre effectif de wagons a été réduit.

Le chargement des godets est une tâche simple, bien qu'elle soit devenue essentielle pour gagner du temps lors du chargement d'un four. Peu de documents ont été trouvés sur ce sujet. Un projet de l'université de Pretoria a mené des recherches similaires dans ce domaine [7]. Ils ont établi une procédure d'exploitation standard basée sur la programmation linéaire concernant le chargement de la ferraille dans des godets et ont également effectué une simulation sur la décision d'allouer ou non des godets supplémentaires à des



lignes de fusion spécifiques. Ils ont utilisé le logiciel commercial Lingo pour résoudre le modèle.

Management Science Associates Inc. a mis au point un optimiseur de ferraille, le logiciel MSA's Blending Optimization Software Suit and Scrap Yard Systems, y compris scrap

et l'optimisation du chargement des couches de godets [2]. Ce modèle a permis d'améliorer la cohérence des matériaux chargés et de réduire les temps de chargement des godets. Enfin, le système indique l'emplacement des matériaux sous la grue et le chargement des godets par couches.

## CHAPITRE 4

### Modèle d'optimisation des déchets dans un four à arc électrique

Ce chapitre porte principalement sur la modélisation du problème d'optimisation du coût du rebut. Le problème d'optimisation des coûts de rebut est un problème combinatoire *NP* -hard.

Par conséquent, des règles de branchement et de liaison sont utilisées pour réduire la charge de travail de calcul. L'un des objectifs du développement d'un modèle numérique d'optimisation de la ferraille est de générer une recette de production dynamique optimale sur la base des prix dynamiques de la ferraille et de sa disponibilité. A cette fin, un effort substantiel a été fait pour modéliser mathématiquement le coût et toutes les contraintes impliquées dans ce problème. Les contraintes étant linéaires, ce modèle a été basé sur la programmation linéaire. Les contraintes liées au choix des règles de branchement et de limitation sont particulièrement importantes.

L'optimisation du coût de la ferraille se heurte à deux difficultés principales :

- Les différentes ferrailles d'acier sont généralement classées en différentes catégories ; par exemple, il y a 14 catégories chez ArcelorMittal, Concrecoeur. Les matériaux inclus dans une catégorie peuvent être très hétérogènes ; en d'autres termes, les propriétés des matériaux à l'intérieur d'une catégorie peuvent varier de manière significative, parfois plus qu'entre les catégories. Par

conséquent, l'analyse de la composition chimique de chaque type de ferraille est très difficile, tout comme celle des combinaisons mixtes de ferraille.

- Le choix de l'incrément pour chaque catégorie de déchets est un compromis entre la complexité des calculs et l'optimisation des coûts. Un petit incrément augmente le calcul de manière exponentielle, tandis qu'un grand incrément détériore l'optimisation des coûts. Par conséquent, les décisions doivent être prises en fonction des exigences de production.

La section 4.1 présente un modèle mathématique ainsi qu'une discussion sur la fonction objective et les contraintes. Éléments chimiques dans l'acier liquide et les coûts de la ferraille sont estimés dans le modèle. Afin d'obtenir la qualité et la quantité souhaitées, chaque unité d'acier en bain de fusion a ses propres contraintes matérielles ou des contraintes fixées par le four à arc électrique, telles que la capacité du four. La section 4.2 est consacrée à la détermination d'une approche pour résoudre ce problème en démontrant comment les règles de branchement et de délimitation sont utilisées. Dans cette section, beaucoup d'efforts sont faits pour choisir une stratégie de sélection ainsi que des règles de branchement et de bornage, et les performances de chaque règle sont comparées. Enfin, la section 4.3 traite des techniques et des heuristiques appliquées au modèle afin d'augmenter la vitesse de calcul de l'algorithme d'optimisation. Cette section aborde également le compromis entre la performance de l'algorithme et la solution optimale.

#### **4.1 Mise en place du modèle mathématique**

Cette section détaille le modèle qui représente mathématiquement le problème d'optimisation du coût de la ferraille. Nous commençons par énoncer la fonction objective dans la sous-section

4.1.1 et suivie d'une analyse des contraintes, y compris les contraintes liées aux matières premières dans la sous-section 4.1.2, la capacité du four électrique à arc dans la sous-section 4.1.3, et la disponibilité des stocks et de la ferraille dans la sous-section 4.1.3.

#### 4.1.1 Modèle de coût de la ferraille

Dans le modèle, notre fonction objective est la fonction de coût de la ferraille d'acier demandée. Un point à souligner est la prise en compte du rendement dans la fonction de coût. En outre, ce coût est calculé par tonne. La fonction de coût est exprimée comme suit :

$$Coût = \frac{1}{W} \sum \frac{P_i * Q_i}{Y_i}$$

où :

$W$  : poids cible de l'acier liquide ;

$P_i$  : le prix de la ferraille  $i$  ;

$Q_i$  : la quantité de déchets  $i$  ;

$Y_i$  : le rendement de la ferraille, chaque type de ferraille ayant un rendement d'acier liquide par tonne de ferraille.

Lors de la modélisation du coût, le prix et la quantité de ferraille sont naturellement traités comme faisant partie du coût, mais le rendement est également considéré comme un paramètre, qui reflète le lien entre la ferraille et l'acier liquide. Le rendement est une propriété estimée de la ferraille par les fournisseurs de ferraille, qui peut être comprise comme la pureté de la ferraille, et qui est très pertinente pour le poids cible du robinet. D'un point de vue mathématique, le rendement est approximativement le pourcentage d'acier liquide par rapport à la ferraille. La valeur de rendement détermine la quantité totale de ferraille utilisée dans la production. Le prix total de la ferraille est égal à un produit de la quantité de chaque type de ferraille et de son prix correspondant.

Dans notre projet, le métal chaud restant après le soutirage de l'acier liquide

du four électrique à arc est ignoré en raison de sa quantité faible et variable, bien que de nombreux modèles d'optimisation soient utilisés.



Dans d'autres usines, ce facteur est pris en compte. Cette quantité d'acier liquide pourrait influencer la composition chimique de l'acier liquide taraudé par la suite. Toutefois, cet impact est très limité.

#### **4.1.2 Matières premières**

L'acier liquide cible est produit par la fusion de ferrailles d'acier dans le four électrique à arc. Ici, nous ignorons l'incertitude des pertes dues à la combustion des éléments chimiques au cours du processus de fusion. Cependant, les propriétés de l'acier liquide sont fortement influencées par la ferraille d'entrée. Non seulement un modèle d'optimisation de la charge comporte généralement des contraintes relatives à l'équilibre chimique de l'acier, mais les propriétés chimiques de la ferraille sont également soumises à des contraintes. Les contraintes d'équilibre chimique se réfèrent à la somme, dans l'acier liquide final, des divers éléments chimiques présents dans les différentes ferrailles.

##### **Teneur en éléments chimiques**

ArcelorMittal produit de l'acier en coulant environ 20 unités de bain de fusion par jour. Quatre types d'acier sont produits, classés en fonction de leur teneur maximale en cuivre. La teneur en cuivre est l'élément chimique le plus important à prendre en compte dans notre modèle. Le tableau 4-1 présente les qualités d'acier et la teneur en cuivre.

Tableau 4-1 : Types d'acier

Type d'acier	Teneur en cuivre
J 1	0.50-0.80%
J 2	0.35-0.40%
J 3	0.30%
J 4	0.25%

Outre le cuivre, le chrome, le soufre et l'étain sont également des éléments chimiques qui déterminent la qualité de l'acier liquide. Étant donné que certains types de ferraille contiennent une forte teneur en

Le pourcentage de ces éléments chimiques n'est pas très élevé, mais il ne devient plus significatif que lorsque ces types de ferraille sont utilisés comme matière première. La teneur finale en chrome et en soufre doit être inférieure à 0,2 %. Certains types de crânes contiennent un pourcentage élevé de chrome ou de soufre, et ces crânes doivent être limités dans chaque chaleur afin d'éviter de dépasser la limite supérieure de la teneur en chrome et en soufre. Les aciers de rebut, tels que les boîtes de conserve et certains types de crânes externes, contiennent un pourcentage élevé d'étain et, s'ils sont utilisés comme matière première, la teneur en étain devient significative. Dans la plupart des cas, il existe une limite supérieure pour la teneur en éléments chimiques d'une recette.

La teneur en éléments chimiques de l'acier est estimée par l'équation générale suivante

$$E = \frac{\sum Q_i * C_i}{\sum Q_i}$$

où :

$E$  représente la teneur en éléments chimiques dans la combinaison finale de ferrailles ;  
 $C_i$  est la teneur en éléments chimiques de la ferraille  $i$ . D'un point de vue mathématique, cette contrainte peut être représentée comme suit

$$E \leq E_{max}$$

où  $E_{max}$  est la teneur maximale en éléments chimiques dans l'acier liquide taraudé.

### **Propriétés chimiques**

La raison pour laquelle nous considérons les propriétés chimiques de la

ferraille comme des contraintes dans le modèle est que ces propriétés peuvent influencer la quantité de ferraille utilisée dans chaque chaleur. Nous considérons deux aspects des propriétés chimiques de la ferraille. Certaines ferrailles ont une

Les ferrailles ont une fonction spécifique lorsqu'elles sont fondues dans le four à arc électrique. Cela est dû à la structure chimique de la ferraille. Dans le modèle, nous tenons compte de la difficulté de fondre la ferraille. Les différents types de ferraille se voient attribuer des limites inférieures ou supérieures pour la quantité d'acier devant figurer dans une recette. Quelques exemples illustrent ce type de contrainte dans la section suivante. En général, ces contraintes sont interprétées mathématiquement comme suit

$$q_i \leq U$$

ou

$$q_i \geq L$$

Tout d'abord, il devrait y avoir des quantités minimales de /1 ferraille par chaleur, car l'utilisation de ce type de ferraille peut aider à faire fondre d'autres ferrailles plus rapidement. Deuxièmement, il faut beaucoup d'énergie pour faire fondre le fil de pneu et les tournures. Une limite supérieure par chaleur est donc attribuée à ces deux ferrailles. Troisièmement, les crânes sont difficiles à fondre ; la quantité totale de crânes, y compris les crânes externes et internes, a donc une limite supérieure. Le tableau 4-2 présente ces limites inférieures ou supérieures pour différents aciers de rebut.

Tableau 4-2 : Ferrailles d'acier dont la quantité est limitée

Type de ferraille	Limite supérieure (U) ou inférieure (L) (lbs)
/ 1	3000 (L)
Pneus et virages	5000 (U)
Crânes	2500 (U)

### **Autres contraintes**

Une autre contrainte très importante est le nombre de ferrailles utilisées à chaque chauffe. Dans le hall des ferrailles, deux voies de wagons sont assemblées avec un maximum de

12 wagons, 6 sur chaque voie. La quantité d'acier contenue dans les wagons produit 6 à 8 échauffements, puis les rames de wagons sont remplacées par deux autres rames de wagons.

Pour garantir une production normale, le nombre de types de ferraille doit être limité en raison de la difficulté de charger les wagons avec de nombreux types de ferraille et de remplacer les wagons vides suffisamment tôt pour pouvoir charger les godets pour le four électrique à arc. En fait, le nombre maximum de ferrailles par chaleur est déterminé par l'expérience des opérateurs. Chez ArcelorMittal, cette limite supérieure est généralement de huit.

#### **4.1.3 Capacité du FEA**

En tant que principale installation de production d'acier, le four électrique à arc limite la production d'acier.

Les contraintes du four électrique à arc proviennent de deux sources principales : la capacité de production et la structure de stratification des ferrailles dans la benne.

La capacité de production d'un four électrique à arc est limitée en raison du poids de ferraille visé par chaleur et du volume du four. Le poids cible de l'acier liquide limite la quantité totale de ferraille. Certains types de ferraille utilisés dans la production ont une faible densité ; par conséquent, ils peuvent facilement occuper beaucoup d'espace dans le four. La quantité d'acier liquide à produire, la densité de la ferraille et le volume du four électrique à arc limitent la quantité totale de ferraille pouvant être introduite dans un four électrique à arc. Dans les opérations réelles, la ferraille est chargée dans le four électrique à arc en deux ou trois étapes. Après la fusion de la première charge, l'alimentation du four est coupée et un autre seau de ferraille est introduit dans le four. Ensuite, le four est remis en marche et la fusion

reprend. En

la recette, la quantité totale de ferraille fondue doit atteindre le poids cible. Dans certains cas, la somme de deux charges de ferraille ne permet pas de produire la quantité d'acier liquide requise, et une troisième charge est nécessaire pour produire suffisamment d'acier liquide. Le poids de la ferraille doit être égal au poids total de la ferraille fondue.



Le montant de ces frais dépend du cas spécifique et est décidé par un opérateur en temps réel.

Le volume de ferraille est un autre facteur important déterminé par le modèle d'optimisation. Pour garantir une production d'acier aussi régulière que possible, chaque charge doit avoir un volume maximum afin d'éviter les difficultés de fermeture du four. Le four électrique à arc utilisé par ArcelorMittal a un volume maximal d'environ 5 000 *pieds*<sup>3</sup>. Le tableau 4-3 présente une estimation de la densité pour chaque type de ferraille. L'estimation du volume de chaque ferraille est donnée par l'équation suivante

$$Volume_i = \frac{Masse_i}{Densité_i}$$

qui s'interprète mathématiquement comme une contrainte comme suit

$$\sum Volume_i \leq 5000$$

En outre, certains types de ferraille sont composés de gros morceaux, comme les crânes. Afin de réduire les difficultés lors du chargement, nous devons limiter la quantité de certains types de ferraille par chaleur, comme les crânes.

Afin d'éviter que les électrodes ne se cassent et de faciliter le chargement de la ferraille, la ferraille est chargée dans le four électrique à arc par couches. Les ferrailles de faible densité et aux propriétés physiques douces sont placées dans les couches supérieure et inférieure. L'épaisseur de ces couches doit garantir que les électrodes ne pénètrent pas dans la couche supérieure de ferraille et ne touchent pas la ferraille plus dure, ce qui permet de limiter la quantité de ferraille

déchetée. Chez ArcelorMittal, cette quantité minimale de ferraille par chaleur est de 4 000 livres.

Tableau 4-3 : Densité de la ferraille

Type de ferraille	Densité ( <i>lbs/ft</i> ) <sup>3</sup>
DRI	100
Busheling	43.3
Plaques et structures	42.9
Déchiqueter	69.5
<i>J</i> 1	34.5
<i>J</i> 2	20.4
Fil de pneu	75
Tournants	102.7
Boîtes de conserve	28.3
Fonte	150
Crânes externes	200
Crânes internes	200
Billetes	250
Revers roulé	175

#### 4.1.4 Disponibilité des stocks et de la ferraille

ArcelorMittal dispose d'un inventaire d'environ 30 types de ferraille, avec des prix et des propriétés différents. Cependant, ils ne sont pas toujours disponibles tous les jours.

La consommation de ferraille est donc limitée par la disponibilité des stocks.

Cette contrainte peut être interprétée de deux manières. Certaines ferrailles sont peu stockées et ne sont utilisées qu'en petite quantité par chaleur. La quantité de ce type de ferraille a donc une limite supérieure. Cette contrainte peut être représentée mathématiquement comme suit :

$$q_i \leq Max_i$$

où  $Max_i$  est la limite supérieure de la quantité de ferraille utilisée pour la production.

D'autre part, certaines ferrailles sont chères mais facilement disponibles. Par

conséquent, une quantité minimale de ces types d'aciers de rebut est utilisée par chaleur. Cette contrainte

peut être représentée mathématiquement comme suit :

$$q_i \geq Min_i$$

où  $Min_i$  est la limite inférieure de la quantité de ferraille utilisée pour la production.

Pour résumer la section 4.1, le problème d'optimisation de la charge de rebut pour minimiser les coûts des matières premières est représenté comme suit

Minimiser

$$\frac{1}{W} \sum_{i=1}^n \frac{P_i * Q_i}{Y_i}$$

Sous  
réserve de

$$\frac{\sum Q_i * C_i}{\sum Q_i} \leq Emax$$

$$\sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{D_i} \leq 5000$$

$$Q_i \leq$$

$$U \quad Q_i$$

$$\geq L \quad n$$

$$\leq 8$$

Le modèle mathématique montre que l'optimisation peut être réalisée avec la programmation linéaire. En outre, toutes les variables sont des nombres discrets, de sorte que la modélisation se fait avec la programmation en nombres entiers. Ce problème combinatoire a un grand nombre de solutions réalisables, ce qui demande beaucoup d'efforts de calcul. Cette thèse présente un algorithme efficace de type "branch-and-bound" utilisé pour résoudre le problème. La

section 4.2 illustre la conception de cet algorithme.

## 4.2 Résolution du modèle de programmation linéaire

Cette section explique comment utiliser une approche de branchement et de délimitation dans notre modèle d'optimisation présenté à la section 4.1. L'un des principaux problèmes liés à l'application de la méthode de branchement et de délimitation dans notre modèle d'optimisation de la ferraille est que l'espace de solution est assez vaste, c'est-à-dire qu'un nombre presque infini de subdivisions peut être vérifié pour atteindre la solution optimale. Nous avons 14 types de déchets en entrée et encore plus si nous considérons des sous-types de déchets. En outre, le modèle peut être divisé en de nombreuses solutions.

des subdivisions de l'espace en fonction du plus petit incrément de ferraille considéré. Le défi consiste ici à identifier la combinaison des entrées de rebut et à sélectionner correctement la technique de ramification et les règles de délimitation afin de réduire la charge de calcul.

À cette fin, nous utilisons des règles de branchement en reliant l'augmentation possible de la quantité de ferraille à la capacité de la grue, et en fixant des règles de délimitation à chaque nœud avec la contrainte la plus forte.

Nous allons maintenant présenter un énoncé formel d'un prototype d'algorithme de branchement et de délimitation pour le problème d'optimisation de la ferraille. Les mots en italique constituent les opérations critiques de l'algorithme et sont discutés dans les sous-sections suivantes. Les notations utilisées dans cette partie sont les suivantes.

**Notation :** *P* Liste des sous-problèmes ; *k* Numéro d'itération ;  
*M* Incrément ;

$S^k$  Sous-ensemble correspondant à  
l'itération  $k$  ;  $u^k$  Borne supérieure  
obtenue à l'itération  $k$  ;  $l^k$  Borne  
inférieure obtenue à l'itération  $k$  ;



$X^k$  Solution faisable du sous-problème k

; U Limite supérieure de l'optimum

global ; L Limite inférieure de

l'optimum global ;  $X^*$  Solution optimale

globale candidate. *L'algorithme*

**Initialisation** : Traiter le problème en définissant les données initiales  $(S^0, U^0, L)$ .<sup>0</sup>

Ajouter le problème  $\min[f(X)]$ . Mettre  $k=0$ .

**Itération k** :

**Étape k.1** : Si  $P = 0$ , terminer ; sinon, sélectionner un sous-problème k dans la liste  $P$  de l'ensemble des sous-problèmes. La quantité de ferraille d'un type dans chaque combinaison est différente d'un multiple de l'incrément  $M$ .

**Étape k.2** : *Délimitation de la* solution supérieure et inférieure du sous-problème k. Déterminer une solution réalisable  $X^k$  à partir de  $P$  et calculer la borne supérieure  $u^k$  et la borne inférieure  $l^k$ .

**Étape k.2.a** : Définir  $L \leftarrow \min l^k$ .

**Étape k.2.b** : Si  $u^k < U$ , alors  $X^* \leftarrow X^k$  et  $U \leftarrow u^k$ .

**Étape k.2.c** : Examiner le sous-problème. Si  $u^k \geq U$ , passer à l'étape K.2 et sélectionner un autre sous-problème.

**Étape k.3** : *Branchement*, partitionnement de  $S^k$  en  $S^{k1}$  et  $S^{k2}$  par l'ajout d'un type de rebut au problème actuel. Fixer  $k \leftarrow k + 1$  et passer à l'**étape k.1**. Modifier ensuite la quantité d'un type de rebut en ajoutant un incrément de rebut du minimum au maximum.

Les déclarations ci-dessus sont également illustrées à la figure 4-1. La liste des sous-problèmes du niveau 1 (rebut 1) est divisée en ajoutant le rebut 2 et nous

obtenons un autre niveau.

de sous-problèmes, comme le montre le niveau 2 (Scrap 2). La stratégie de sélection est également illustrée à la figure 4-1. Dans chaque ensemble de sous-problèmes ramifiés à partir du niveau supérieur, chaque combinaison est sélectionnée en ajoutant un multiple de l'incrément de rebut pour chaque type de rebut. Au niveau du rebut 2, l'étape **k.2.c** est illustrée. Par exemple, la combinaison (2000, 4000) de la figure 4-1 est limitée et s'arrête à l'étape suivante.

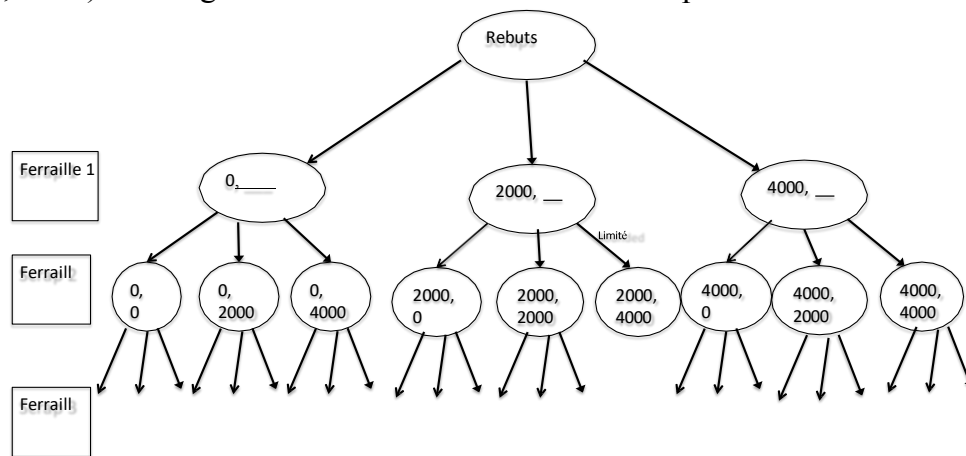


Figure 4-1 : Illustration des règles de branchement et de dérivation

#### 4.2.1 Données initiales

Bien qu'elle ne soit pas souvent mentionnée explicitement, une autre question clé dans la résolution d'un grand problème d'optimisation combinatoire par des règles de branchement et de délimitation est la construction d'une bonne solution initiale réalisable. Dans ce problème, la fonction objective est le coût total des rebuts, qui est obtenu à l'aide de la formule suivante

$$Coût = \frac{1}{W} \sum \frac{P_i * Q_i}{Y_i}$$

Le coût de chaque rebut est calculé en fixant  $P_i = W_i$ . Ensuite, le rebut dont le coût est le plus élevé est considéré comme le rebut objectif initial, dont le coût est sélectionné comme élément de l'ensemble initial  $U^0$ . Les autres éléments de l'ensemble initial sont des données d'entrée, telles que les teneurs en éléments chimiques, et les quantités minimale et maximale de rebut utilisées par chaleur.

#### **4.2.2 Stratégie de sélection**

La stratégie de sélection du sous-problème à étudier plus avant est généralement un compromis entre la simplicité du calcul et l'obtention de la solution optimale à un coût aussi faible que possible. À l'étape **k.1**, un sous-problème doit être sélectionné dans la liste des problèmes  $P$ . Ensuite, ce sous-problème est pris en compte pour le bornage et le branchement ultérieur. L'opération de sélection est très importante pour un algorithme de branchement et de délimitation. Dans notre modèle, une combinaison de la meilleure stratégie de recherche et de la première stratégie de recherche en largeur est employée.

Le sous-problème dont la valeur de la fonction de délimitation est inférieure à la solution optimale du problème est exploré en premier. Cette stratégie est appelée "best first search". Parallèlement, une stratégie de recherche en largeur est également utilisée pour améliorer les performances de l'algorithme. Dans cette dernière stratégie, tous les nœuds situés à ce niveau de l'arbre de recherche sont traités avant d'explorer tout nœud situé à un niveau supérieur.

#### **4.2.3 Incrément**

L'incrément  $M$  est un paramètre qui détermine la combinaison de rebuts dans un niveau de l'arbre de recherche, en distinguant différents nœuds à un niveau. Le choix de l'incrément détermine la difficulté du calcul et dépend de quelques

facteurs.

Le premier facteur est la facilité de contrôle des types de rebut dans la recette pour les opérateurs, qui donne une limite supérieure à l'incrément. Si l'augmentation dépasse une limite supérieure, certains problèmes se posent. Par exemple, si seuls quelques types de ferraille sont utilisés, certains paramètres, tels que la teneur en éléments chimiques, le volume et le coût, changent. L'augmentation d'un incrément entraîne une forte augmentation des coûts, ce qui peut conduire à manquer une solution optimale potentielle dans l'intervalle de l'incrément. Par conséquent, un incrément important rend l'optimisation des coûts difficile. Au contraire, un petit incrément rend l'algorithme très coûteux en termes de calcul, car l'arbre de recherche est extrêmement grand. Par exemple, si 14 types de ferraille sont utilisés comme données d'entrée et que l'incrément est réduit de 4000 à 2000, le nombre de calculs augmente d'un facteur allant jusqu'à  $2^{14}$ . Il convient donc de fixer une limite inférieure pour l'augmentation. En règle générale, plus l'augmentation est faible, moins l'optimisation du coût de la ferraille est importante. Il s'agit ici d'un compromis entre la difficulté et la solution optimale.

#### **4.2.4 Règles de branchement**

Les règles de branchement d'un algorithme de branchement et de délimitation peuvent être considérées comme la subdivision d'une partie de l'espace de recherche par l'ajout de contraintes, dans notre cas sous la forme de l'attribution d'un nouveau type de ferraille au problème. Le nombre de types de ferraille est déterminé par l'inventaire. Il y a souvent 14 types de ferraille utilisés pour produire de l'acier, mais certains types de ferraille ont de nombreux sous-types, ce qui augmente la complexité du problème. Dans le modèle, nous

considérons chaque sous-type individuellement. Ces sous-types varient en fonction de leur teneur en éléments chimiques ou de leur prix, en raison des différentes sources d'achat. Par exemple, il existe 7 types de

des crânes externes dont le prix et la teneur en éléments chimiques varient. Le tableau 4-4 présente les sous-types courants de déchets et leurs différences.

Tableau 4-4 : Ferrailles d'acier avec sous-types

Code de la ferraille	Type de ferraille	Prix (\$)	Cu (%)	Cr (%)	S (%)	Sn (%)
105	Busheling	359	0.12	0.04	0.01	0.008
126	Busheling	310	0.12	0.04	0.01	0.008
305	Busheling	373	0.12	0.04	0.015	0.008
209	Crânes externes	196	0.02	0.09	0.08	0.006
109	Crânes externes	196	0.02	0.1	0.5	0.02
208	Crânes externes	201	0.05	0.06	0.07	0.006
211	Crânes externes	196	0.21	0.11	0.002	0.015
508	Crânes externes	196	0.05	0.06	0.07	0.006
609	Crânes externes	180	0.04	0.04	0.09	0.004
709	Crânes externes	150	0.12	0.95	0.006	0.006
204	Déchiqueter	401	0.2	0.071	0.02	0.013
304	Déchiqueter	390	0.4	0.1	0.02	0.2
104	Déchiqueter	413	0.3	0.11	0.04	0.008
404	Déchiqueter	401	0.35	0.041	0.04	0.008

À un niveau de l'arbre de recherche, les sous-problèmes sont subdivisés en ajoutant un incrément d'un type de ferraille dans la fourchette de la quantité de ferraille autorisée par chauffage. Cette règle de branchement peut être contrôlée en modifiant la quantité minimale et maximale de ferraille autorisée par chauffage et l'incrément.

#### 4.2.5 Fonction de délimitation

En tant qu'élément clé de tout algorithme de branchement et de délimitation, une fonction de délimitation de haute qualité peut rendre l'algorithme efficace. Un bon choix de branchement et une bonne sélection de stratégies ne peuvent pas compenser des fonctions limites de mauvaise qualité pour réduire l'effort de calcul.



Dans notre modèle, une fonction limite est sélectionnée parmi toutes les contraintes. En outre, la fonction objective, le coût,

est également considérée comme une fonction de délimitation. Une bonne fonction de délimitation doit être suffisamment forte et, dans notre cas, une combinaison de deux fonctions de délimitation est également employée pour augmenter la force de la délimitation. Pour décider de la force de chaque contrainte, une simulation est mise en place.

### **Simulation**

Dans cette simulation, 6 types de déchets sont pris en considération et un ensemble de fonctions limites est construit sur la base de contraintes telles que le coût, le volume, le poids, la teneur en cuivre et la teneur en chrome. Dans chaque simulation, l'une de ces contraintes est sélectionnée comme fonction limite à l'aide du même algorithme. Toutes les contraintes doivent être sélectionnées une à une et le temps de simulation est utilisé comme indicateur.

pour comparer la force d'une fonction d'encadrement. Pour garantir l'intégrité de la simulation, les séries de simulations mentionnées ci-dessus sont répétées pour 5 essais avec des données d'entrée différentes et le temps moyen pour chaque règle limitative est utilisé pour déterminer la force des contraintes. Le tableau 4-5 présente les résultats des simulations.

Comme le montre le tableau 4-5, le coût et le poids de la ferraille sont les deux règles limitatives les plus fortes parmi toutes les contraintes utilisées dans notre modèle. Toutefois, nous prenons également en compte d'autres règles telles que la teneur en cuivre, même si la force de cette contrainte n'est pas aussi élevée que celle du coût et du poids. La raison en est la suivante.

- Notre modèle est utilisé dans un environnement très dynamique qui peut inclure des ferrailles d'acier spécial à forte teneur en cuivre.

- Le cuivre est un élément chimique très important utilisé pour déterminer la qualité de l'acier liquide

Tableau 4-5 : Test de résistance de la règle de délimitation

Fonction de délimitation	Durée moyenne d'exécution de l'algorithme (secondes)
Pas de fonction de délimitation	260
Coût	62
Teneur en cuivre	110
Teneur en chrome	233
Volume	124
Poids	70

### 4.3 Accélérer le processus de résolution du modèle

La description détaillée du modèle d'optimisation et de l'algorithme de branchement et de liaison dans les sections 3.1 et 3.2 jette les bases de la recherche de la solution optimale. La résolution des problèmes d'optimisation des rebuts dans un cadre dynamique introduit un autre niveau de complexité, car le temps de réponse devient une question cruciale lorsque le nombre d'aciers mis au rebut augmente. Même si nous pouvons finalement trouver la solution optimale, l'algorithme susmentionné est trop coûteux en termes de calcul pour être appliqué dans un cadre dynamique. Par exemple, l'algorithme passe autant de temps qu'une heure pour terminer toutes les branches en considérant 10 types de ferraille, et pire encore, il faut deux heures en considérant 14 types de ferraille. Par conséquent, certaines technologies d'amélioration du modèle sont introduites dans le modèle ci-dessus afin de réduire le temps nécessaire à la recherche d'une solution optimale. Cependant, la mise en œuvre de diverses techniques avec ce type de fonction dans un tel environnement représente un défi considérable.

Dans le paragraphe suivant, certaines techniques typiques développées pour notre modèle d'optimisation dynamique du coût de la ferraille sont décrites en détail.

En fait, il existe deux classes principales : la première comprend des techniques qui améliorent les règles de branchement et introduisent de nouvelles règles de branchement.

des contraintes supplémentaires telles que l'ordre de priorité et la limitation des prévisions, et la seconde est l'utilisation d'heuristiques.

### **Ordre de priorité**

L'une des méthodes les plus efficaces pour améliorer la performance des solutions consiste à attribuer une priorité de branchement aux variables. Les variables se réfèrent à des rebuts dans le modèle. Pour décider quelle variable doit avoir une priorité plus élevée, les résultats de la simulation de la sous-section 3.2.4 sont utilisés comme référence. Comme les résultats montrent que le coût est la contrainte la plus forte, il est considéré comme la règle de priorité pour chaque variable. Ferraille

les aciers ayant des priorités plus élevées, à savoir des coûts plus élevés, sont sélectionnés et ramifiés dans l'arbre de branchement avant les ferrailles ayant des priorités moins élevées.

La prise en compte de la ferraille dans le problème dynamique ne se fait pas de manière aléatoire, mais plutôt de manière séquentielle. Lors de la conception de l'algorithme, les déchets d'acier sélectionnés sont d'abord classés en fonction de leur coût, et le déchet le plus cher est considéré comme le premier ensemble de problèmes à partir duquel une solution réalisable est générée.

Ensuite, en tant que règle de branchement, un autre type de rebut est ajouté à l'ensemble du problème original, créant ainsi des partitions d'ensembles de sous-problèmes. Ce type de ferraille ajouté est le deuxième plus coûteux. Cette procédure est ensuite répétée jusqu'à ce que tous les types de ferraille sélectionnés soient utilisés. L'organigramme de l'algorithme de branchement et de délimitation de la figure 4-1 est modifié par cette technique, comme le montre la figure 4-2.

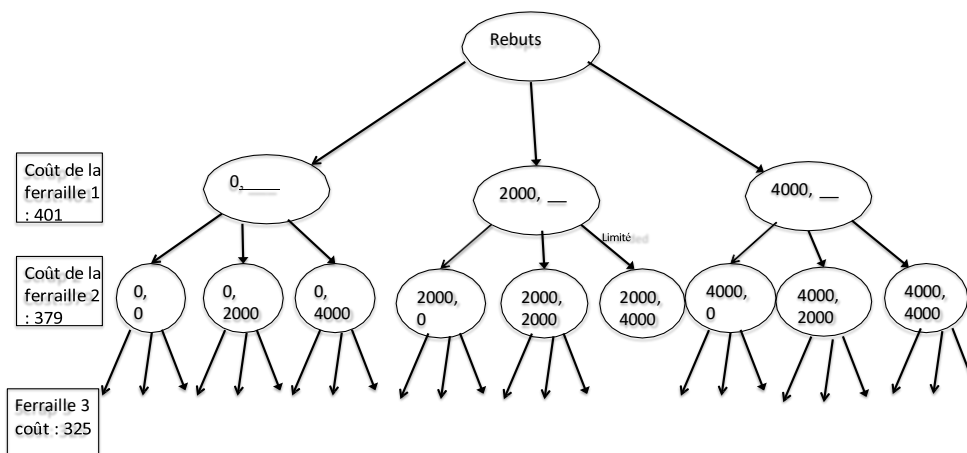


Figure 4-2 : Illustration des règles de branchement et de liaison avec l'ordre de priorité des coûts.

Par conséquent, cette technologie peut améliorer les performances de notre modèle en général. Le plus grand avantage de cette technique est que le coût de rebut, une fonction limite dans l'algorithme, peut être mis à jour avec un coût faible au début de la recherche. Davantage de branches sont limitées dès le début par cette fonction limitative, ce qui permet de gagner du temps en évitant de passer par ces branches. Toutefois, dans certains cas, un effort de calcul important est encore nécessaire pour terminer l'algorithme complet parce que les ferrailles à faible coût sont prises en compte à la fin et deviennent moins sensibles aux règles de limitation des coûts. Par conséquent, la règle de limitation des coûts initialement considérée comme la plus forte est ensuite considérée comme la plus faible. Les performances dépendent fortement des données d'entrée. Par conséquent, le modèle n'est pas suffisamment stable pour obtenir la solution optimale dans une perspective à long terme.

**Prévision de la délimitation.** Une autre méthode efficace pour améliorer la

performance des solutions consiste à réduire les solutions réalisables en ajoutant certaines contraintes de manière à ce que



pour gagner du temps. Dans l'arbre de recherche par embranchement, chaque nœud est exploré par une règle pour décider s'il faut poursuivre la recherche. Cette règle est une contrainte supplémentaire, prédit le coût de la solution la plus réalisable possible et vérifie si cette solution est meilleure que la solution en place. Si elle est meilleure, l'algorithme poursuit le branchement à ce nœud. Dans le cas contraire, ce nœud est abandonné sans autre forme de procès.

Dans l'application, le poids de la ferraille est choisi comme variable pour créer une contrainte supplémentaire, et la limite supérieure est le poids cible de la ferraille en entrée.

Par rapport aux autres paramètres, le poids est le plus important et le plus efficace. Le coût s'affaiblit dans les derniers stades de la ramification lorsque l'on utilise la technique de l'ordre de priorité, alors que le poids reste le même tout au long du processus car l'incrément est prédéfini au début de la recherche. Le volume n'est une contrainte forte que pour les déchets de faible densité tels que  $J/2$  ; il ne peut produire un effet de prédiction constant. D'autres paramètres, tels que la teneur en cuivre et en chrome, ne sont pas forts, comme le montre la simulation de la sous-section 4.2.4. La contrainte supplémentaire peut être représentée mathématiquement comme suit

$$Q_{current} + \sum_{i=m}^{2n} Q_i^{max} \leq Q_{target}$$

où

m est le nombre de ferrailles utilisées ;

n est le nombre de tous les types de ferraille ;

m-n est le nombre de ferraille inutilisée ;

$Q_{current}$  est la quantité actuelle de ferraille utilisée, c'est-à-dire  $Q_{current} = \sum_{i=1}^m Q_i$  ;

$Q_i^{max}$  est la quantité maximale de ferraille utilisée dans chaque chaleur ;

$Q_{target}$  est le poids cible de la ferraille d'entrée.

Dans le modèle, une branche est écartée sans autre partition ni délimitation si la contrainte ci-dessus ne peut être satisfaite, ce qui signifie que la quantité de ferraille actuelle est si faible qu'elle ne peut atteindre le poids de ferraille cible requis, même si l a quantité maximale de ferraille de toute la ferraille d'acier inutilisée est ajoutée. Cette situation est prévue à chaque nœud. Ainsi, certains sous-problèmes déraisonnables sont écartés sur la base de la prédiction. Cette logique est illustrée à la figure 4-3.

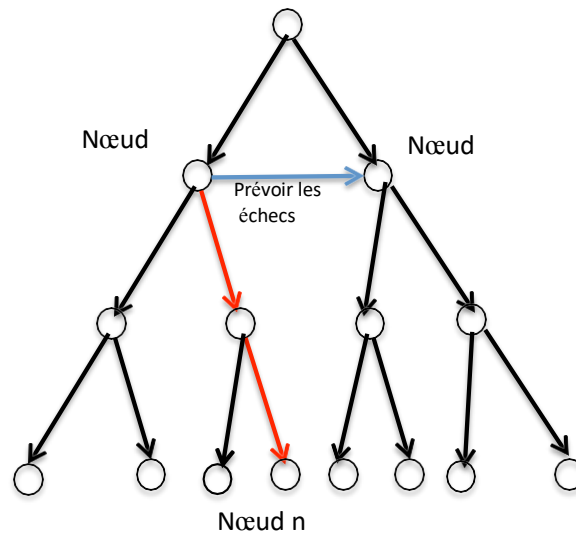


Figure 4-3 : Règle de prédiction appliquée dans l'arbre de recherche

Comme le montre la figure ci-dessus, la contrainte de prédiction est appliquée au **nœud m**. Ensuite, le poids total est calculé le long de la branche en rouge avec le plus grand poids de rebut jusqu'au dernier nœud, le **nœud n**, qui est situé au niveau inférieur de l'arbre de recherche. Si la règle de prédiction échoue, le **nœud m** est écarté et le **nœud m+1** est le prochain nœud vérifié par cette règle.

Cette technique n'a aucune chance d'éliminer une solution optimale, mais elle peut améliorer l'algorithme dans une certaine mesure. En effet, le nombre de sous-problèmes déraisonnables est faible par rapport aux solutions globales possibles. Dans la plupart des cas, cette contrainte supplémentaire reste dans un état d'inactivité, dans lequel le nœud ne peut pas être éliminé. Par conséquent, les performances de cette technique sont moins importantes que celles de l'ordre de priorité.

### **Heuristique**

Le problème d'optimisation du coût de la ferraille est dynamique car l'entreprise achète continuellement de nouveaux types de ferraille auprès de nombreuses sources dont le prix varie et le stock de ferraille est mis à jour tous les mois, toutes les semaines, voire tous les jours. Un modèle stable et efficace est nécessaire pour garantir un taux de production normal.

En règle générale, une heuristique est apprise par l'expérience et ne garantit pas qu'une solution optimale soit trouvée, mais elle peut améliorer l'efficacité ou l'efficience de notre algorithme d'optimisation. De nombreuses heuristiques sont utilisées dans le modèle et la possibilité de trouver une solution optimale est également très élevée. L'introduction d'heuristiques rend notre modèle plus stable, ce qui répond aux exigences du problème de la production industrielle dynamique, même si le prix et la disponibilité de la ferraille changent à une fréquence élevée au cours d'une production à long terme. Il convient de noter que les effets négatifs associés à l'utilisation de l'heuristique sont que la solution optimale globale ne peut pas être trouvée tout le temps.

Le premier type d'heuristique introduit dans le modèle est l'heuristique de

recherche de voisinage. Ces heuristiques sont proposées comme moyen d'aborder efficacement ce problème dynamique et d'optimiser l'apport de ferraille. Ce résultat

est obtenue grâce à une puissante structure de voisinage basée sur le choix de l'incrément. La logique d'une telle heuristique est illustrée comme suit :



Figure 4-4 : Logique heuristique

Comme le montre la logique ci-dessus, une structure de voisinage est construite en réinitialisant l'incrément dans le voisinage de la solution optimale obtenue lors de la première exécution de l'algorithme, dans laquelle l'incrément est si élevé que une solution optimale peut être obtenue rapidement. Ensuite, un sous-ensemble, en tant que structure de voisinage, est sélectionné dans le voisinage de la solution optimale obtenue lors de la première exécution. L'étendue de ce voisinage est soit le nouvel incrément plus petit, soit la quantité maximale du rebut sélectionné. Ensuite, l'incrément  $M$  est réinitialisé à une valeur plus petite et l'algorithme est réexécuté pour ce sous-ensemble. Une autre solution optimale est obtenue lors de la deuxième exécution, qui pourrait avoir soit un coût inférieur à celui de la première solution ou au moins égal à celui-ci. Par conséquent, l'algorithme est plus rapide que sans ce type d'heuristique, même si l'algorithme de branchement et de liaison est exécuté deux fois. L'algorithme peut être exécuté plusieurs fois en fonction des exigences en matière d'efficacité temporelle et de solution optimale.

Un autre type d'heuristique est utilisé dans l'algorithme d'optimisation. À l'**étape k.2** de l'algorithme de branchement et de délimitation, quatre-vingt-dix pour cent de la borne supérieure est utilisée comme borne supérieure heuristique pour délimiter chaque branche. Il en résulte que chaque borne est bornée à l'avance, ce qui permet à l'algorithme de fonctionner rapidement. La solution optimale pourrait

soit une solution optimale locale au lieu d'une solution optimale globale. Par rapport à la technique du bornage prédictif, cette heuristique partage des caractéristiques communes telles que l'élimination de certaines branches pour gagner du temps, mais risque de ne pas atteindre la solution optimale.

En revanche, la technique de prédiction des limites n'écarte pas la solution optimale. Cette heuristique est plus performante que la technique de prédiction des limites en termes de vitesse d'exécution de l'algorithme.

Pour comparer les performances des deux types d'heuristiques, de nombreuses séries de simulations sont construites. Dans la simulation de contrôle des variables, 6 types de ferraille sont utilisés pour que le modèle puisse atteindre les optima très rapidement. 10 séries de simulations sont effectuées, chacune utilisant les mêmes règles de branchement et de délimitation et ayant des exigences différentes pour les aspects suivants : quantité de ferraille autorisée (minimum et maximum), prix de la ferraille, poids de l'acier liquide prélevé et contraintes. Ce que

En outre, dans chaque série de simulations, trois algorithmes sont exécutés avec les mêmes données d'entrée : l'algorithme sans heuristique, l'algorithme utilisant la première heuristique et l'algorithme utilisant la deuxième heuristique. Par conséquent, deux indicateurs pour chaque algorithme sont utilisés pour comparer l'efficacité de deux heuristiques. Les solutions optimales obtenues par chaque algorithme, en tant que premier indicateur d'efficacité, sont enregistrées, et les coûts des solutions optimales sont comparés, ce qui est représenté par un pourcentage calculé en divisant le nombre de simulations avec la même solution optimale par le nombre total de simulations effectuées. Les temps nécessaires à l'exécution des algorithmes, qui constituent l'autre indicateur d'efficacité, sont



enregistrés. Ensuite, pour chaque type d'algorithme, le temps moyen est calculé. Le tableau 4-6 présente les résultats de  
les deux indicateurs comparant l'efficacité des deux heuristiques proposées. En tant que

Comme le montre le tableau 4-6, les heuristiques améliorent de manière significative les performances de l'algorithme de branchement et de liaison avec un degré d'écart plus faible par rapport aux solutions optimales globales. La première heuristique ayant une probabilité plus élevée d'obtenir la solution optimale, elle a été utilisée dans notre modèle d'optimisation des déchets.

Tableau 4-6 : Comparaison des performances des heuristiques

Heuristique	Solution optimale (%)	Performance (secondes)
Pas d'heuristique	100%	250
Heuristique 1	96%	82
Heuristique 2	92 %	75

## **CHAPITRE 5**

### **Modèle de chargement de la ferraille**

Ce chapitre décrit la modélisation de l'opération de chargement des wagons de ferraille, qui fait partie du système de distribution de la ferraille. Le système de distribution de la ferraille est utilisé pour charger le four électrique à arc, le processus comprend quatre étapes. Ces étapes sont les suivantes

- chargement de wagons avec de la ferraille dans le parc à ferrailles ;
- l'assemblage des wagons nécessaires sur les rails pour être transportés dans l'atelier de ferraille ;
- charger des seaux de ferraille de voitures dans le hall des ferrailles ;
- chargement du four électrique à arc avec de la ferraille dans les godets.

L'opération de chargement des wagons de ferraille constitue la première étape et est décrite dans ce chapitre, tandis que les trois autres étapes sont décrites dans le chapitre suivant.

Le système de wagons assemblés assure la logistique de l'ensemble du système de production. Toute incapacité à utiliser la pleine capacité des wagons transportant la ferraille est une occasion manquée de produire de l'acier liquide dans le four électrique à arc, ce qui peut se traduire directement en termes de coûts. Le transfert de la ferraille entre le chantier naval et le four électrique à arc n'atteint pas actuellement sa capacité de performance en raison d'un certain nombre de facteurs. Cette situation, ainsi que le problème de chargement des godets, a entraîné un retard dans la production et une difficulté à charger le four électrique à arc, qui devrait en

fait être le facteur contraignant ou le goulot d'étranglement du système. Afin d'augmenter le taux de production et d'améliorer l'utilisation du hall des ferrailles, un modèle de chargement des wagons a été mis au point. La logique générale est illustrée à la figure 5-1.

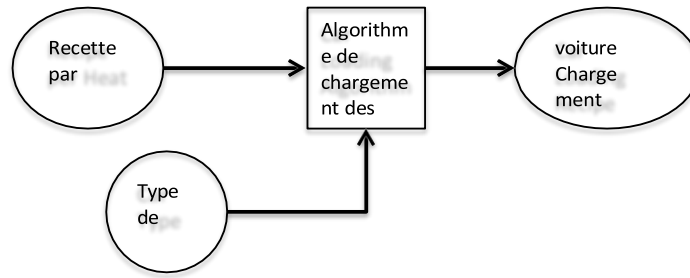


Figure 5-1 : Règle générale pour le modèle de chargement des voitures

La première section de ce chapitre décrit le modèle mathématique du problème. La section 5.2 illustre la structure de l'algorithme d'optimisation. Enfin, la section 5.3 présente une analyse des résultats du modèle.

### 5.1 Représentation mathématique

Cette section représente mathématiquement le modèle d'optimisation, y compris la fonction objective et les contraintes. L'étude de cette section est nécessaire pour représenter le problème de production dans l'approvisionnement en ferraille du four électrique à arc.

#### 5.1.1 Capacité de transport de ferraille Modèle

Tout d'abord, nous devons choisir une fonction objective pour le modèle d'optimisation. Notre fonction objective consiste à maximiser la quantité d'acier produite par cycle de transport. Elle peut être exprimée comme le nombre de "chaleurs" du four électrique à arc et est représentée mathématiquement comme suit

Maximiser

$$H$$

### 5.1.2 Rebut Contraintes

La première contrainte que nous considérons provient des propriétés de la ferraille. La recette contient généralement 6 à 8 types de déchets. Les crânes ne peuvent pas être chargés dans des wagons en raison de leur volume encombrant et sont empilés à côté des voies. Les autres types de ferraille sont chargés dans des wagons dans le parc à ferrailles et transportés dans le hall des ferrailles. Une pile de crâne



Figure 5-2 : Crâne à côté de voitures dans le hall des ferrailleurs.

### 5.1.3 Voiture Dimension

La dimension de la voiture est un autre facteur important à prendre en compte dans le modèle. Les wagons utilisés chez ArcelorMittal sont de deux types et de dimensions différentes (tableau 5-1). Chaque wagon est entièrement chargé de ferraille et le

nombre de wagons pour chaque type de ferraille est le suivant

est déterminée par la recette. Cette contrainte est donnée par

$$H * V_i \leq V_c * C_i$$

où  $i$  indique le rebut utilisé dans la recette ;

$V_i$  est le volume de déchets dans la recette par chaleur ;

$V_c$  est le volume de la voiture.

Tableau 5-1 : Dimensions de la voiture

Type de voiture	Longueur (pieds)	Largeur (pieds)	Hauteur (pieds)	Volume (ft) <sup>3</sup>
J 1	52	7	9	3276
J 2	65	6	9	3510

#### 5.1.4 Scrap Hall Capacité

Bien que la recette de ferraille détermine le nombre de types de ferraille utilisés dans la production, la disposition du hall de ferraille limite le nombre total de wagons, qui est de 12. Pour utiliser pleinement la capacité du hall de ferraille, le nombre de chauffes par wagon doit être maximisé. Par conséquent, ces 12 wagons doivent être entièrement remplis de ferraille, et la ferraille doit permettre d'obtenir les chaleurs requises sans que les opérateurs aient besoin d'aller chercher de la ferraille dans un parc à ferrailles en raison d'un manque de certains types de ferraille. La contrainte de capacité de la halle à ferraille est représentée par la formule suivante

$$\sum C_i = 12$$

où  $C_i$  est le nombre de wagons contenant le déchet  $i$ .



Enfin, le modèle mathématique est résumé comme suit

Maximiser

$$H$$

sous réserve de

$$H * V_i \leq V_c * C_i$$
$$\sum C_i = 12$$

## 5.2 Optimisation Algorithme

Nous développons un algorithme en utilisant le modèle d'optimisation susmentionné pour maximiser le nombre de chauffages en fonction de la capacité de la salle de ferraille.

En tant qu'élément de base du modèle de distribution de la ferraille, une déclaration formelle de l'algorithme de chargement des wagons est présentée. La notation est la suivante.

### **Notation :**

*R* Définir la quantité de ferraille indiquée dans la recette par chaleur ;

*S* Sous-ensemble de *R* comprenant les crânes externes et internes ;

*G* Sous-ensemble de *R* excluant les crânes externes et internes ;

*V* Ensemble du volume de ferraille par chaleur, à l'exclusion des crânes externes et internes ;

$V^H$  Ensemble de volumes de ferraille pour les chauffages multiples ;

$V_i$  Élément *i* dans  $V^H$  ;

$V_c$  Le volume de la voiture sélectionnée ;

$V_m$  Volume de ferraille avec un volume maximal par chaleur ;

*H* Nombre de chaleurs ;

*C* Le nombre de wagons chargés de ferraille ;

$C_i$  Nombre de wagons chargés spécifiquement de ferraille  $i$  ;

$k$  Nombre d'itérations.

*Algorithme*

**Étape 1 :** Lire les données de la recette de rebut et les affecter à  $R$ . Extraire les crânes de  $R$  et les affecter à  $S$ . Les autres crânes de  $R$  sont affectés à  $G$ .

**Étape 2 :** Initialisation. Calculer le volume des déchets dans l'ensemble  $G$  et les affecter à  $V$ . Sélectionnez la valeur maximale dans l'ensemble  $G$  et affectez-la à  $V_m$ . Déterminez la valeur maximale de l'ensemble  $G$ .

valeur initiale de  $H$  :  $H = \frac{V}{V_m} C$ , où  $H$  est un nombre entier et la division est arrondie vers l'infini négatif à l'entier le plus proche.  $C$  est initialisé avec le nombre d'éléments de  $G$ .  $V^H$  est attribué en multipliant  $H$  et  $V$ .

**Étape 3 :** Itération  $k$  :

**Étape 3.k.1 :** Vérifiez si un élément  $V_i$  dans  $V^H$  est plus petit que  $V_c$ . Si  $V_i \leq V_c$ , mettez à jour certaines variables :  $H = H + 1$  et  $V^H = V^H + V$ . Sinon,  $C = C + 1$ ,  $C_i = C_i + 1$  et  $V_i = V_i - V_c$ .

**Étape 3.k.2 :** Vérifier si  $C \leq 12$ . Si  $C \leq 12$ , passer à l'**étape 3.k.1**. Sinon, arrêter l'itération, et  $H = H - 1$  et  $C_i = C_i - 1$ .

**Étape 4 :** Sortie de  $C_i$  et  $H$ . Le nombre total de crânes externes et internes est égal au produit de  $S$  et  $H$ .

### 5.2.1 Initialisation

Dans ce modèle d'optimisation, les données d'entrée sont extraites d'une feuille de calcul contenant les propriétés de la ferraille et la recette de la ferraille. Les considérations suivantes doivent être prises en compte.

(1) Si la recette de rebut comprend un type quelconque de crânes, qu'ils soient internes ou externes, les crânes doivent être affectés à des variables autres que les autres types de rebut. Il s'agit d'une interprétation des contraintes liées à la ferraille dans la section 5.1.2 pour l'algorithme.

(2) La valeur initiale de notre fonction objective "**chaleur**" est déterminée par la ferraille dont le volume est le plus élevé dans la recette de la ferraille ; l'algorithme doit donc être capable de trouver cette ferraille et de calculer la valeur initiale de la chaleur.

$$H = \frac{V_c}{V_m}$$

$H$  doit être un nombre entier. La division doit donc être arrondie vers l'infini négatif à l'entier le plus proche. La raison de ce choix repose sur le fait que la ferraille au volume maximal peut remplir la voiture plus facilement que les autres en augmentant le nombre de chaleur. Par conséquent, la chaleur initiale est obtenue en chargeant complètement une voiture.

(3) La valeur initiale du nombre de voitures est égale au nombre de ferrailles de la recette, à l'exclusion de tout type de crâne. L'idée derrière cette valeur est la suivante que chaque type de ferraille est mis dans une voiture et que le nombre de voitures est donc la somme des ferrailles de la recette, à l'exclusion des crânes.

### **5.2.2 Itérations**

Ces itérations sont basées sur l'augmentation de deux variables : le nombre de manches et le nombre de voitures. Le nombre de chauffes sert de règle de répétition de l'itération, tandis que le nombre de voitures est une règle

d'arrêt, ce qui signifie que l'itération se poursuit jusqu'à ce que 12 voitures soient entièrement chargées de ferraille.

À chaque itération, les contraintes de la section 5.1.3 sont utilisées comme règles pour coordonner l'augmentation du nombre de manches et du nombre de voitures remplies. Par conséquent, ces deux variables sont augmentées l'une par rapport à l'autre. La relation entre elles est illustrée à l'étape 3.

Une alternative à l'étape 3.k.1 consiste à vérifier la valeur maximale du volume de ferraille dans  $V^H$  et à la comparer au volume du wagon. Si cette valeur est inférieure ou égale au volume du wagon, il faut mettre à jour certaines variables :  $H = H + 1$  et  $V = V^H + V$ . Sinon,  $C = C + 1$ ,  $C_i = C_i + 1$  et  $V_i = V_i - V_c$ . Au final, les performances des deux approches sont équivalentes.

### 5.3 Résultat Analyse

Les résultats de la simulation montrent que cet algorithme de chargement des véhicules est efficace et simple à utiliser. Dans la plupart des cas, l'algorithme prend moins de 5 secondes, ce qui répond à nos attentes. À titre d'exemple, le tableau 5-1, appelé "recette de chargement des wagons", est obtenu à partir du modèle de chargement des wagons. À partir de ce tableau, les opérateurs peuvent charger chaque type de ferraille requis dans des wagons dont le nombre est spécifié. Par rapport à la méthode actuellement utilisée par ArcelorMittal, ce modèle permet de prédire la production et d'éviter d'omettre certaines quantités de déchets au cours de l'opération, ce qui résout correctement un problème courant dans la production actuelle.

Le nombre maximum de chaleurs,  $H$ , reflète le degré d'utilisation de la capacité de la halle à ferraille, qui est de 8 dans l'exemple ci-dessus. Dans

l'exemple ci-dessus,  $H$  est de 8. Les résultats sont comparés aux données historiques de production, ce qui montre qu'environ deux tiers des résultats de notre modèle d'optimisation sont supérieurs au nombre de chaleurs produites dans le passé et que les résultats de notre modèle d'optimisation sont inférieurs au nombre de chaleurs produites dans le passé.



Tableau 5-2 : Recette de chargement des voitures

Rebuts	Nombre de voitures ou nombre de crânes (lb)
Fil de pneu	2
Busheling	2
Déchiqeter	2
/ 1	2
/ 2	4
Crânes internes	168,000
Crânes externes	140,000

cinq pour cent sont inférieurs à la production réelle. Par conséquent, le modèle de chargement des wagons est robuste et optimise le processus de production d'acier.

## **CHAPITRE 6**

### **Modèle de chargement des godets**

Ce chapitre se concentre principalement sur le développement du modèle de chargement des godets. Ce modèle est utilisé pour représenter l'opération de chargement de la ferraille dans la halle à ferraille. Tout d'abord, il convient de comprendre la structure de la halle à ferraille et toutes les opérations qui s'y déroulent. La figure 6-1 présente l'agencement de la halle à la ferraille. Comme le montre la figure, l'agencement du hall des ferrailles indique l'emplacement de chaque composant décrit dans les étapes de l'opération de chargement. Chaque parc de voitures entre dans le hall par le côté droit et le quitte par le côté gauche.

La modélisation du système de distribution de la ferraille nous confronte à quelques défis :

- L'emplacement de chaque wagon dans le hall de ferraille n'est pas fixe, car l'opérateur peut déplacer les wagons pendant l'opération de chargement des bennes. Il est difficile de modéliser mathématiquement le temps de chargement des bennes, qui est un élément important de la gestion de la ferraille.
- L'optimisation permet d'atteindre l'objectif visé. L'élaboration de la fonction objective est donc un défi ;
- La ferraille dans la benne doit être disposée en couches, ce qui est déterminé par les caractéristiques de la ferraille et l'opération de chargement du four électrique à arc ;

- La capacité d'une grue magnétique est difficile à modéliser. Chaque type de ferraille a une densité différente et la quantité de ferraille ramassée par la grue à chaque fois est une variable, qui est déterminée par quelques facteurs, tels que les caractéristiques physiques de la ferraille.

les propriétés de la ferraille et les performances de l'aimant pour chaque type d'acier.

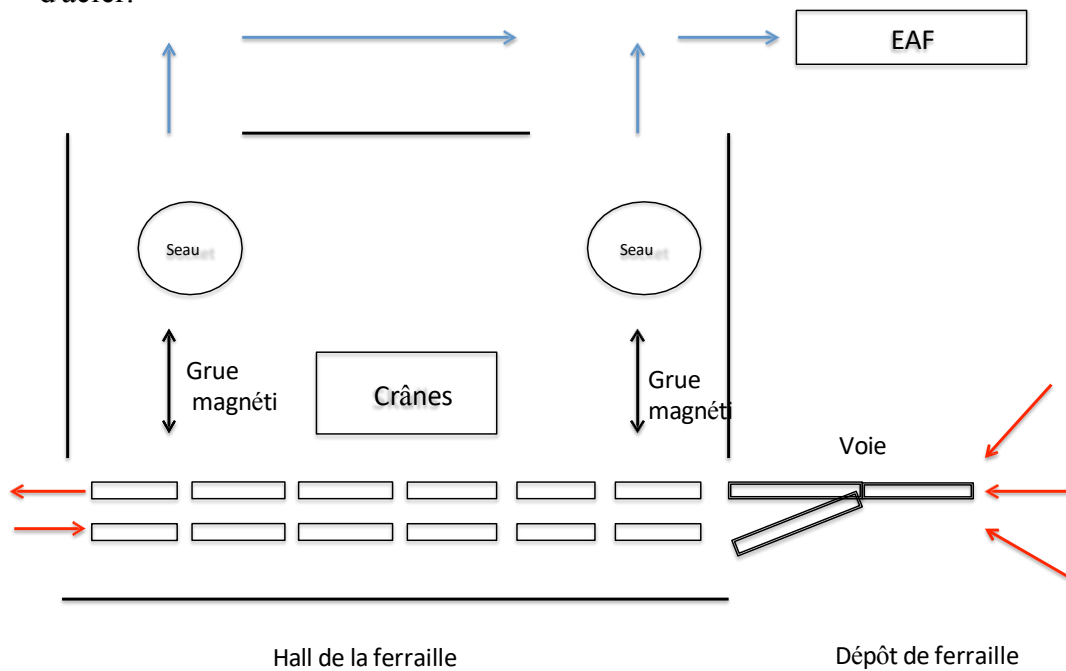


Figure 6-1 : Disposition de la halle à ferraille

Pour bien commencer ce chapitre, rappelons le processus de chargement de l'EAF.

- chargement de wagons avec de la ferraille dans le parc à ferrailles ;
- l'assemblage des wagons nécessaires sur les rails pour être transportés dans l'atelier de ferraille ;
- charger des seaux de ferraille de voitures dans le hall des ferrailles ;
- chargement du four électrique à arc avec la ferraille provenant des godets.

Le système de chargement des godets est fondamental pour l'ensemble du système de production.

Pour augmenter le taux de production et éviter les retards de production, un modèle efficace doit être construit pour estimer les propriétés de production et contrôler la

production.

Le modèle développé dans ce chapitre est basé sur la programmation linéaire et les règles de branchement et de liaison. Le modèle développé dans ce chapitre est basé sur la programmation linéaire et les règles "branch and bound". Avant de modéliser le système de distribution de la ferraille, il convient de générer la recette de la ferraille à partir du modèle présenté au chapitre 4, qui constitue les données d'entrée du système. La figure 6-2 illustre la logique du modèle de distribution de la ferraille. Comme le montre la logique,

- L'algorithme de chargement des wagons maximise le nombre de chaleurs à produire dans chaque rotation de wagon en fixant le nombre de wagons à remplir par chaque type de ferraille dans la recette. Il est illustré dans le chapitre précédent.
- L'algorithme de la couche de godets trouve la manière optimale de remplir chacun des deux godets en fonction de la recette afin de minimiser le temps de chargement du FEA. Cet algorithme est illustré à la sous-section 6.2.
- L'algorithme de disposition des wagons détermine l'alternance optimale de la ferraille vers les wagons afin de minimiser le temps de chargement des deux godets. Cet algorithme, qui fait partie du modèle de chargement des bennes, est décrit en détail à la section 6.3.
- L'algorithme de combinaison est un pont qui relie l'algorithme d'agencement de la voiture et l'algorithme de la couche de godets. Il calcule le temps de chargement total sur la base des solutions de l'algorithme de disposition des voitures et de l'algorithme de la couche de godets. Cet algorithme, ainsi qu'une heuristique permettant d'améliorer le temps d'exécution de l'algorithme, sont présentés à la section 6.4.

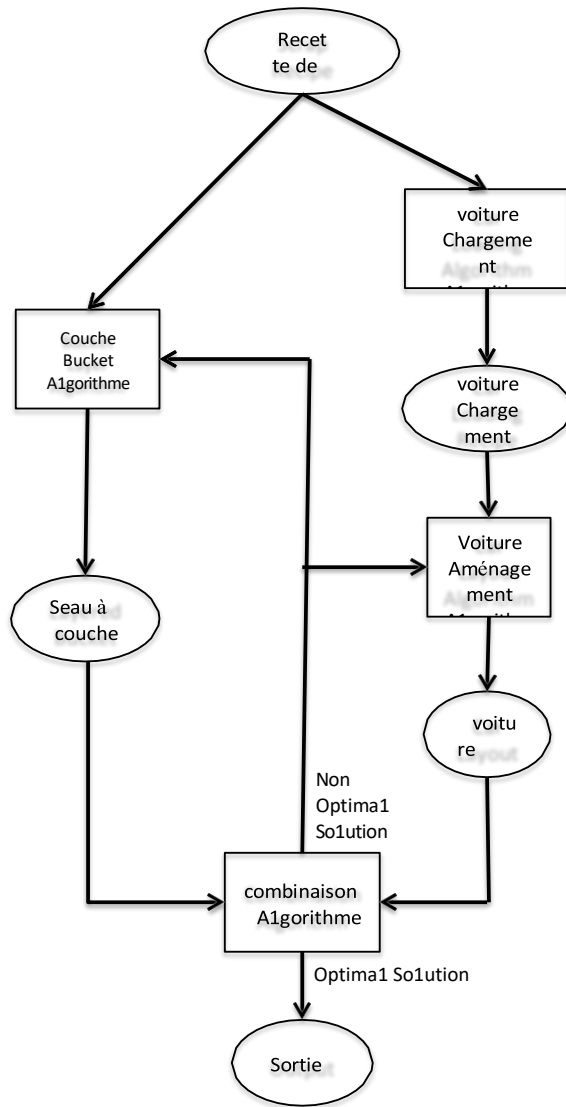


Figure 6-2 : Organigramme de l'optimisation de la couche de godets

## 6.1 Représentation mathématique

Dans cette section, nous présenterons une représentation mathématique du modèle de chargement des godets. L'objectif de ce modèle est de réduire le temps

d'inactivité d'un four électrique à arc.



### 6.1.1 Modèle de temps de chargement de la ferraille

La fonction objective du modèle d'optimisation du chargement de la ferraille est le temps passé à charger les deux godets pour produire une chaleur d'acier. Le modèle temporel est représenté mathématiquement par

$$\text{Minimiser} \quad \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^{13} \lambda_{ij} t_{ij}$$

où :

2 se réfère aux deux seaux nécessaires pour chaque chauffage ; 13 est la somme de 12 voitures et d'une pile de crânes ;

$\lambda_{ij}$  est un paramètre binaire indiquant si nous utilisons la ferraille dans la voiture  $j$ . Si  $\lambda_{ij}$  est égal à 0, la ferraille de la voiture  $j$  n'est pas chargée dans le godet  $i$  ; si  $\lambda_{ij}$  est égal à 1, la ferraille de la voiture  $j$  est chargée dans le godet  $i$  ;

$t_{ij}$  est le temps nécessaire pour transporter la ferraille de la voiture  $j$  à la benne cible  $i$ .

Dans le modèle, le temps est calculé pour charger les deux seaux, ce qui est représenté par la fonction de temps. Lorsque nous chargeons chaque godet, le temps de chargement de chaque couche est accumulé et finalement traité comme la fonction objective. L'introduction de la variable  $\lambda$  modélise l'utilisation de chaque type de ferraille par chaleur. Dans ce projet, le temps de chargement du four électrique à partir des godets n'est pas inclus dans le modèle temporel car nous supposons que le temps de chargement du four électrique à partir des godets ne dépend pas du contenu des godets.

Pour étayer notre hypothèse, nous avons obtenu d'ArcelorMittal certaines

données concernant le temps nécessaire aux opérations de chargement de la ferraille, notamment le temps de chargement des bennes ( $t_1$ ), le temps de chargement d'un four électrique à arc ( $t_2$ ), le temps écoulé entre la première et la deuxième charge ( $t$ ),<sup>3</sup>

et le temps nécessaire à la réalisation d'une chaleur complète ( $t_4$ ). Le tableau 6-1 présente un résumé de ces temps.

Tableau 6-1 : Résumé des différents temps par chaleur

Classe de temps	Durée (minutes)
$t_1$	20-25
$t_2$	2
$t_3$	15
$t_4$	60-80

### 6.1.2 Contraintes

La méthode générale de chargement d'une benne consiste à la remplir de ferraille prélevée sur un wagon à l'aide d'une grue. Les contraintes liées à cette opération sont décrites et modélisées ci-dessous.

#### **Emplacement de la voiture**

L'emplacement des voitures dans le hall des ferrailles est une contrainte dans la catégorie de la source de ferraille pour la benne. Afin de remplir la benne le plus rapidement possible, la ferraille doit être proche de la benne. Néanmoins, les bennes sont situées de part et d'autre de la halle à ferraille. Deux rangées de wagons compensent donc quelque peu cet inconvénient.

#### **Ferraille**

Les propriétés des déchets génèrent des contraintes pour le modèle d'optimisation. Après avoir rempli la benne, les opérateurs chargent le four électrique à arc de son contenu. Certaines contraintes du four à arc décrites au chapitre 4 sont utilisées dans ce modèle.

Certains déchets mous et minces, tels que le broyat, doivent être chargés sur

les couches supérieures et inférieures des deux godets afin d'éviter de briser les électrodes dans le four électrique à arc.

et de protéger le réfractaire du four électrique à arc de la ferraille lors du déversement de la ferraille du godet dans le four électrique à arc. Cette contrainte peut être représentée comme suit

$$m_{shred} \geq 2000$$

Cette contrainte s'applique aux deux seaux.

Les crânes sont difficiles à fondre et doivent donc être placés au début de la fusion. Dans le premier seau, une contrainte doit être incluse

$$m_{skulls} = m_{recipe}$$

où  $m_{recipe}$  est la quantité de crânes utilisés dans la recette, y compris les crânes internes et externes. Les crânes doivent être chargés dans la couche centrale du seau.

### **Capacité de la grue**

La capacité d'une grue pour chaque type de ferraille est un facteur important qui influence le temps nécessaire pour charger les deux godets. La grue utilise un aimant et la quantité de ferraille qu'elle peut transporter dépend du type de ferraille. La capacité d'une grue est déterminée expérimentalement. Le tableau 6-2 donne une estimation de la quantité de ferraille que chaque grue peut contenir lors de chaque chargement. Une grue peut se déplacer horizontalement ou verticalement, d'un point à un autre du hall.

### **Capacité de la benne**

La capacité du godet limite l'opération de chargement, de sorte que le volume et le poids de la ferraille ne doivent pas dépasser la capacité maximale du godet. Le

volume doit avoir une limite supérieure pour éviter les difficultés de chargement du four électrique à arc. Le poids de la ferraille dans chaque benne a une valeur maximale, car il est impossible de déplacer une benne surchargée.

Tableau 6-2 : Poids moyen de la ferraille par chargement

Type de ferraille	Poids moyen(lbs)
101	3573
104	6636
105	2638
108	5948
109	7689
110	2942
111	3781
112	3202
123	4052
201	9037
202	7011
205	2585
208	4579
404	6304
504	7415

seau. Ces deux contraintes sont données par

$$\sum_{i=1}^n \frac{m_i}{d_i} \leq 2500$$

$$\sum_{i=1}^n m_i = 120\,000$$

où

2500 est le volume du seau, l'unité est  $ft^3$  ;

120 000 est la capacité du godet en termes de poids de ferraille

en *livres* ; n est le nombre de ferrailles utilisées dans le godet ;

$m_i$  est le poids de la ferraille  $i$  dans le godet ;

$d_i$  est la densité de la ferraille  $i$  dans le seau.

Une fois de plus, nous résumons le modèle mathématique ci-dessus comme suit

Minimiser

$$\sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^3 \lambda_{ij} t_{ij}$$

Sous  
réserve de

Les contraintes de la première tranche sont les suivantes

$$m_{shred} \geq 2000$$

$$m_{skulls} = m_{recipe}$$

$$\sum_{i=1}^2 \frac{m_i}{d_i} \leq 2500$$

$$\sum_{i=1}^2 m_i = 120\,000$$

Les contraintes de la deuxième tranche sont les suivantes

$$m_{shred} \geq 2000$$

$$\sum_{i=1}^2 m_i = 120\,000$$

## 6.2 Algorithme de superposition de godets

L'objectif du modèle de couche de godet est de générer des solutions réalisables pour remplir le godet à partir de la recette de la ferraille. Il s'agit de l'un des trois algorithmes qui, ensemble, déterminent la manière la plus rapide de



charger le four électrique à arc. À cette fin,

toutes les couches possibles dans le seau doivent être trouvées et utilisées comme candidats à une solution optimale. Le modèle de couche du seau utilise une recette de ferraille comme entrée et génère un ensemble de combinaisons de remplissage du seau (couches de ferraille), chacune d'entre elles étant une solution réalisable et une entrée de l'algorithme de combinaison.

Pour simplifier le modèle, nous appliquons l'algorithme de superposition des seaux uniquement au premier seau et déduisons le remplissage du deuxième seau à partir de ce qui reste pour remplir la recette de rebut.

### **6.2.1 Structure de l'algorithme**

Tout d'abord, nous présentons une déclaration formelle de l'algorithme. L'algorithme étape par étape suivant utilise les règles de branchement et de liaison et l'arbre de recherche pour exécuter le modèle.

#### **Étape 1 : *Initialisation des variables***

Lire les données de la recette de rebut. Affecter la quantité de rebut et le volume de rebut aux sous-ensembles **T** et **V**.

#### **Étape 2 : *Ajouter une nouvelle variable à un nouveau niveau***

L'ajout d'un nouveau niveau à l'arbre de recherche signifie la prise en compte d'un type de ferraille supplémentaire. À chaque niveau, d'autres branches sont créées en ajoutant un multiple de la quantité **M** dans le niveau de ferraille suivant. C'est la règle de branchement de cet algorithme. Cette étape se poursuit jusqu'à ce que le nombre de niveaux **L** atteigne le nombre de types de déchets dans la recette.

#### **Étape 3 : *Tester la faisabilité***

Chaque fois qu'une nouvelle variable est ajoutée. Ensuite, calculez la deuxième

combinaison de couches de godets. Vérifiez les contraintes du modèle mathématique.

a. Si au moins une des contraintes n'est pas satisfaite, ce nœud est écarté et ne sera plus partitionné.

b. Si toutes les contraintes sont remplies, passez à l'étape 2.

**Étape 4 :** Sauvegarder l'ensemble des candidats et revenir au niveau précédent

a. Lorsque L est égal au nombre de types de rebuts et que toutes les contraintes sont satisfaites, la branche entière de l'arbre est ajoutée à l'ensemble de candidats  $F_{layer}$ .

b. Retournez au niveau précédent et explorez la branche adjacente à la branche candidate. Revenez à l'étape 2.

**Étape 5 :** Terminer

L'ensemble des candidats  $F_{layer}$  est obtenu après l'exploration de toutes les branches de l'arbre.  $F_{layer}$  est utilisé comme entrée de l'algorithme de combinaison.

L'arbre de recherche de l'algorithme est illustré à la figure 6-3.

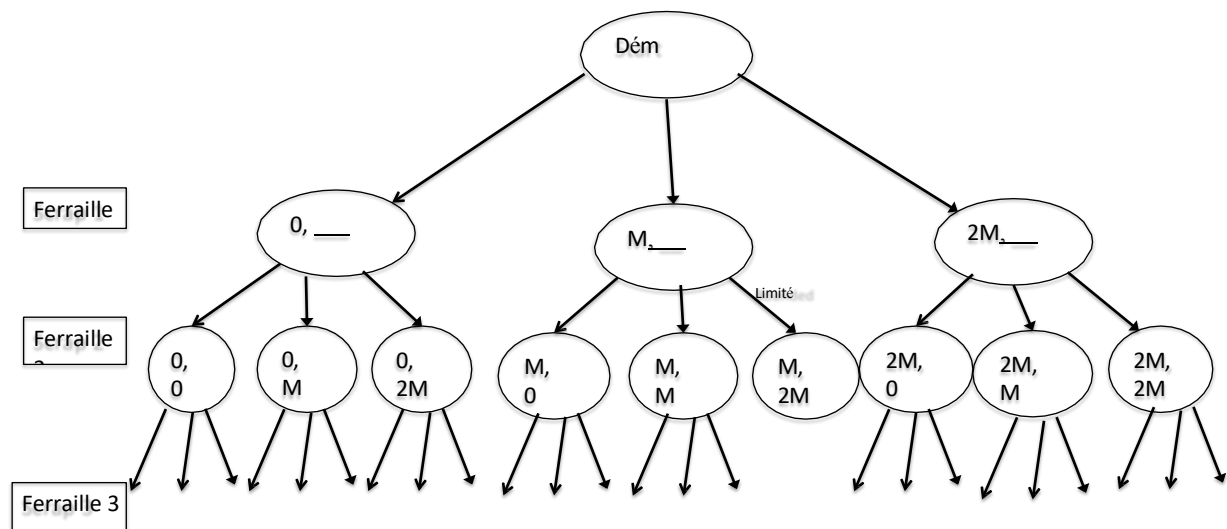


Figure 6-3 : Arbre de recherche de l'algorithme de la couche à godets

Comme nous l'avons mentionné au début de cette section, les règles de branchement et la fonction de bornage sont deux éléments essentiels de cet algorithme d'optimisation combinatoire. Les paragraphes suivants illustrent spécifiquement la façon dont nous les modélisons.

### **6.2.2 Données initiales**

Outre l'application des règles classiques de branchement et de délimitation, ce modèle n'a pas de titulaire. En effet, cet algorithme fonctionne comme une étape intermédiaire pour le modèle d'optimisation globale de la couche de seaux. Le résultat de ce modèle est un ensemble de solutions réalisables au lieu d'une solution optimale. D'autres données telles que le type et la quantité de ferraille sont initialisées à partir de la recette de la ferraille.

### **6.2.3 Règles de branchement**

Il existe deux règles de branchement : le type de rebut dans la recette de rebut et la quantité de rebut qui augmente avec un multiple de l'incrément, qui est représenté par  $M$  comme indiqué dans l'arbre de recherche.

À chaque nœud, lorsqu'un type de rebut supplémentaire est ajouté au seau, le nœud est divisé au niveau suivant, ce qui est une interprétation de l'**étape 2** dans la structure de l'algorithme. Cette règle de branchement est assez similaire à celle du modèle d'optimisation des déchets. Contrairement au modèle d'optimisation des déchets, le nombre de niveaux est limité par le nombre de types de rebuts dans la recette de rebut. Cette propriété réduit l'effort de calcul de notre algorithme.

Autre règle de ramification, chaque incrément de ferraille ajouté à un niveau génère une branche supplémentaire. Cet incrément n'est pas le même que celui du

chapitre 4. La taille de l'incrément influe sur la qualité de la fonction objective.

La faisabilité du modèle dépend de l'incrément. Étant donné que tous les

Les types de ferraille figurant dans la recette doivent être chargés dans la benne. Il convient de choisir un incrément qui garantisse que la quantité totale de ferraille dans chaque godet soit de 120 000 livres et que le minimum de broyat dans chaque godet soit atteint. Au chapitre 7, les critères de sélection d'une valeur pour M et l'impact de M sur le modèle sont détaillés avec quelques cas d'application.

#### **6.2.4 Fonction de délimitation**

Les fonctions de délimitation déterminent directement la vitesse d'exécution de l'algorithme, car la taille de l'arbre de recherche peut être réduite en choisissant des règles de délimitation fortes. À partir des contraintes de la section 6.1, le poids et le volume de la ferraille dans la première benne sont utilisés comme règles de délimitation. Notre étude est basée sur les aspects suivants :

- Le poids et le volume peuvent être facilement modélisés et la sensibilité à une solution stable déterminée. Après avoir utilisé des règles de branchement à chaque nœud, le poids et le volume de chaque variable sont augmentés d'une valeur minimale résultant de la première règle de branchement ou d'un incrément résultant de la deuxième règle de branchement. Toute situation dans laquelle les règles de délimitation sont dépassées peut être détectée et la recherche interrompue. Si nous choisissons d'autres contraintes comme règles de délimitation, telles que shred , elles ne sont appliquées que lorsque la variable est shred.
- Le poids et le volume constituent une bonne combinaison de la fonction de délimitation. La densité est un facteur critique qui détermine l'importance du poids et du volume. Le volume devient important pour les déchets de faible densité, tandis que le poids contribue davantage aux déchets de forte

densité. L'avantage d'utiliser ces deux paramètres est d'augmenter globalement la force des règles de délimitation, quelle que soit la ferraille sélectionnée.



Outre l'initialisation des données, la règle de branchement et de bornage, la stratégie de sélection ne sera pas davantage illustrée car une combinaison de la meilleure stratégie de recherche et de la stratégie de recherche du souffle en premier est employée dans ce modèle, qui est le même que le modèle d'optimisation des rebuts du chapitre 4.

### **6.2.5 Réduire le nombre de solutions possibles**

L'algorithme ci-dessus produit un bon résultat et la performance est acceptable. Notre étude tente d'utiliser d'autres techniques pour améliorer l'algorithme ci-dessus. Sur la base de [15] et [17], une étude des outils de traitement est illustrée. Dans cette section, une fixation des variables est employée pour rendre le modèle plus efficace. Le paragraphe suivant illustre l'application de cette technique dans le modèle.

Après avoir examiné la structure combinatoire, il est possible de réduire la taille du modèle de programmation en nombres entiers en remplaçant certaines variables par des valeurs constantes. Prenons le premier seau : le broyat doit être placé dans les couches supérieure et inférieure avec une valeur minimale de 10000 *livres* ; les crânes ne doivent être placés que dans le premier seau et nous supposons que la couche intermédiaire est réservée à tous les crânes. Cette technique permet de réduire la taille de la solution réalisable générée par l'optimisation des seaux en couches.

Enfin, l'algorithme est très efficace et le temps d'exécution se situe dans une fourchette acceptable. La méthode ci-dessus est exécutée avec un algorithme récursif, ce qui est avantageux lorsque le niveau de l'arbre de recherche n'est pas constant. Néanmoins, une fonction de boucle ne peut pas satisfaire notre

besoin. Dans ce cas, le nombre de niveaux dépend du nombre de types de ferraille dans la recette de ferraille. La condition sous laquelle la procédure récursive s'appelle elle-même est la règle des branches, ce qui signifie qu'il y a deux conditions pour que la procédure récursive s'appelle elle-même.

en s'appelant elle-même. Puisqu'il y a deux bonnes conditions, il n'y a pas de risque d'exécuter une boucle infinie lors de l'exécution d'une procédure récursive. La condition de fin de l'algorithme récursif est la réussite de la recherche d'une solution réalisable, qui est énoncée à l'étape 4.

### **6.3 Algorithme d'agencement des voitures**

Comme le montre la figure 6-1, les bennes situées sur les terminaux du hall des ferrailles sont chargées à l'aide d'une grue en prenant la ferraille des wagons sur les voies. La prise de la ferraille des wagons éloignés d'une benne prend plus de temps. Pour augmenter l'efficacité du chargement des bennes, la disposition des wagons dans le hall de ferraille doit être correctement déterminée. En d'autres termes, la séquence des wagons assemblés sur les voies doit être optimisée. Actuellement, il n'y a pas de considération formelle pour déterminer la disposition des wagons à l'installation de Contre-Cœur, la distribution des wagons dans le hall de ferraille est décidée par l'expérience des opérateurs.

La disposition des wagons dans le hall de ferraille fait partie du système de distribution de la ferraille. Les ingénieurs d'ArcelorMittal doivent décider de la disposition des 12 wagons en fonction de la recette quotidienne de la ferraille et les opérateurs assemblent les wagons sur la voie ferrée en fonction de la disposition des wagons. Une disposition idéale des wagons permet à une grue de prélever la ferraille d'un wagon aussi près que possible de la benne cible afin de gagner du temps lors du chargement.

#### **6.3.1 Structure de l'algorithme**

Dans ce modèle, nous n'avons pas de fonction objective et l'algorithme de disposition des voitures est également une étape préparatoire pour obtenir la

solution optimale globale du modèle d'optimisation de la tarification par godet.  
L'algorithme d'agencement des voitures doit être performant lorsqu'il détermine efficacement un ensemble d'agencements de voitures possibles, ce qui permet d'obtenir une solution optimale globale pour le modèle d'optimisation de la tarification au godet.

contient toutes les ferrailles de la recette et cet ensemble est appelé plan de voiture candidat, qui constitue une autre entrée de l'algorithme de combinaison illustré dans la section suivante. Pour réduire la charge de calcul liée à la détermination de la disposition des voitures dans le hall des rebuts, des règles de branchement et de limitation sont appliquées.

L'algorithme énumératif suivant utilise les règles de branchement et de délimitation et l'arbre de recherche pour résoudre le problème défini ci-dessus.

**Étape 1 :** *Initialisation des variables*

Lire les données de la recette de chargement des wagons. Attribuer les types de ferraille et les nombres de wagons aux sous-ensembles **T** et **N**.

**Étape 2 :** *Ajouter une nouvelle variable à un nouveau niveau*

Ajouter un nouveau niveau au niveau actuel signifie prendre en compte une voiture supplémentaire. Chaque nœud d'un niveau correspond à un type de ferraille. Ce nœud peut être divisé en autant de nœuds que le nombre de types de ferraille **T** en ajoutant une voiture au niveau suivant. Cette étape se termine lorsque le nombre de niveaux **L** atteint 12.

**Étape 3 :** *Tester la faisabilité*

- a. Si le nombre de voitures contenant la ferraille  $T_i$  est égal à  $N_i$ , ce nœud ne peut pas être ramifié davantage avec la ferraille  $T_i$ . Passez ensuite à l'**étape 2** en ajoutant d'autres types de ferraille.
- b. Si le nombre de wagons contenant de la ferraille  $T_i$  est inférieur à  $N_i$ , passez à l'étape suivante.

**Étape 2** avec prise en compte de tous les types de déchets.

**Étape 4 :** *Sauvegarder l'ensemble des candidats et revenir au niveau précédent*

a. Lorsque  $L=12$ , toute la branche de l'arbre est affectée à l'ensemble de candidats  $F_{cars}$  si le sous-ensemble  $N$  est satisfait. Les branches colorées de l'arborescence correspondent à deux éléments de  $F_{cars}$ .

b. Revenez au niveau précédent et explorez la branche adjacente à la branche candidate. Revenir à l'étape 2.

**Étape 5 : Terminer**

L'ensemble des candidats  $F_{cars}$  est obtenu après l'exploration de toutes les branches de l'arbre.

Afin de comprendre les déclarations ci-dessus, un arbre de recherche est introduit. La figure 6-4 présente la structure arborescente de l'algorithme de branchement et de liaison dans l'algorithme d'aménagement de la voiture. Pour plus de détails sur la signification de l'arbre de recherche, voir la section 6.3.2 et 6.3.3.

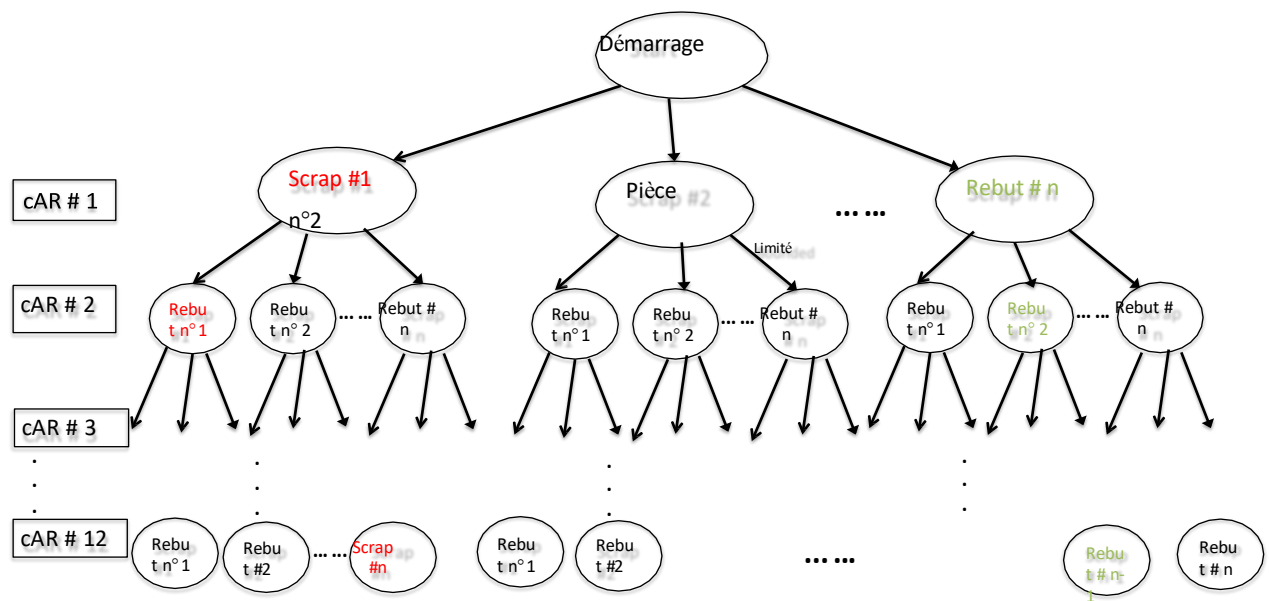


Figure 6-4 : Arbre de recherche de l'algorithme d'aménagement de la voiture

### 6.3.2 Règles de branchement

Comme dans l'algorithme "branch and bound" décrit précédemment, il est important pour l'algorithme actuel de sélectionner des règles de branchement appropriées afin de explorer l'ensemble de l'arbre de solution. Comme pour l'algorithme de la couche à godets, les règles de branchement sont de deux types :

(1) ajouter une voiture supplémentaire. Cette règle de branchement est interprétée par l'**étape 2** de l'algorithme énumératif susmentionné. Dans l'arbre de recherche, chaque niveau de l'arbre représente une voiture. Comme le montre l'arborescence, il y a 12 niveaux parce qu'il y a 12 voitures dans le hall de la ferraille. À chaque niveau, le nombre de nœuds est égal au nombre de types de ferraille. L'arbre de recherche est très grand lorsque, par exemple, 5 espèces de ferraille sont combinées. De tels cas sont typiques.

(2) changer le type de ferraille dans chaque voiture. Chaque nœud est divisé en sous-branches en changeant le type de ferraille dans chaque voiture, comme le montre l'arbre de recherche. Contrairement à l'incrément utilisé dans le modèle d'optimisation de la ferraille et l'algorithme de la couche de godets, cette règle de ramification horizontale ne peut pas influencer la complexité de l'arbre de recherche. Une fois que la recette de la ferraille et la recette de chargement des wagons sont déterminées, leur complexité l'est également.

### 6.3.3 Fonction de délimitation

Comme il n'y a pas de titulaire dans cet algorithme de branchement et de délimitation, il n'y a pas de limite supérieure qui puisse être mise à jour et délimitée à chaque branche pendant l'exploration de la solution. Dans le même temps, le volume de chaque voiture est fixe et dépend de



la dimension de la voiture. Ainsi, aucune contrainte de la section 6.1 ne peut être utilisée pour développer une fonction de délimitation. Par conséquent, l'élaboration d'une fonction de délimitation est un défi.

Après avoir étudié la structure de l'arbre de recherche, une tactique efficace consiste à développer la fonction de délimitation basée sur le nombre de voitures pour chaque type de ferraille dans la recette. Même si la règle générale de la fonction de délimitation est suivie par un tel paramètre, certains défis subsistent, notamment l'approche pour modéliser cette règle et la force de la fonction de délimitation. Certains défis subsistent, notamment l'approche de la modélisation de cette règle et la force de la fonction de délimitation.

Le nombre de wagons pour chaque type de ferraille est enregistré dans la recette de chargement des wagons et dépend du cas de production spécifique. Contrairement aux fonctions limites d'autres modèles d'optimisation, ce paramètre est un ensemble de variables. La première difficulté réside dans le fait qu'un tel ensemble de variables n'est pas fixe et dépend du cas de production. Une autre difficulté réside dans le fait qu'un seul type de variable est vérifié à chaque exploration d'un nœud de l'arbre de recherche.

Un algorithme devrait être développé pour déterminer quelle variable de la fonction de délimitation est qualifiée pour délimiter cette branche. Si l'on considère l'ensemble de l'arbre de recherche, ce type de calcul demande beaucoup d'efforts. Cet algorithme doit donc être efficace.

Pour résoudre ces difficultés, un algorithme énumératif est mis au point, illustré à l'**étape 3**. Ce sous-algorithme est exécuté à chaque nœud de l'arbre de recherche et si la variable dépasse la limite supérieure correspondante, ce nœud est

abandonné. Plus précisément, si le nombre de wagons pour la ferraille actuellement examinée, accumulé au niveau supérieur du nœud recherché, dépasse le nombre de wagons dans la recette de chargement des wagons, l'algorithme s'arrête, sans ajouter de wagons ni modifier le type de ferraille dans le wagon.

Comme le montre l'étude (tableau 6-3), cette règle de délimitation est suffisamment forte. Le test de simulation de la première ligne exécute l'algorithme en appliquant des règles de délimitation et le second exécute l'algorithme sans règles de délimitation. Le temps d'exécution des algorithmes et la taille de la solution réalisable pour la disposition des voitures sont deux indicateurs permettant de tester la force de la règle de délimitation. Les résultats montrent que la règle de délimitation améliore efficacement les performances de l'algorithme et réduit la taille de l'ensemble des configurations de voitures, ce qui prouve que la règle de délimitation est très efficace.

Nous allons maintenant tenter d'expliquer les principes de cette règle de délimitation. En examinant de près l'arbre de recherche, on constate qu'un grand nombre de branches ne sont pas raisonnables et qu'elles sont abandonnées au début de l'exploration, ce qui permet de gagner beaucoup de temps et de ne retenir que les candidats raisonnables dans l'ensemble des tracés de voitures ; la taille de l'arbre est donc considérablement réduite.

Par exemple, dans l'arbre de recherche, toutes les branches à gauche de la branche en rouge sont inexplorées, ce qui illustre graphiquement notre analyse.

Tableau 6-3 : Vérification des règles de délimitation

Test	Temps d'exécution de l'algorithme (s)	Taille de la solution réalisable pour l'agencement des voitures
w	24	$8 \times 10^8$
w/o	325	$1.8 \times 10^{13}$

#### 6.3.4 Règles heuristiques pour réduire le nombre d'agencements possibles de voitures

Comme le montrent les résultats de la simulation, la taille de l'ensemble des

candidats à l'aménagement de la voiture est très importante, par exemple plusieurs milliards. Non seulement il faut du temps pour atteindre l'ensemble complet de candidats à l'aménagement de la voiture, mais il est également difficile d'utiliser l'algorithme de combinaison comme ensemble d'entrée. Outre les règles de branchement et de limitation énoncées ci-dessus, nous introduisons quelques contraintes supplémentaires pour écarter davantage de candidats irréalisables dans l'ensemble  $F_{cars}$ . How

La distance qui sépare les candidats irréalisables écartés de la solution optimale dépend de la force des contraintes.

Dans l'idéal, les couches de godets devraient être construites de manière à ce que la ferraille nécessaire soit proche du godet cible. Il y a deux seaux et chaque type de ferraille peut

se trouver dans plus d'un wagon. Pour qu'une grue puisse accéder aux wagons les plus proches contenant la ferraille nécessaire lors du remplissage des deux godets, les wagons du hall des ferrailles sont divisés en deux groupes : celui de gauche, proche du godet 1, et celui de droite, proche du godet 2, qui contient la ferraille.

2. Idéalement, chaque groupe devrait avoir le même type de ferraille et le même nombre de voitures. Toutefois, cela dépend fortement de la recette de la ferraille. Dans le modèle, le nombre de voitures pour un type de ferraille est divisé par 2 et arrondi à l'entier le plus proche. Le nombre obtenu est le nombre de voitures du premier groupe.

Les autres sont affectés au deuxième groupe. Cette technique permet de réduire efficacement l'ensemble de solutions à quelques millions d'éléments. L'ensemble de candidats affinés pour la disposition des voitures,  $F_{cars}$ , est utilisé comme entrée de l'algorithme de combinaison avec l'ensemble de candidats pour la couche de godets,  $F_{layer}$ .

Le modèle est programmé avec une procédure récursive qui s'appelle elle-même à la condition d'ajouter une voiture ou qu'une ferraille en remplace une autre dans la même voiture. La procédure récursive se termine lorsqu'une solution réalisable respectant toutes les contraintes est trouvée.

#### **6.4 Combinaison Algorithme**

Après avoir obtenu l'ensemble de candidats à la couche de godets  $F_{layer}$  et l'ensemble de candidats à l'aménagement de la voiture  $F_{cars}$ , un algorithme doit être développé pour les utiliser comme entrées afin de déterminer la solution optimale pour le modèle d'optimisation décrit à la section 6.1. Dans ce

nous procédons par essais et erreurs, ce qui signifie que chaque couche de godets dans  $F_{layer}$  et chaque disposition de wagons dans  $F_{cars}$  sont explorées, que le temps de chargement du godet 1 et du godet 2 est calculé et que la combinaison qui donne le temps de chargement le plus rapide est sélectionnée comme solution optimale.

Pour calculer le temps de chargement des deux godets, le temps qu'une grue passe à récupérer la ferraille des voitures est estimé sur la base d'observations. Le temps de prise en charge de la ferraille par la grue est estimé à partir de l'observation.

La ferraille d'une voiture n'est pas non plus fixe. Il varie en fonction de la taille du chargement complet ou partiel. Une durée moyenne est donc prise en compte dans le modèle. Les figures 6-5 et 6-6 indiquent le temps qu'une grue passe à transporter la ferraille des wagons vers la première et la deuxième benne, respectivement.

		Résumé du temps de chargement du					
		1	3	5	7	9	11
Piste n° 1		25	20	30	35	40	50
Piste n° 2		33	27	35	40	47	65
		2	4	6	8	10	12

Figure 6-5 : Résumé des temps de remplissage du premier godet de 12 wagons

		Résumé du temps de chargement du					
		1	3	5	7	9	11
Piste n° 1		57	48	37	32	20	25
Piste n° 2		66	50	40	37	27	33
		2	4	6	8	10	12

Figure 6-6 : Résumé des temps de remplissage du deuxième godet à partir de 12 wagons

### 6.4.1 Algorithme Structure

L'algorithme d'itération est illustré étape par étape comme suit :

**Étape 1 :** *Initialisation des variables*

Le titulaire  $T^*$  se voit attribuer une valeur initiale.

**Étape 2 :** *Sélectionner la stratification des godets*



Un sous-ensemble  $F^i$  est sélectionné parmi  $F_{layer}$ .

**Étape 3 :** Calculer le temps nécessaire pour aller chercher la ferraille dans les wagons

Une couche  $l_i$  est prélevée dans  $l_{couc}$ . Nombre de mouvements nécessaires pour aller chercher sous-ensemble  $F^i$

ferraille de voitures  $n_i = \frac{l_i}{C_i}$ , où  $C_i$  est la capacité moyenne d'une grue transportant de la ferraille  $i$ .

**Étape 4 :** Sélectionner les voitures

Un sous-ensemble  $F^i$  est choisi parmi  $F_{cars}$ . Dans  $F^i$  Parmi les voitures remplies de ferraille  $F^i$

la voiture la plus proche de la benne cible est sélectionnée. Le temps moyen entre ce wagon et le seau est  $t_i$  et le temps total  $T_i = t_i * n_i$ . Le temps  $T$  nécessaire pour charger les deux seaux est la somme de  $T_i$  pour les couches dans les deux seaux.

**Étape 5 :** Tester l'optimalité

Si  $T \leq T^*$ , les sous-ensembles  $F^i$  et  $F_{he}^i$  sont définis comme l'optimum local actuel

solution. Répétez l'**étape 1-5** jusqu'à ce que vous ayez fini d'explorer tous les éléments des ensembles  $F_{cars}$  et  $F_{layer}$ .

**Étape 6 :** Exécuter toutes les autres solutions possibles

La combinaison de couches de seaux suivante est prise en considération. Les **étapes 1 à 5** sont répétées.

**Étape 7 :** Terminer

Les solutions optimales sont des sous-ensembles  $F^i$  et  $F_{he}^i$  avec le  $T^*$  le plus bas parmi les des solutions optimales locales.

La charge de calcul de cet algorithme dépend directement de la taille de  $F_{cars}$

et  $F_{layer}$  . Par conséquent, certaines techniques et heuristiques sont employées pour réduire leur nombre.

qui ont été présentés dans la section précédente. Dans l'algorithme de combinaison, certaines méthodes sont introduites pour augmenter la vitesse.

### 6.4.2 Accélération d'un algorithme avec Heuristique

Étant donné que l'algorithme de combinaison est un pont reliant l'algorithme de la couche de godets et l'algorithme de disposition des voitures, certaines heuristiques peuvent être utilisées dans l'algorithme de combinaison, ce qui les rend plus connectées et plus logiques. La méthode des deux groupes dans l'algorithme d'implantation des voitures est une approche remarquable qui utilise efficacement la solution réalisable de l'implantation des voitures et réduit le temps de calcul. La figure 6-7 illustre l'idée de base de l'heuristique que nous avons utilisée dans le modèle.

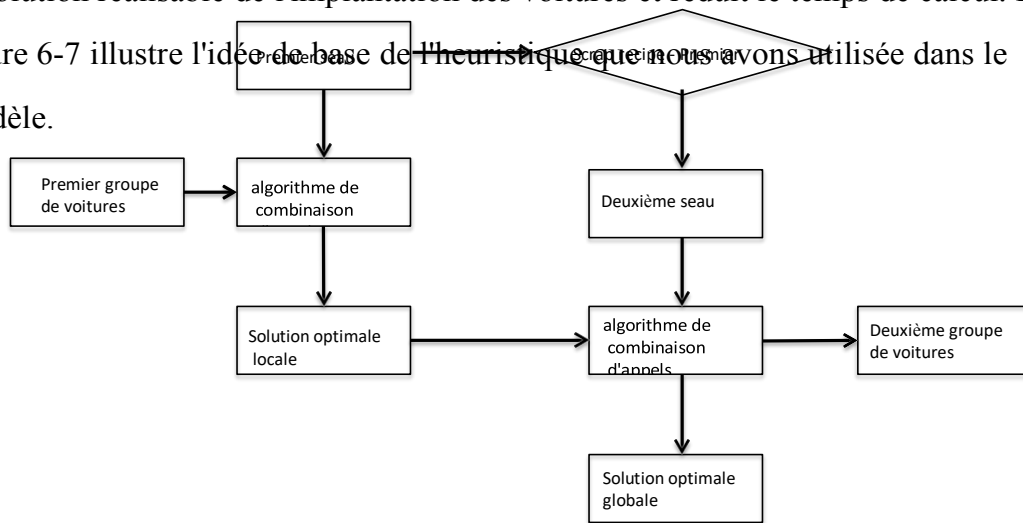


Figure 6-7 : Organigramme de l'heuristique dans le modèle d'optimisation des godets.

Comme le montre l'organigramme, la première benne est initialement chargée en prélevant la ferraille du premier groupe de wagons pour chaque élément de

l'ensemble de bennes en couches et une benne locale pour chaque élément de l'ensemble de bennes en couches.

solution optimale  $F_{voit}^1$  pour le modèle de voiture du premier groupe. Dans cette partie de une recherche, un titulaire est développé, c'est le moment de charger le premier seau. Il s'agit du moment de charger le premier seau.

est utilisé pour vérifier l'optimalité. Pour chaque combinaison de couches de seaux dans l'ensemble des solutions réalisables, les **étapes 1 à 5** sont effectuées couche par couche. Un titulaire, le temps de chargement du seau, est utilisé pour arrêter de compléter toutes les couches lorsque le temps accumulé dans une certaine couche a dépassé le titulaire. Ce type de délimitation précoce permet d'économiser beaucoup de temps de recherche.

Ensuite, nous remplissons l'autre benne et les ferrailles sont prélevées dans le deuxième groupe de wagons, comme le montre la partie droite de l'organigramme. Nous avons ici deux titulaires : le temps de chargement de la deuxième benne et le temps de chargement de deux bennes. La logique de délimitation est la même que pour le premier seau, mais à chaque **étape 5**, les deux titulaires sont vérifiés. L'idée est la suivante : (1) Les **étapes 1 à 5** sont effectuées couche par couche. Le premier titulaire, le moment du chargement du deuxième godet, est utilisé pour arrêter de compléter toutes les couches lorsque le temps accumulé dans une certaine couche a dépassé le premier titulaire. (2) Si cette couche n'est pas éliminée, nous calculons le deuxième titulaire, le temps de chargement des deux seaux et nous vérifions à nouveau si ce titulaire est supérieur au temps cumulé actuel. Si ce n'est pas le cas, on arrête d'explorer les couches mais on continue à côté de la disposition de la voiture dans le deuxième groupe. Cette approche s'est avérée très efficace.

La raison pour laquelle nous n'utilisons pas deux titulaires est que le chargement du premier godet a peu de chance de dépasser le temps de chargement de deux godets. En d'autres termes, nous avons peu de chances d'écarter la solution

réalisable dans le premier groupe. Contrairement au premier seau, le chargement du deuxième seau pourrait facilement dépasser le temps de chargement de deux seaux, bien que le temps de chargement du deuxième seau seulement soit acceptable. Cette idée fait une différence dans la vitesse de l'algorithme.

Il y a un risque de ne pas trouver la solution optimale globale lorsque l'on obtient la solution optimale globale.

solution optimale locale  $F^1_{voit}$  n'est pas bonne. Cela s'explique par le fait qu'un autre potentiel réalisable

est meilleure, d'un point de vue global, que la solution optimale locale actuelle

$F^1_{voitures}$ . Ce risque n'existe que lorsqu'il n'y a qu'un seul wagon de ferraille dans le chargement du wagon.

et est affecté au premier groupe. Cette possibilité peut également être réduite en ajustant correctement le temps de chargement de chaque wagon. Plus précisément, les wagons situés au milieu prennent moins de temps que les autres, de sorte que ces emplacements ont une grande chance de localiser la ferraille dans un wagon de la recette.

Après avoir exploré toutes les solutions possibles dans l'ensemble de godets superposés, la solution optimale est celle dont le temps de chargement des godets est le plus petit. Nous pouvons construire des limites supérieures dynamiques en termes de temps de chargement des godets généraux, du temps de chargement du premier godet et du temps de chargement du deuxième godet. Dans l'arbre de recherche des premier et deuxième godets, certaines branches sont délimitées de manière efficace. La vitesse est donc améliorée.

## 6.5 Résultat Analyse

Pour vérifier les performances du modèle de tarification par godet, un scénario est mis en place. La figure 6-8 montre la recette de chargement de la ferraille et des wagons, qui constitue les données d'entrée de notre modèle. Les résultats de la simulation sont présentés dans les figures 6-9 et 6-10, y compris la disposition optimisée des bennes et des wagons. Les résultats sont bons à plusieurs

égards : (1) toutes les contraintes sont satisfaites ; (2) la disposition des bennes est raisonnable ; (3) la disposition des wagons est proche de la disposition idéale.



code	Type	Recette	# Nombre de voitures
105	Busheling	50,000	3
123	Tournants	50,000	2
209	Crânes externes	40,000	320,000
104	Déchiqueteur	40,000	2
101	#1	30,000	2
205	Boîtes de conserve	30,000	3

Figure 6-8 : Recette de chargement de ferraille et de wagons utilisée pour tester le modèle.

Seau 1			Seau 2		
charge (lb)		120,000	charge (lb)		120,000
Volume (ft) <sup>3</sup>		2,129	Volume (ft) <sup>3</sup>		2,218
Volume maximum (ft) <sup>3</sup>		2,500	Volume maximum (ft) <sup>3</sup>		2,500
Couche #	Ferraille	Quantité (lb)	Couche #	Ferraille	Quantité (lb)
1	/104	10,000	1	/104	10,000
2	123	15,000	2	105	50,000
3	/209	40,000	3	123	35,000
4	101	15,000	4	101	15,000
5	205	30,000	5	/104	10,000

Figure 6-9 : Chargement optimisé des godets par couches.

		Disposition					
		1	3	5	7	9	11
Piste n° 1		205	123	105	205	104	105
		101	104	105	205	101	123
		2	4	6	8	10	12

Figure 6-10 : Disposition des wagons dans le hall des ferrailles.

Pour illustrer l'efficacité de ce type d'heuristique utilisée dans le modèle, le tableau 6-4 présente une étude de la performance du modèle avec l'heuristique en comparant certains indicateurs de performance, tels que le temps d'exécution,

le nombre de l'ensemble des solutions réalisables du seau générées pendant l'exécution, et le nombre de solutions réalisables du seau générées pendant l'exécution, et le nombre de solutions réalisables du seau générées pendant l'exécution.

de solutions d'agencement de voitures générées. Comme le montre le tableau 6-4, le temps d'exécution pour compléter l'arbre de recherche est de 4,43 secondes, ce qui répond aux exigences de l'usine, alors que le modèle sans heuristique est de 36,2 minutes, ce qui n'est pas acceptable. La raison de cette grande différence est le nombre de solutions d'agencement de voitures générées, comme le montre le tableau 6-4.

Tableau 6-4 : Étude des performances du modèle

Indicateur	Modèle avec heuristique	Modèle sans heuristique
Durée de fonctionnement du modèle	4.43(s)	36,2 (min)
Taille de l'ensemble de seaux	29	29
Taille de l'aménagement de la voiture	1260 (1ère) et 120 (2ème)	$1.2 \times 10^{10}$
Possibilité de trouver une solution optimale	60%	100%

Le risque de manquer la solution optimale est également étudié dans cette thèse. L'approche que nous avons utilisée consiste à établir 10 simulations avec différentes recettes d'entrée, puis à comparer les temps d'exécution du modèle ( $t_1$ ) et le temps de chargement des déchets ( $t$ ).<sup>2</sup>

Les résultats sont présentés dans le tableau 6-5. L'application de l'heuristique produit un degré élevé d'écart par rapport à la solution optimale (40 %), mais l'heuristique améliore fortement la vitesse du modèle. La valeur acceptable du temps d'exécution du modèle est de 10 minutes. Comme le montrent les résultats, aucun test du modèle sans heuristique ne satisfait cette valeur. Nous concluons que l'écart est acceptable pour obtenir une vitesse réaliste.

Le modèle de chargement par godet présente certaines limites. La plus

importante est le fait que le temps de chargement du seau de chaque voiture est difficile à calculer.

à estimer. Dans le modèle développé, l'emplacement des voitures est supposé être constant tout au long de la recharge du godet. Cependant, dans la vie réelle, les voitures se déplacent fréquemment le long de l'itinéraire.

Tableau 6-5 : Étude de risque heuristique

Test	Modèle avec heuristique		Modèle sans heuristique	
	$t_1$ (s)	$t_2$ (min)	$t_1$ (min)	$t_2$ (min)
1	4.43	17.8	36.2	16.5
2	15.2	21.2	57.2	20.3
3	25.1	19.2	31.0	19.2
4	68.7	15.6	47.5	15.6
5	11.2	15.4	70.1	15.4
6	3.5	20.1	25.5	19.5
7	70.5	19.8	46.7	18.8
8	33.0	17.5	53.2	17.5
9	42.3	16.4	44.5	16.4
10	9.7	22.1	32.1	22.1

de la piste. Bien que les durées moyennes de chargement soient mesurées de manière empirique, elles varient considérablement dans la production réelle.

## **CHAPITRE 7**

### **Application industrielle**

Le modèle d'optimisation des rebuts et le modèle de distribution des rebuts ont été testés chez ArcelorMittal à l'aide de données de production. Les résultats sont présentés dans ce chapitre.

Par rapport aux autres méthodes utilisées dans la littérature, notre modèle de programmation linéaire présente les avantages suivants :

1). Elle n'a pas besoin d'un grand nombre de données historiques. L'analyse statistique, en tant qu'approche empirique couramment utilisée, joue un rôle très important dans la modélisation de l'optimisation des rebuts, comme dans [10]. Cependant, cette méthode nécessite beaucoup de données historiques et ne peut pas être utilisée dans des cas comme celui d'ArcelorMittal, où il n'y a pas assez de données pour générer un modèle précis.

2). Efficacité en termes de temps. Chaque jour, l'opérateur consacre quelques minutes à l'exécution du modèle afin d'obtenir une recette de ferraille pour l'ensemble de la production de la journée. Si de nouveaux déchets arrivent ou si le prix de certains déchets change, la recette de production peut être mise à jour immédiatement pour réduire les coûts.

Ce chapitre présente d'abord le logiciel, puis l'interface utilisateur graphique, y compris les deux modèles susmentionnés. Ensuite, les modèles sont validés et comparés à la production réelle, qui est présentée à la section 7.2. Enfin, la section

7.3 présente un test des performances du modèle.

## 7.1 Introduction à l'interface graphique de

L'objectif de ce projet était de concevoir un logiciel permettant d'optimiser la production quotidienne d'acier. Ce logiciel devait avoir les caractéristiques suivantes :

- Environnement convivial. Il est nécessaire de disposer d'une interface où les opérateurs ayant peu de connaissances du modèle peuvent mettre à jour les informations sur les propriétés de l'acier et la ferraille disponible, puis exécuter le modèle.
- Capacité à traiter une grande quantité de données. Dans l'environnement de production, une quantité importante de données doit être traitée chaque jour, y compris plus de 30 types de propriétés de la ferraille, les nuances d'acier, la disponibilité des stocks de ferraille, les recettes de ferraille et les paramètres de contrôle de la qualité des produits.
- Vitesse d'exécution élevée. L'optimisation des rebuts est un problème d'optimisation combinatoire dont la structure est très large. Le logiciel doit exécuter le modèle suffisamment rapidement pour que la phase de préparation de la recette de rebut soit courte et ne retarde pas la préparation de la production.

Microsoft Excel offre un outil puissant pour répondre aux exigences susmentionnées. Ce tableur commercial propose des outils de calcul, de représentation graphique et d'analyse.

un langage de macro-programmation appelé Visual Basic for Applications. Les algorithmes d'optimisation peuvent être mis en œuvre à l'aide de l'éditeur Visual Basic, qui comprend une fenêtre pour l'écriture du code, le débogage du code et



l'environnement d'organisation des modules de code. Les codes VBA interagissent avec les données de la feuille de calcul, ce qui permet de mettre à jour le modèle avec les données d'entrée et les contraintes d'optimisation écrites dans les feuilles de calcul. Enfin, les codes peuvent exporter les résultats dans des feuilles de calcul. Il s'agit de

Il est possible d'utiliser l'organisation des modules de code pour représenter individuellement le modèle d'optimisation du coût de la ferraille et le modèle de distribution de la ferraille.

## 7.2 Modèle Validation

Dans cette section, nous comparons nos résultats avec la production réelle d'ArcelorMittal Inc. (Contrecoeur, Québec). Dans la première section, le modèle d'optimisation des rebuts est testé et comparé aux données de production réelles. Dans la section suivante, le modèle de distribution des rebuts est testé en tenant compte de la recette des rebuts générée dans la première section, puis une comparaison avec la production réelle est effectuée.

### 7.2.1 Validation du modèle d'optimisation de la ferraille dans la pratique de la production

Des expériences sur le modèle d'optimisation de la ferraille ont été menées dans l'usine, puis les résultats ont été comparés à la recette de la ferraille utilisée dans la production. La figure 7-1 présente les exigences en matière d'acier liquide. Comme le montre la figure 7-1, l'acier liquide contenant 0,3 % de cuivre est nécessaire à la production, tout comme le poids de la ferraille, la limite de volume et les éléments d'alliage.

<b>Objectif Poids de la ferraille (lb)</b>	240,000
<b>Vol. max.(ft )<sup>3</sup></b>	5,000
<b>Max cu (%)</b>	0.3
<b>Max cr (%)</b>	0.80
<b>Max S (%)</b>	0.25

Figure 7-1 : Résumé des besoins en acier liquide

La figure 7-2 présente la ferraille candidate, ainsi que les propriétés de la ferraille, les informations sur le marché et la disponibilité.

code	Type	Min (p. chaleur)	Max (p. chaleur)	coût	cu(%)	cr(%)	S (%)	Sn (%)	Rendement de fusion (%)	Densité
105	Busheling	0	100,000	359	0.12	0.04	0.01	0.008	0.95	43.3
504	Déchiqueteur	0	70,000	395	0.18	0.1	0.04	0.008	0.925	69.5
101	#1	30,000	100,000	385	0.37	0.15	0.03	0.015	0.88	34.5
123	Tournants	0	30,000	277	0.3	0.1	0.07	0.008	0.85	102.7
108	Crânes internes	0	25,000	14	0.3	0.4	0.03	0.008	0.85	200
110	Fil de pneu	0	15,000	297	0.15	0.04	0.002	0.004	0.9	75
201	Billetes	0	10,000	1	0.3	0.6	0.025	0.008	0.98	250
208	Crânes externes	0	30,000	196	0.05	0.06	0.07	0.006	0.85	200
111	P&S	0	60,000	382	0.15	0.04	0.015	0.008	0.94	42.9
104	Déchiqueteur	0	70,000	570	0.28	0.1	0.04	0.008	0.925	69.5
404	Déchiqueteur	0	60,000	401	0.35	0.1	0.04	0.008	0.925	69.5

Figure 7-2 : Propriétés de la ferraille usagée dans le four à arc électrique

Les figures 7-3 et 7-4 montrent la recette et les propriétés de la ferraille générées par notre modèle et utilisées dans la production réelle. Comme le montre la figure, notre modèle présente de nombreux avantages :

- La recette optimisée fournit plus de paramètres pour contrôler la production et en savoir plus sur le processus. Dans la production réelle, seuls la charge totale, la teneur en cuivre et le coût par tonne sont indiqués pour contrôler le chargement des déchets. Outre les paramètres susmentionnés, le modèle fournit également des informations estimées sur la teneur en cuivre, la teneur en chrome, la teneur en soufre et la teneur en étain, le volume et l'estimation du poids prélevé et du coût par chaleur. Ces paramètres supplémentaires sont utiles pour contrôler le chargement des déchets.
- La recette optimisée réduit le coût de production en termes de coût de la ferraille, qui passe de 342,51 \$ à 330,50 \$ par tonne. C'était notre principal objectif.

code	Type	Recette optimisée	Recette originale
105	Busheling	86,000	40,000
504	Déchiqeter	40,000	59,000
101	#1	30,000	30,000
123	Tournants	30,000	0
108	Crânes internes	24,000	25,000
110	Fil de pneu	14,000	20,000
201	Billettes	10,000	10,000
208	Crânes externes	6,000	5,000
111	P&S	0	40,000
104	Déchiqeter	0	0
404	Déchiqeter	0	0
205	Boîtes de conserve	0	5,000

Figure 7-3 : Recette de rebut dans le modèle d'optimisation et dans la production réelle

Paramètres de sortie	optimisé	origina1
charge (1b)	240,000	234,000
cu (%)	0.21	0.20
cr (%)	0.13	N/A
S (%)	0.03	N/A
Sn (%)	0.01	N/A
Vo1ume (ft ) <sup>3</sup>	4,100	N/A
Poids du robinet (1b)	218,500	N/A
Coût de l'acier1/t	\$ 330.50	\$ 342.51
coût/cha1eur	\$36,107.00	N/A

Figure 7-4 : Propriétés de l'acier liquide et production dans le modèle d'optimisation et dans la production réelle

Le tableau 7-1 présente une comparaison de la réduction des coûts entre le modèle d'optimisation des rebuts et leur production réelle. Les solutions générées par notre modèle promettent des combinaisons de rebuts d'un coût nettement inférieur à celui de la méthode actuelle qu'ils utilisent. Les économies relatives vont de 3,51% à 5,97%. Ce coût est comparé en unité de \$ par tonne. Les

comparaisons des recettes de ferraille avec des teneurs maximales en Cu de 0,35 et 0,8 % sont présentées à l'annexe B.

Tableau 7-1 : Réduction des coûts

Teneur maximale en Cu (%)	Coût initial	Coût optimisé	Réduction des coûts
0.3	342.51	330.50	3.51%
0.35	307.05	293.93	4.27%
0.8	294.80	277.20	5.97%

### 7.2.2 Validation du modèle de distribution de la ferraille par des données de production historiques

Après avoir obtenu la recette de la ferraille, nous avons testé et validé le modèle de distribution de la ferraille avec la recette de la ferraille comme donnée d'entrée. Ce modèle n'est validé que par les données historiques de production et non par la pratique de production réelle en raison de la durée limitée du projet chez ArcelorMittal.

La figure 7-5 montre un exemple de recette de rebut. La figure 7-6 illustre les résultats obtenus avec le modèle développé, comparés à la solution donnée dans la figure 7-7, qui se réfère au chargement des bennes appliqué dans la production réelle. Le schéma de distribution des wagons obtenu à partir du

modèle est illustré à la figure 7-8.

code	Type	Nombre de voitures
123	Tournants	1
104	Déchiqeter	2
205	Boîtes de conserve	4
101	#1	2
105	Busheling	2
108	Crânes internes	192,000
201	Billettes	1

Figure 7-5 : Recette de chargement des wagons

Seau 1		
charge (lb)	120,000	
Volume (ft ) <sup>3</sup>	1,750	
Volume maximum (ft ) <sup>3</sup>	2,500	
Couche #	Ferraille	Quantité (lb)
1	/104	10,000
2	205	5,000
3	/108/208	34,000
4	101	15,000
5	105	26,000
6	201	20,000

Seau 2		
charge (lb)	120,000	
Volume (ft ) <sup>3</sup>	2,446	
Volume maximum (ft ) <sup>3</sup>	2,500	
Couche #	Ferraille	Quantité (lb)
1	/104	10,000
2	123	50,000
3	205	35,000
4	101	15,000
5	/104	10,000

Figure 7-6 : Seau stratifié avec des déchets provenant du modèle

Seau n° 1		
charge (lb)	125,000	
Couche #	Ferraille	Quantité (lb)
1	/104	10,000
2	105	35,000
3	/108/208	35,000
4	205	5,000
5	110	25,000
6	/104	15,000

Seau n°2		
charge (lb)	110,000	
Couche #	Ferraille	Quantité (lb)
1	/104	20,000
2	105	20,000
3	123	15,000
4	101	30,000
5	201	5,000
6	/104	20,000

Figure 7-7 : Seau à couches avec rebut dans une production réelle

		Disposition					
		1	3	5	7	9	11
Piste n° 1		105	123	104	205	205	101
		205	101	201	205	104	105
		2	4	6	8	10	12

Figure 7-8 : Disposition des wagons dans le hall de ferraille.

Chez ArcelorMittal, il existe une estimation approximative du temps de chargement, comme le montre le tableau 6-1. En raison des limites de la



modélisation du temps nécessaire pour transporter la ferraille de

Les résultats de la simulation ne peuvent pas être comparés au temps indiqué dans le tableau 6-1, car il n'y a pas d'informations sur la disposition des wagons dans les données historiques. Nous ne disposons d'aucune information sur la disposition des wagons dans les données historiques. Par conséquent, le résultat que nous avons obtenu correspond étroitement à la disposition idéale. Cependant, une comparaison avec les pratiques de production réelles est nécessaire pour valider expérimentalement notre modèle à l'avenir.

Tableau 7-2 : Temps de chargement des godets

Teneur maximale en Cu (%)	Heure (première)	Temps (seconde)	Temps (les deux)
0.3	20.15	18.57	39.72
0.35	19.48	15.23	34.71
0.8	20.83	15.12	35.95

### 7.3 Performance du modèle Test

La performance du modèle d'optimisation du rebut se réfère (1) à la vitesse d'obtention de la recette nécessaire et (2) à la précision de l'objectif optimal.

la valeur de la fonction est atteinte. Dans la plupart des cas, ces deux indicateurs de performance sont paradoxaux. Bien que l'optimisation de la fonction objective soit notre objectif final, nous devons tenir compte de la facilité d'utilisation du modèle. Il est à noter que ce modèle fournit quelques options en fonction de l'exigence de performance.

Plusieurs facteurs influencent le modèle d'optimisation des rebuts et le modèle de distribution des rebuts. Il est nécessaire d'évaluer la force et l'importance de ces facteurs. Dans cette section, nous étudions le rôle qu'ils jouent

dans le modèle. La première sous-section présente l'analyse des facteurs influençant le modèle d'optimisation de la ferraille et la seconde introduit l'influence de certains facteurs sur le modèle de distribution de la ferraille. le modèle de distribution. À la fin de chaque sous-section, un résumé des critères de décision est donné.

### **7.3.1 Modèle d'optimisation de la ferraille Performance Analyse**

Les facteurs de performance du modèle d'optimisation de la ferraille sont le nombre de types de ferraille dans les données d'entrée, la disponibilité de la ferraille par chaleur et l'augmentation de la fonction de ramification. Afin d'étudier les facteurs qui influencent les performances du modèle, nous avons établi 3 scénarios. Le système utilisé était Mac OS X de la version 10.6.8 dont le processeur était un Intel Core 2 Duo de 2,4 GHz et la mémoire était de 4 GB et 1067 MHz DDR3. Le programme VBA était Microsoft Excel pour Mac 2011 avec la version 14.1.0.

**Scénario 1** Le premier scénario étudie l'impact du nombre de types de ferraille sur les performances du modèle. Les simulations ont été effectuées avec le nombre de types de ferraille allant de 6 à 20 et, pendant ce temps, les autres facteurs ont été fixés comme constants. Le temps nécessaire pour obtenir la recette est comparé dans la figure 7-9 et le coût optimisé de la ferraille est indiqué dans la figure 7-10.

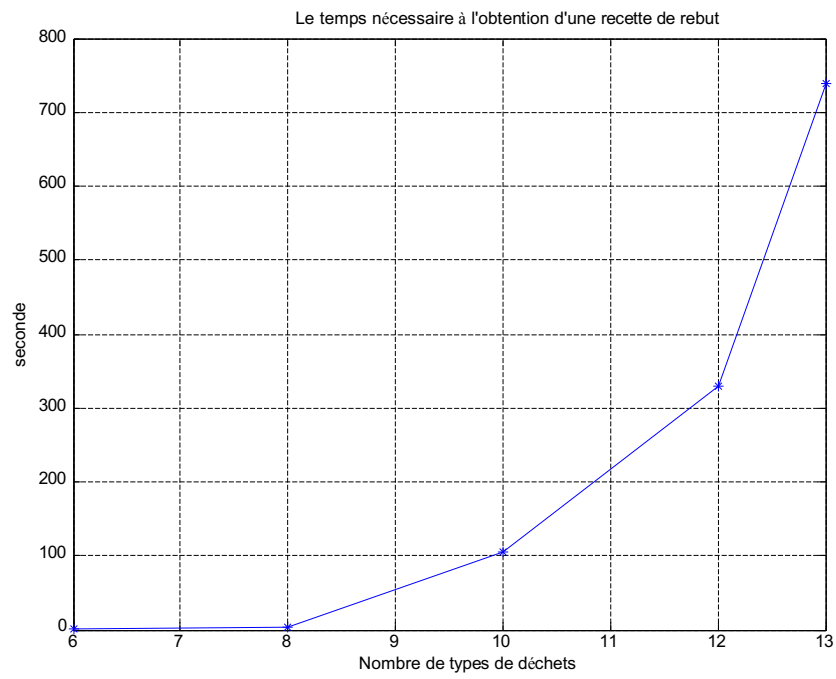


Figure 7-9 : Temps nécessaire pour obtenir la recette lorsque le nombre de types de déchets est compris entre 6 et 13.

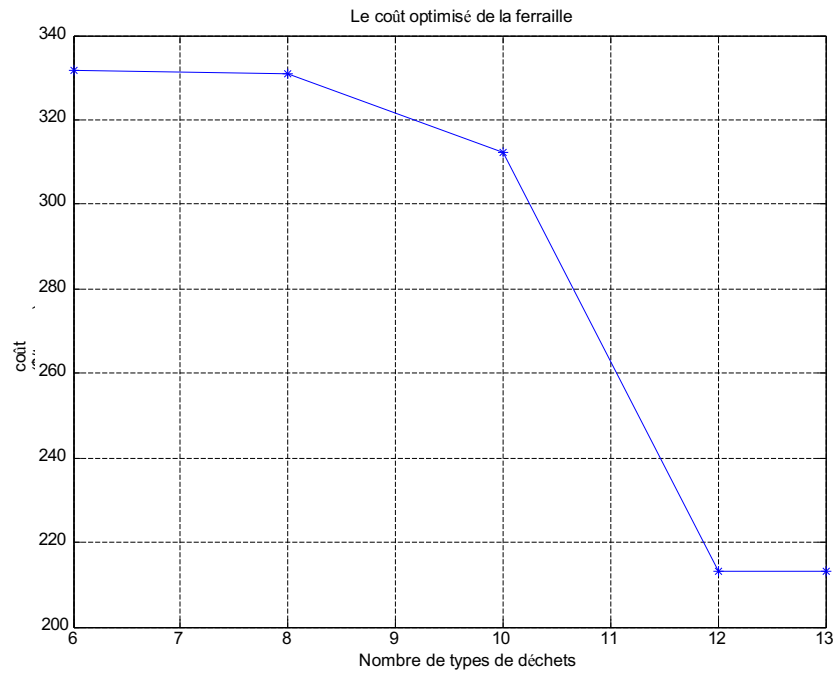


Figure 7-10 : Coût de rebut optimisé lorsque le nombre de types de rebut est compris entre 6 et 13.

Comme le montrent les figures ci-dessus, plus le nombre de types de ferraille utilisés est élevé, plus le modèle a besoin de temps pour obtenir la recette finale. En outre, le coût de la ferraille, qui dépend de l'utilisation ou non de types de ferraille supplémentaires, peut diminuer de manière significative. En fait, lorsque nous simulons le modèle, le temps dépasse une limite acceptable lorsque le nombre de types de ferraille est trop élevé. Le nombre de types de rebuts détermine la taille de l'arbre de recherche combinatoire puisqu'il modifie le nombre de niveaux de l'arbre de recherche.

**Scénario 2** Le deuxième scénario étudie l'impact de la disponibilité de la ferraille par chaleur. Dans la simulation, le nombre de types de ferraille est de 8 et

la quantité maximale de ferraille est de 1 000 tonnes.

la quantité de ferraille passe de 20000 à 120000 livres. Les résultats sont présentés dans la figure 7-11 et la figure 7-12. La quantité maximale de ferraille est limitée dans la pratique.

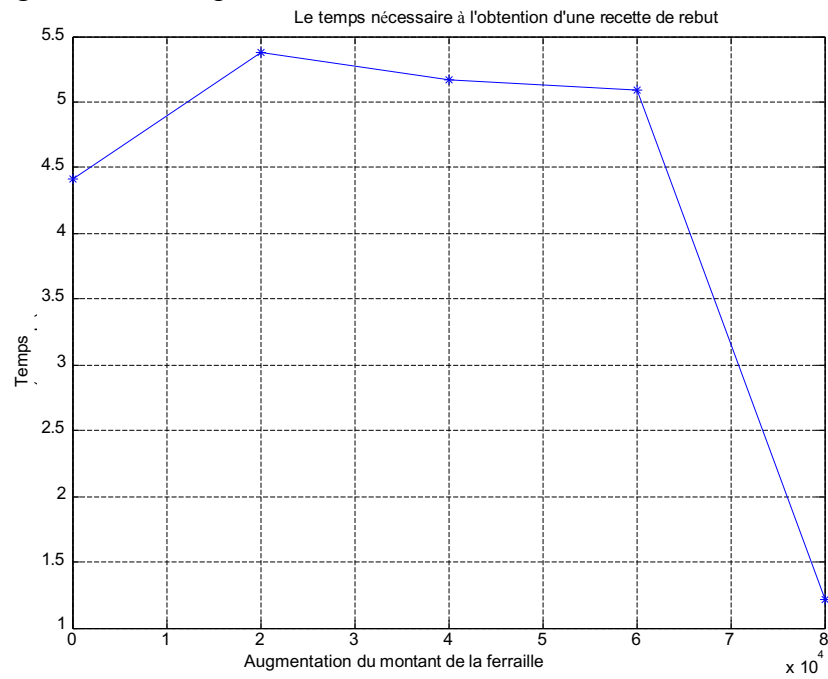


Figure 7-11 : Temps nécessaire pour obtenir la recette en augmentant la quantité de ferraille de 0 à 80000 lbs.



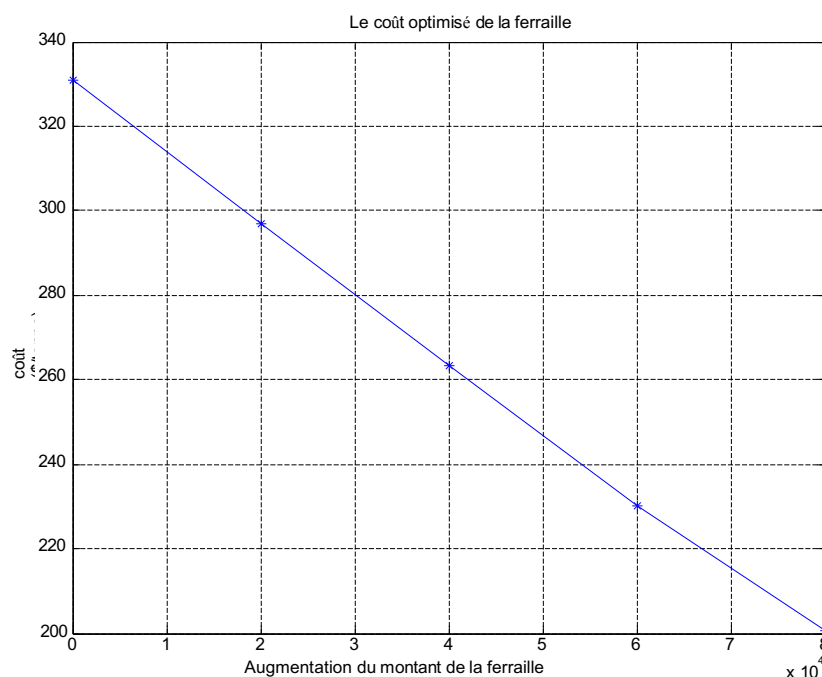


Figure 7-12 : Coût optimisé de la ferraille lorsque la quantité de ferraille augmente de 0 à 80000 livres.

Les résultats montrent que les valeurs maximales pour la ferraille sont susceptibles d'accroître l'efficacité de l'algorithme et de réduire le coût. Intuitivement, l'augmentation des valeurs maximales peut réduire la vitesse d'exécution du modèle car elle augmente le nombre de branches à chaque nœud de l'arbre de recherche. En fait, l'effet est inverse, comme le montrent les résultats. En effet, l'augmentation des valeurs maximales rend le coût faible et la borne supérieure des fonctions de bornage est mise à jour rapidement. Ainsi, un grand nombre de branches sont bornées dès le début et restent inexplorées.

**Scénario 3** Le dernier scénario effectue la simulation pour étudier comment l'incrémentation de la fonction de branchement influence la performance du

modèle. Nous considérons

8 types de déchets et l'incrément est fixé à 2000, 4000, 5000, 8000 et 10000.

Les figures 7-13 et 7-14 montrent les résultats.

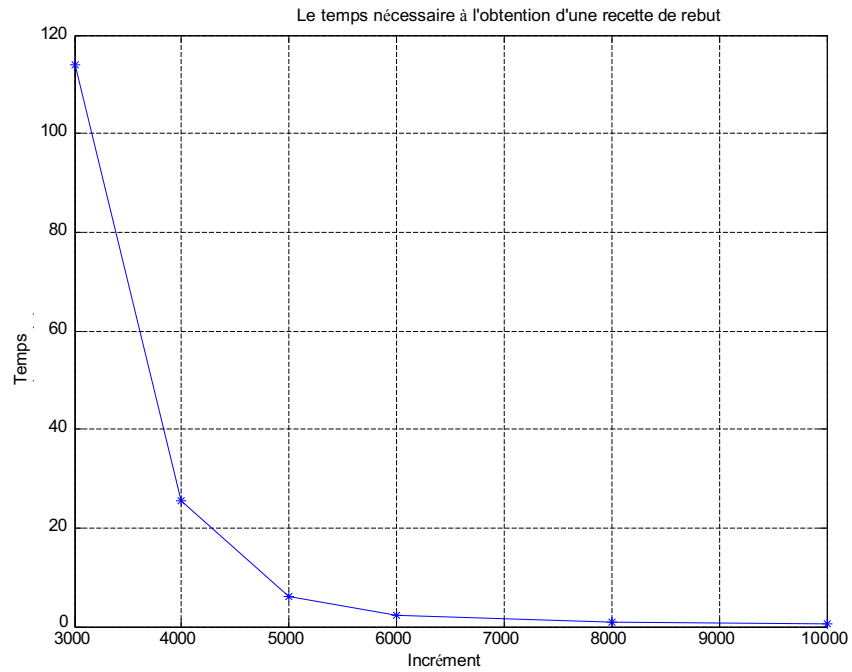


Figure 7-13 : Le temps nécessaire pour obtenir la recette avec l'incrément passant de 2000 à 10000.

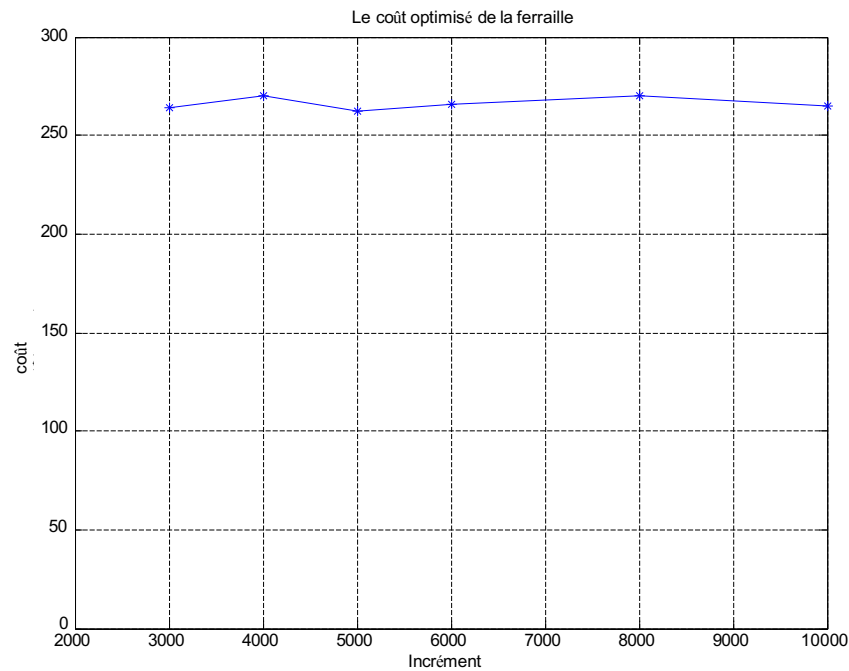


Figure 7-14 : Coût de rebut optimisé avec un incrément passant de 2000 à 10000.

Les graphiques montrent que l'incrément de la fonction de branchement a un impact important sur la vitesse d'exécution du modèle. La vitesse diminue avec la baisse de l'incrément.

### **Critères de choix du modèle**

En fin de compte, lorsque le modèle est utilisé en production, la meilleure stratégie pour réduire les coûts de rebut et raccourcir la préparation des recettes est la suivante

- d'utiliser le moins de types de ferraille possible
- augmenter la valeur maximale de chaque type de ferraille sélectionné dans une fourchette réaliste

- choisir un incrément important avec la garantie que la recette se situe dans une fourchette réaliste

Dans la production réelle, le modèle est choisi en fonction d'un compromis entre les trois règles susmentionnées.

### **7.3.2 Modèle de distribution de la ferraille Performance Analyse**

Contrairement au modèle d'optimisation des rebuts, le modèle de répartition des rebuts considère le temps de chargement comme une fonction objective. Les indicateurs de performance sont donc le temps de chargement et le temps nécessaire pour atteindre une solution optimale. Les facteurs qui influencent les performances du modèle de répartition de la ferraille sont la recette de la ferraille et l'augmentation de la fonction de ramification de l'algorithme d'optimisation de la couche de godets. Afin d'étudier l'impact de ces facteurs sur les performances du modèle, nous avons établi un scénario : prendre une population de 8 qui se réfère à 8 recettes de ferraille différentes où l'incrément est fixé à 2000 (ligne bleue), 4000 (ligne rouge) et 5000 (ligne verte) pour chaque échantillon. Les résultats de la simulation sont présentés dans les figures 7-15 et 7-16.

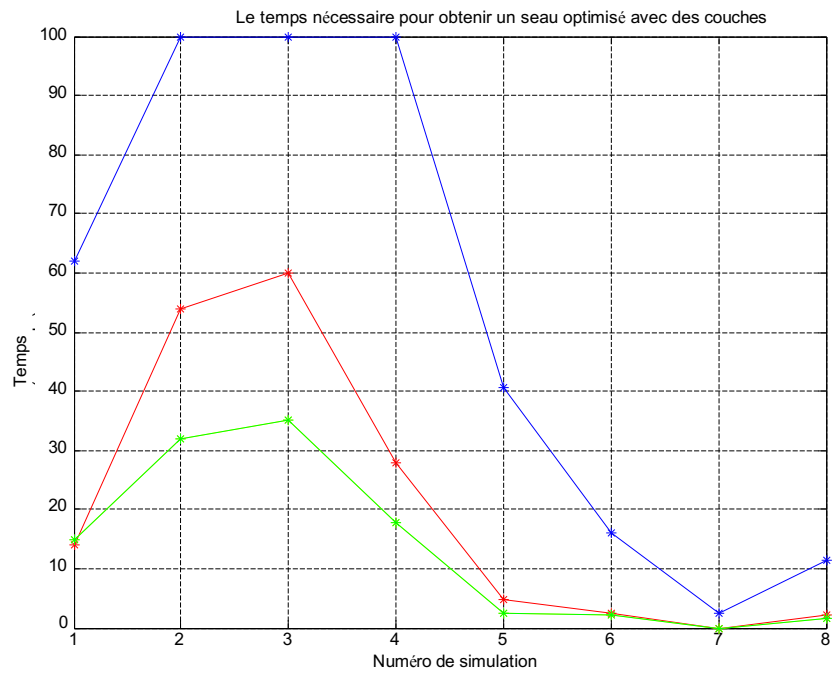


Figure 7-15 : Temps d'exécution de l'algorithme lorsque l'incrément passe de 2000 à 5000.

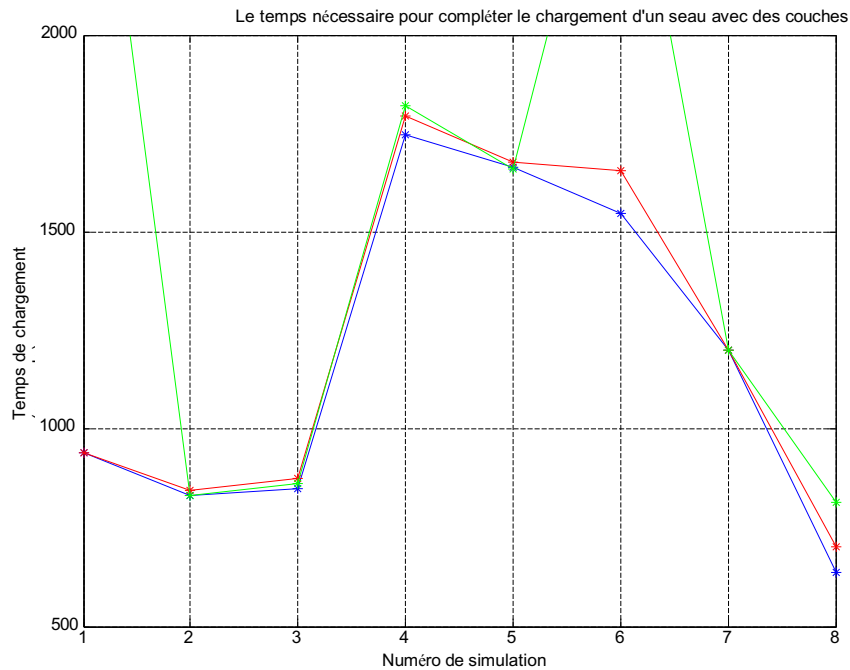


Figure 7-16 : Temps de chargement optimisé avec un incrément passant de 2000 à 5000.

Dans la figure 7-16, les points dont la valeur dépasse 2000 sont éliminés car ils ne sont pas réalistes. Comme le montrent les figures ci-dessus, le modèle a un effet similaire avec un incrément de 2000 et 4000, mais l'algorithme s'exécute plus rapidement avec une valeur de l'incrément de 4000 par rapport à 2000. Les performances de l'incrément de 5000 sont assez instables et prennent plus de temps. Cela s'explique par le fait que le chargement des godets de dépose de ferraille génère plus de mouvements pour une grue lorsque l'incrément est de 5000.

### **Critères de choix du modèle**

En conclusion, le 4000 est une bonne option pour l'augmentation si la

production a une forte exigence en matière de rapidité de préparation de la recette  
; dans les conditions suivantes



un chargement lent des godets peut avoir un impact sur la production normale. Il est préférable de garantir la rapidité du processus de chargement.

## **CHAPITRE 8**

### **Conclusion et travaux futurs**

L'objectif de ce travail était de développer un modèle d'optimisation du coût de la ferraille pour la production d'acier à l'aide d'un four à arc électrique. Dans la simulation, une attention particulière

L'accent a été mis sur deux domaines : l'optimisation de la recette de la ferraille et le chargement de la ferraille pour le four électrique à arc. Comparé aux données historiques d'ArcelorMittal, le modèle s'est avéré offrir une bonne réduction des coûts de production et du temps de chargement de la ferraille. Dans les sections ci-dessous, des remarques finales sont formulées pour chacun des principaux domaines de ce travail.

#### **8.1 Optimisation de la ferraille Modèle**

Au chapitre 4, le modèle mathématique d'optimisation du coût des rebuts a été présenté, suivi de l'application des règles de branchement et de limitation et de l'heuristique utilisées dans ce modèle. Le test industriel du modèle a été présenté au chapitre 7. Comme le montrent les résultats de la simulation, les résultats du modèle correspondent bien à la situation de production réelle. Mieux encore, le coût total de la recette de rebut optimisée était inférieur à celui de la recette actuellement utilisée.

Comme nous considérons le volume comme une contrainte, certains problèmes de production sont résolus par le modèle. Par exemple, certaines recettes de

ferraille peuvent entraîner des difficultés de chargement du four, mais le modèle parvient à estimer le volume de ferraille dans la production. Ainsi, les recettes de ferraille candidates avec des volumes importants et des coûts faibles sont

n'est pas considérée comme la solution finale ; il n'y a donc pas de difficulté à charger le four.

Grâce aux règles de branchement et de liaison, le modèle a une bonne performance en termes de vitesse pour obtenir la recette finale. Cela a permis au modèle de devenir un outil utile pour les ingénieurs d'ArcelorMittal à la fin du projet. Le modèle peut mettre à jour la recette en fonction des changements de prix sur le marché de la ferraille. La validation réussie a prouvé que toutes les hypothèses que nous avons faites dans le modèle étaient raisonnables.

## **8.2 Distribution de la ferraille Modèle**

Dans la production d'acier, le temps de chargement est un problème que les ingénieurs rencontrent souvent. Tout retard de production peut entraîner une augmentation des coûts. Un mauvais système de répartition de la ferraille peut retarder la production en raison d'un manque de ferraille dans l'atelier de ferraille et de la nécessité d'aller chercher de la ferraille dans le parc à ferraille. Le développement d'un modèle de distribution de la ferraille permet donc d'estimer la quantité de ferraille nécessaire dans le cadre d'une production multi-chaleur.

Dans le cadre du modèle de production, le modèle de distribution des rebuts peut aider à charger les rebuts plus rapidement et plus efficacement. Les chapitres 5 et 6 ont illustré la structure du modèle et l'approche des règles et heuristiques "branch and bound". La manière de déterminer la disposition des wagons dans le hall de ferraille est assez scientifique et puissante au lieu d'utiliser uniquement l'expérience des opérateurs et des ingénieurs. Il s'agit d'une contribution significative à l'efficacité de la production.

Pour des raisons de temps, ce modèle n'a été validé que par des données de

production historiques. Nous ne pouvons donc pas faire de commentaires sur l'amélioration du chargement du four électrique à arc dans la pratique de la production réelle. Comme le montre l'essai industriel du chapitre 7, la disposition des wagons est proche du cas idéal et la superposition des godets permet d'éviter le problème de l'usure des wagons.

chargement du four électrique à arc. Le volume total de ferraille dans la benne est inférieur à la capacité du four.

Le modèle a une bonne vitesse de fonctionnement pour calculer la solution optimale sur un ordinateur de bureau normal, ce qui est avantageux pour une utilisation industrielle.

### **8.3 Futurs travaux**

Les suggestions suivantes concernent le modèle :

- Des techniques d'intelligence artificielle peuvent être appliquées au modèle pour en améliorer les performances.
- Dans le modèle d'optimisation du coût de la ferraille, d'autres facteurs de coût (coût d'exploitation, rendement) pourraient être pris en compte à l'avenir. Un modèle de laitier et un modèle de coulée ont également été développés par mon collègue dans le cadre de ce projet. Ils peuvent être combinés avec le modèle de tarification de la ferraille.
- Élaborer un modèle hebdomadaire, mensuel ou même à plus long terme, au lieu d'un modèle quotidien.
- Afin de réagir à davantage d'informations sur le marché, les travaux futurs devraient se concentrer sur l'incorporation de certains facteurs du commerce international en raison du niveau élevé de mondialisation de la production d'acier.
- En Amérique du Nord, ArcelorMittal possède d'autres installations utilisant un four à arc électrique. Le modèle peut être étendu pour connecter toutes les installations concernées.
- Le modèle de distribution des déchets pourrait être testé en production réelle,

ce qui permettrait de l'améliorer.

- Le modèle de distribution de la ferraille pourrait intégrer des voitures supplémentaires dans le hall de la ferraille et prendre en compte davantage de manches lors de la détermination de la disposition des voitures.

## Références

- [1] <http://canadasteel.ca>.
- [2] <http://www.msa.com/metal/systour/systour.html>.
- [3] <http://www.worldsteel.org>.
- [4] Image de l'eaf sur <http://www.steeluniversity.org>.
- [5] Cook W. J. ; Cunningham W. H. ; Pulleyblank W. R. ; Schrijver A. Combinatorial optimization. *Wiley*, 1998.
- [6] Wilson E. ; Kan M. ; Mirle A. Technologies intelligentes pour l'optimisation des fours à arc électrique. *Document technique de l'ISS*, 21:16, 2005.
- [7] Gouweloos D.. Conception d'une procédure opérationnelle standard pour le chargement des godets dans les camps de refonte des galeries. *Un projet à l'Université de Pretoria*, 2011.
- [8] Bernatzki K. P. ; Bussieck M. R. ; Lindner T. ; Lubbecke M. E. Optimal scrap combination for steel production. *OR Spektrum*, 20:251-258, 1998.
- [9] MacRosty R. D. M. ; Swartz C. L. E. Dynamic modeling of an industrial electric arc furnace. *American Chemical Society*, 44:8067-8083, 2005.
- [10] Sandberg E. Energy and scrap optimization of electric arc furnaces by statistical analysis of process data. *Thèse à l'Université de technologie de Lulea*, 21:1402-1757, 2005.
- [11] Clausen J. Branch and bound algorithms - principles and examples. *Université de Copenhague*, 1999.
- [12] Liu X. B. ; Pan R. L. ; Meng Q. N. ; Cui F. J. Study on recipe cost optimization system based on ant colony algorithms. *International Seminar on Business and Information Management*, 78:287-290, 2005.
- [13] Nocedal J. ; Wright S. J. Numerical optimization. *Springer*, 1999.



- [14] Snell J. J. Improved modeling and optimal control of an electric arc furnace. *Thèse de maîtrise*, Université de l'Iowa, 2010.
- [15] Hoffman K.. Optimisation combinatoire : Current success and directions for the future. *École de technologie et d'ingénierie de l'information, Université George Mason*, 2010.
- [16] Hoffman KL ; Padberg M. Lp-based combinatorial problem solving. *Annals of Operations Research*, 4:145-194, 1991.
- [17] Savelsbergh MWP. Techniques de prétraitement et de sondage pour les problèmes de programmation mixte en nombres entiers. *ORSA J Comput*, 6(4):445-454, 1994.
- [18] Algadrie ; Palyama. Réduction des coûts dans l'exploitation de l'AEP Contrôleur à réseau neuronal. *SEIASI Quarterly*, 27:55-60, 1998.
- [19] Rong A. ; Lahdelma R. Fuzzy chance constrained linear programming model for optimizing the scrap charge in steel production. *European Journal of Operational Research*, 186:953-964, 2008.
- [20] Garvin W. W. Introduction to linear programming. *McGraw-Hill*, 1960.

## Annexe A

### Propriétés de la ferraille d'acier

code	Type	coût (\$/t)	cu(%)	cr(%)	S (%)	Sn (%)	Rendement (%)	Densité (lb/ft <sup>3</sup> )
101	#1	385	0.37	0.15	0.03	0.015	0.88	34.5
112	#2	250	0.5	0.12	0.04	0.012	0.88	20.4
326	#2	250	0.5	0.12	0.04	0.012	0.88	20.4
201	Billetes	1	0.3	0.6	0.025	0.008	0.98	250
408	Boulettes (DRI)	450	0	0	0.005	0	0.8	100
160	Briquelette	308	0	0	0.02	0	0.8	100
105	Busheling	359	0.12	0.04	0.01	0.008	0.95	43.3
126	Busheling	359	0.12	0.04	0.01	0.008	0.95	43.3
305	Busheling	359	0.12	0.04	0.015	0.008	0.95	43.3
209	Crânes externes	196	0.02	0.09	0.08	0.006	0.85	200
109	Crânes externes	196	0.02	0.1	0.5	0.02	0.85	200
208	Crânes externes	196	0.05	0.06	0.07	0.006	0.85	200
211	Crânes externes	196	0.21	0.11	0.002	0.015	0.85	200
308	Crânes externes	336	0.03	0.18	0.5	0.008	0.74	150
508	Crânes externes	196	0.05	0.06	0.07	0.006	0.85	200
609	Crânes externes	160	0.04	0.04	0.09	0.004	0.85	200
709	Crânes externes	150	0.12	0.95	0.006	0.006	0.85	200
509	Fonte	336	0.04	0.04	0.02	0.008	0.74	150
108	Crânes internes	14	0.3	0.4	0.03	0.008	0.85	200
111	P&S	382	0.15	0.04	0.015	0.008	0.94	42.9
104	Déchiqueter	431	0.3	0.1	0.04	0.008	0.925	69.5
204	Déchiqueter	401	0.2	0.07	0.02	0.013	0.925	69.5
304	Déchiqueter	390	0.4	0.1	0.02	0.2	0.925	69.5
404	Déchiqueter	401	0.35	0.1	0.04	0.008	0.925	69.5
205	Boîtes de conserve	323	0.04	0.04	0.01	0.3	0.85	28.3
110	Fil de pneu	297	0.15	0.04	0.002	0.004	0.9	75
117	Fil de pneu	250	0.2	0.1	0.025	0.008	0.9	75
123	Tournants	277	0.3	0.1	0.07	0.008	0.85	102.7

## Annexe B

Recette de la ferraille pour l'acier avec une teneur maximale en Cu de 0,35

code	Type	Recette optimisée	Recette originale
404	Déchiqeter	40,000	60,000
111	P&S	36,000	40,000
101	#1	30,000	30,000
112	#2	30,000	20,000
108	Crânes internes	30,000	30,000
123	Tournants	30,000	15,000
201	Billetes	24,000	23,000
110	Fil de pneu	20,000	20,000
109	Crânes externes	0	0
104	Déchiqeter	0	0

Recette de la ferraille pour l'acier avec une teneur maximale en Cu de 0,8

code	Type	Recette optimisée	Recette originale
112	#2	40,000	22,000
201	Billetes	40,000	40,000
404	Déchiqeter	40,000	70,000
105	Busheling	32,000	20,000
101	#1	30,000	30,000
123	Tournants	30,000	20,000
108	Crânes internes	20,000	20,000
205	Boîtes de conserve	8,000	15,000
109	Crânes externes	0	0
111	P&S	0	0
104	Déchiqeter	0	0