



GESTION OPTIMALE DU FLUX DE MÉTAL DANS UNE USINE D'ALUMINIUM

PAR PHILIPPE LAVOIE

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI EN VUE
DE L'OBTENTION DU GRADE DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES (M. SC.) EN
INFORMATIQUE**

QUÉBEC, CANADA

© PHILIPPE LAVOIE, 2025

RÉSUMÉ

La production d'aluminium joue un rôle important dans l'économie du Canada. En 2022, le Canada a produit environ 3 millions de tonnes d'aluminium selon les données du Gouvernement du Canada (2023). Cette performance place le pays au quatrième rang mondial pour la production de ce matériau. Produit principalement à partir d'hydroélectricité, l'aluminium canadien a la plus petite empreinte carbone parmi les plus grands producteurs à travers le monde. Une usine de fabrication d'aluminium contient plusieurs secteurs, tels que l'électrolyse, la coulée et le carbone. Le département de l'électrolyse se charge de prendre en entrée l'alumine et de la convertir en aluminium grâce au procédé d'électrolyse de l'alumine. Le département de coulée est quant à lui responsable de prendre en entrée l'aluminium liquide et de produire différents types de produit d'aluminium. Enfin, le secteur du carbone se charge de la production d'anode nécessaire au procédé d'électrolyse.

Ce mémoire s'intéresse aux opérations qui lient le centre d'électrolyse et de coulée. À l'électrolyse, l'aluminium est produit à l'intérieur des cuves. L'aluminium est éventuellement siphonné dans des creusets pour ensuite être vidé au centre de coulée. Le centre de coulée contient plusieurs machines pour la production de différents produits d'aluminium. Chaque machine est associée à deux fours qui sont remplis en alternance. Ces fours permettent d'augmenter la température de l'aluminium liquide afin de pouvoir couler l'aluminium dans des moules spécifiques. Le centre de coulée contient également un carrousel qui permet de couler des lingots d'aluminium sous forme conventionnelle. Ces lingots peuvent être vendus sur le London Metal Exchange (LME) et leur prix est proportionnel à leur pureté. Le problème à résoudre consiste à trouver une assignation avantageuse pour chaque creuset de métal qui sort de l'électrolyse à un four du centre de coulée, à une demande de transport ou au carrousel. Une modélisation mathématique du problème, prenant en compte presque toutes les contraintes opérationnelles, est réalisée. Les temps de chargement, la quantité de métal et les concentrations chimiques sont des exemples de contraintes du modèle d'optimisation. Une fonction multiobjectif qui maximise principalement la qualité de l'aluminium versé au carrousel est construite. Le modèle d'optimisation linéaire en nombres entiers est résolu à l'aide du solveur d'optimisation Gurobi, qui exploite un algorithme de séparation et évaluation progressive, accompagné de plusieurs heuristiques avancées.

Les résultats obtenus par le modèle d'optimisation sont concluants. Le modèle d'optimisation est capable d'assigner les tournées de siphonnage aux demandes de fours et transports tout en respectant les périodes de chargement, la quantité et les concentrations chimiques. De plus, les tournées de siphonnage de métal sont assignées au bon moment tout en maximisant la qualité du métal. En tout, sept instances sont étudiées en détail et chacune des solutions est présentée avec des graphiques, tableaux et diagramme de Gantt pour illustrer les différentes assignations.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ	ii
LISTE DES TABLEAUX	vi
LISTE DES FIGURES	xii
DÉDICACE	xv
REMERCIEMENTS	xvi
CHAPITRE I – INTRODUCTION	1
1.1 PROBLÉMATIQUE	1
1.2 OBJECTIFS DU PROJET	3
1.3 STRUCTURE DU MÉMOIRE	5
CHAPITRE II – REVUE DE LITTÉRATURE	7
2.1 PROCÉDÉS FONDAMENTAUX D'UNE ALUMINERIE	7
2.1.1 ÉLECTROLYSE	7
2.1.2 COULÉE	8
2.1.3 FLUX DE MÉTAL	11
2.2 DESCRIPTION DU PROBLÈME	12
2.3 TRAVAUX ANTÉRIEURS	17
2.4 PROCÉDURE PAR ÉVALUATION ET SÉPARATION PROGRESSIVE	21
CHAPITRE III – MODÈLE D'OPTIMISATION DÉTERMINISTE	27
3.1 MODÈLE D'OPTIMISATION	27
3.1.1 ENSEMBLES	27
3.1.2 PARAMÈTRES	28
3.1.3 VARIABLES	31
3.1.4 CONTRAINTES	37
3.1.5 FONCTION MULTIOBJECTIF	47
3.2 NON-RÉALISABILITÉ DES INSTANCES	50
3.2.1 VALIDER LES CONTRAINTES DE TEMPS POUR LES DEMANDES DE FOUR ET DE TRANSPORT	51

CHAPITRE IV – MÉTHODOLOGIE	54
4.1 COLLECTE DES DONNÉES	54
4.2 SYSTÈME TEMPS RÉEL	54
4.2.1 CALCUL DES CHIMIES RÉSULTANTES	55
4.2.2 CALCUL DU PARAMÈTRE Γ	57
CHAPITRE V – RÉSULTATS	58
5.1 PREMIÈRE INSTANCE	60
5.1.1 DONNÉES DU PROBLÈME	60
5.1.2 RÉSULTATS DE L'OPTIMISATION	61
5.2 DEUXIÈME INSTANCE	64
5.2.1 DONNÉES DU PROBLÈME	64
5.2.2 RÉSULTATS DE L'OPTIMISATION	65
5.3 TROISIÈME INSTANCE	68
5.3.1 DONNÉES DU PROBLÈME	68
5.3.2 RÉSULTATS DE L'OPTIMISATION	68
5.4 QUATRIÈME INSTANCE	71
5.4.1 DONNÉES DU PROBLÈME	71
5.4.2 RÉSULTATS DE L'OPTIMISATION	72
5.5 CINQUIÈME INSTANCE	74
5.5.1 DONNÉES DU PROBLÈME	74
5.5.2 RÉSULTATS DE L'OPTIMISATION	75
5.6 SIXIÈME INSTANCE	77
5.6.1 DONNÉES DU PROBLÈME	77
5.6.2 RÉSULTAT DE L'OPTIMISATION	80
5.7 SEPTIÈME INSTANCE	80
5.7.1 DONNÉES DU PROBLÈME	80
5.7.2 RÉSULTAT DE L'OPTIMISATION	81
5.7.3 SOMMAIRE	83
CONCLUSION	86

5.8	DISCUSSION DES RÉSULTATS	87
BIBLIOGRAPHIE	.....	89
APPENDICE A – PREMIÈRE ANNEXE	.....	92
A.1	TABLEAUX DES RÉSULTATS DE LA PREMIÈRE INSTANCE	92
A.1.1	DONNÉES DU PROBLÈME	92
A.1.2	RÉSULTAT DE L'OPTIMISATION	95
APPENDICE B – DEUXIÈME ANNEXE	.....	98
B.1	TABLEAUX DES RÉSULTATS DE LA DEUXIÈME INSTANCE	98
B.1.1	DONNÉES DU PROBLÈME	98
B.1.2	RÉSULTAT DE L'OPTIMISATION	102
APPENDICE C – TROISIÈME ANNEXE	.....	106
C.1	TABLEAUX DES RÉSULTATS DE LA TROISIÈME INSTANCE	106
C.1.1	DONNÉES DU PROBLÈME	106
C.1.2	RÉSULTAT DE L'OPTIMISATION	110
APPENDICE D – QUATRIÈME ANNEXE	.....	114
D.1	TABLEAUX DES RÉSULTATS DE LA QUATRIÈME INSTANCE	114
D.1.1	RÉSULTAT DE L'OPTIMISATION	118
APPENDICE E – CINQUIÈME ANNEXE	.....	123
E.1	TABLEAUX DES RÉSULTATS DE LA CINQUIÈME INSTANCE	123
E.1.1	DONNÉES DU PROBLÈME	123
APPENDICE F – SIXIÈME ANNEXE	.....	131
F.1	TABLEAUX DES RÉSULTATS DE LA SIXIÈME INSTANCE	131
F.1.1	DONNÉES DU PROBLÈME	131
APPENDICE G – SEPTIÈME ANNEXE	.....	139
G.1	TABLEAUX DES RÉSULTATS DE LA SEPTIÈME INSTANCE	139
G.1.1	DONNÉES DU PROBLÈME	139

LISTE DES TABLEAUX

TABLEAU 2.1 : PLANIFICATION DE SIPHONNAGE	9
TABLEAU 2.2 : PLANIFICATION DE SIPHONNAGE	13
TABLEAU 2.3 : PROFIT DES TOURNÉES DE SIPHONNAGE	14
TABLEAU 2.4 : PLANIFICATION DES DEMANDES DE FOUR	14
TABLEAU 2.5 : PLANIFICATION DES DEMANDES DE TRANSPORT	14
TABLEAU 2.6 : ASSIGNATION À LA DEMANDE DE FOUR	15
TABLEAU 2.7 : ASSIGNATION À LA DEMANDE DE TRANSPORT	16
TABLEAU 2.8 : ASSIGNATION AU CARROUSEL	16
TABLEAU 4.1 : TOURNÉES DE SIPHONNAGE DÉJÀ ASSIGNÉ À LA DEMANDE DE FOUR	57
TABLEAU 4.2 : PLANIFICATION DES DEMANDES DE FOUR	57
TABLEAU 5.1 : PROFIT TOURNÉE DE SIPHONNAGE	58
TABLEAU 5.2 : VALEURS DES PARAMÈTRES FIXES DU MODÈLE D'OPTIMI- SATION	59
TABLEAU 5.3 : VALEURS DES POIDS POUR LA FONCTION MULTIOBJECTIF .	59
TABLEAU 5.4 : TABLEAU SOMMAIRE	85
TABLEAU A.1 : PLANIFICATION DE SIPHONNAGE (1 ^{ième} INSTANCE)	92
TABLEAU A.2 : PLANIFICATION DE SIPHONNAGE (1 ^{ième} INSTANCE)	93
TABLEAU A.3 : PLANIFICATION DE SIPHONNAGE (1 ^{ième} INSTANCE)	94
TABLEAU A.4 : PLANIFICATION DES DEMANDES DE FOUR (1 ^{ième} INSTANCE) .	94
TABLEAU A.5 : PLANIFICATION DES DEMANDES DE TRANSPORT (1 ^{ième} INS- TANCE)	94
TABLEAU A.6 : ASSIGNATION À LA DEMANDE DE FOUR 1 (1 ^{ième} INSTANCE) .	95
TABLEAU A.7 : ASSIGNATION À LA DEMANDE DE FOUR 2 (1 ^{ième} INSTANCE) .	95
TABLEAU A.8 : ASSIGNATION À LA DEMANDE DE FOUR 3 (1 ^{ième} INSTANCE) .	96

TABLEAU A.9 : ASSIGNATION À LA DEMANDE DE TRANSPORT 1 (1 ^{ière} INSTANCE)	96
TABLEAU A.10 : ASSIGNATION À LA DEMANDE DE TRANSPORT 2 (1 ^{ière} INSTANCE)	96
TABLEAU A.11 : ASSIGNATION AU CARROUSEL (1 ^{ière} INSTANCE)	97
TABLEAU A.12 : DÉTAIL DE LA FONCTION OBJECTIF (1 ^{ière} INSTANCE)	97
TABLEAU B.1 : PLANIFICATION DE SIPHONNAGE (2 ^{ième} INSTANCE)	98
TABLEAU B.2 : PLANIFICATION DE SIPHONNAGE (2 ^{ième} INSTANCE)	99
TABLEAU B.3 : PLANIFICATION DE SIPHONNAGE (2 ^{ième} INSTANCE)	100
TABLEAU B.4 : PLANIFICATION DE SIPHONNAGE (2 ^{ième} INSTANCE)	100
TABLEAU B.5 : PLANIFICATION DES DEMANDES DE FOUR (2 ^{ième} INSTANCE)	101
TABLEAU B.6 : PLANIFICATION DES DEMANDES DE TRANSPORT (2 ^{ième} INSTANCE)	101
TABLEAU B.7 : ASSIGNATION À LA DEMANDE DE FOUR 1 (2 ^{ième} INSTANCE)	102
TABLEAU B.8 : ASSIGNATION À LA DEMANDE DE FOUR 2 (2 ^{ième} INSTANCE)	102
TABLEAU B.9 : ASSIGNATION À LA DEMANDE DE FOUR 3 (2 ^{ième} INSTANCE)	103
TABLEAU B.10 : ASSIGNATION À LA DEMANDE DE FOUR 4 (2 ^{ième} INSTANCE)	103
TABLEAU B.11 : ASSIGNATION À LA DEMANDE DE TRANSPORT 1 (2 ^{ième} INSTANCE)	103
TABLEAU B.12 : ASSIGNATION À LA DEMANDE DE TRANSPORT 2 (2 ^{ième} INSTANCE)	104
TABLEAU B.13 : ASSIGNATION AU CARROUSEL (2 ^{ième} INSTANCE)	104
TABLEAU B.14 : ASSIGNATION AU CARROUSEL (2 ^{ième} INSTANCE)	105
TABLEAU B.15 : DÉTAIL DE LA FONCTION OBJECTIF (2 ^{ième} INSTANCE)	105
TABLEAU C.1 : PLANIFICATION DE SIPHONNAGE (3 ^{ième} INSTANCE)	106
TABLEAU C.2 : PLANIFICATION DE SIPHONNAGE (3 ^{ième} INSTANCE)	107
TABLEAU C.3 : PLANIFICATION DE SIPHONNAGE (3 ^{ième} INSTANCE)	108

TABLEAU C.4 : PLANIFICATION DE SIPHONNAGE (3 ^{ième} INSTANCE)	108
TABLEAU C.5 : PLANIFICATION DES DEMANDES DE FOUR (3 ^{ième} INSTANCE)	109
TABLEAU C.6 : PLANIFICATION DES DEMANDES DE TRANSPORT (3 ^{ième} INSTANCE)	109
TABLEAU C.7 : ASSIGNATION À LA DEMANDE DE FOUR 1 (3 ^{ième} INSTANCE)	110
TABLEAU C.8 : ASSIGNATION À LA DEMANDE DE FOUR 2 (3 ^{ième} INSTANCE)	110
TABLEAU C.9 : ASSIGNATION À LA DEMANDE DE FOUR 3 (3 ^{ième} INSTANCE)	111
TABLEAU C.10 : ASSIGNATION À LA DEMANDE DE TRANSPORT 1 (3 ^{ième} INSTANCE)	111
TABLEAU C.11 : ASSIGNATION À LA DEMANDE DE TRANSPORT 2 (3 ^{ième} INSTANCE)	111
TABLEAU C.12 : ASSIGNATION À LA DEMANDE DE TRANSPORT 3 (3 ^{ième} INSTANCE)	112
TABLEAU C.13 : ASSIGNATION AU CARROUSEL (3 ^{ième} INSTANCE)	112
TABLEAU C.14 : ASSIGNATION AU CARROUSEL (3 ^{ième} INSTANCE)	113
TABLEAU C.15 : DÉTAIL DE LA FONCTION OBJECTIF (3 ^{ième} INSTANCE)	113
TABLEAU D.1 : PLANIFICATION DE SIPHONNAGE (4 ^{ième} INSTANCE)	114
TABLEAU D.2 : PLANIFICATION DE SIPHONNAGE (4 ^{ième} INSTANCE)	115
TABLEAU D.3 : PLANIFICATION DE SIPHONNAGE (4 ^{ième} INSTANCE)	116
TABLEAU D.4 : PLANIFICATION DE SIPHONNAGE (4 ^{ième} INSTANCE)	116
TABLEAU D.5 : PLANIFICATION DES DEMANDES DE FOUR (4 ^{ième} INSTANCE)	117
TABLEAU D.6 : PLANIFICATION DES DEMANDES DE TRANSPORT (4 ^{ième} INSTANCE)	117
TABLEAU D.7 : ASSIGNATION À LA DEMANDE DE FOUR 1 (4 ^{ième} INSTANCE)	118
TABLEAU D.8 : ASSIGNATION À LA DEMANDE DE FOUR 2 (4 ^{ième} INSTANCE)	118
TABLEAU D.9 : ASSIGNATION À LA DEMANDE DE FOUR 4 (4 ^{ième} INSTANCE)	118

TABLEAU D.10 : ASSIGNATION À LA DEMANDE DE TRANSPORT 1 ($4^{ième}$ INSTANCE)	119
TABLEAU D.11 : ASSIGNATION À LA DEMANDE DE TRANSPORT 2 ($4^{ième}$ INSTANCE)	120
TABLEAU D.12 : ASSIGNATION À LA DEMANDE DE TRANSPORT 3 ($4^{ième}$ INSTANCE)	120
TABLEAU D.13 : ASSIGNATION À LA DEMANDE DE TRANSPORT 4 ($4^{ième}$ INSTANCE)	120
TABLEAU D.14 : ASSIGNATION AU CARROUSEL ($4^{ième}$ INSTANCE)	121
TABLEAU D.15 : ASSIGNATION AU CARROUSEL ($4^{ième}$ INSTANCE)	121
TABLEAU D.16 : DÉTAIL DE LA FONCTION OBJECTIF	122
TABLEAU E.1 : PLANIFICATION DE SIPHONNAGE ($5^{ième}$ INSTANCE)	123
TABLEAU E.2 : PLANIFICATION DE SIPHONNAGE ($5^{ième}$ INSTANCE)	124
TABLEAU E.3 : PLANIFICATION DE SIPHONNAGE ($5^{ième}$ INSTANCE)	125
TABLEAU E.4 : PLANIFICATION DE SIPHONNAGE ($5^{ième}$ INSTANCE)	125
TABLEAU E.5 : PLANIFICATION DES DEMANDES DE FOUR ($5^{ième}$ INSTANCE)	126
TABLEAU E.6 : PLANIFICATION DES DEMANDES DE TRANSPORT ($5^{ième}$ INSTANCE)	126
TABLEAU E.7 : ASSIGNATION À LA DEMANDE DE FOUR 1 ($5^{ième}$ INSTANCE)	127
TABLEAU E.8 : ASSIGNATION À LA DEMANDE DE FOUR 2 ($5^{ième}$ INSTANCE)	127
TABLEAU E.9 : ASSIGNATION À LA DEMANDE DE FOUR 3 ($5^{ième}$ INSTANCE)	128
TABLEAU E.10 : ASSIGNATION À LA DEMANDE DE TRANSPORT 1 ($5^{ième}$ INSTANCE)	128
TABLEAU E.11 : ASSIGNATION À LA DEMANDE DE TRANSPORT 2 ($5^{ième}$ INSTANCE)	128
TABLEAU E.12 : ASSIGNATION À LA DEMANDE DE TRANSPORT 3 ($5^{ième}$ INSTANCE)	129
TABLEAU E.13 : ASSIGNATION AU CARROUSEL ($5^{ième}$ INSTANCE)	129

TABLEAU E.14 : ASSIGNATION AU CARROUSEL ($5^{ième}$ INSTANCE)	130
TABLEAU E.15 : DÉTAIL DE LA FONCTION OBJECTIF ($5^{ième}$ INSTANCE)	130
TABLEAU F.1 : PLANIFICATION DE SIPHONNAGE ($6^{ième}$ INSTANCE)	131
TABLEAU F.2 : PLANIFICATION DE SIPHONNAGE ($6^{ième}$ INSTANCE)	132
TABLEAU F.3 : PLANIFICATION DE SIPHONNAGE ($6^{ième}$ INSTANCE)	133
TABLEAU F.4 : PLANIFICATION DE SIPHONNAGE ($6^{ième}$ INSTANCE)	133
TABLEAU F.5 : PLANIFICATION DES DEMANDES DE FOUR ($6^{ième}$ INSTANCE)	134
TABLEAU F.6 : PLANIFICATION DES DEMANDES DE TRANSPORT ($6^{ième}$ INSTANCE)	134
TABLEAU F.7 : ASSIGNATION À LA DEMANDE DE FOUR 1 ($6^{ième}$ INSTANCE) .	135
TABLEAU F.8 : ASSIGNATION À LA DEMANDE DE FOUR 2 ($6^{ième}$ INSTANCE) .	135
TABLEAU F.9 : ASSIGNATION À LA DEMANDE DE FOUR 3 ($6^{ième}$ INSTANCE) .	136
TABLEAU F.10 : ASSIGNATION À LA DEMANDE DE FOUR 4 ($6^{ième}$ INSTANCE) .	136
TABLEAU F.11 : ASSIGNATION À LA DEMANDE DE TRANSPORT 1 ($6^{ième}$ INSTANCE)	136
TABLEAU F.12 : ASSIGNATION À LA DEMANDE DE TRANSPORT 2 ($6^{ième}$ INSTANCE)	137
TABLEAU F.13 : ASSIGNATION À LA DEMANDE DE TRANSPORT 3 ($6^{ième}$ INSTANCE)	137
TABLEAU F.14 : ASSIGNATION À LA DEMANDE DE TRANSPORT 4 ($6^{ième}$ INSTANCE)	137
TABLEAU F.15 : ASSIGNATION AU CARROUSEL ($6^{ième}$ INSTANCE)	138
TABLEAU F.16 : ASSIGNATION AU CARROUSEL ($6^{ième}$ INSTANCE)	138
TABLEAU F.17 : DÉTAIL DE LA FONCTION OBJECTIF ($6^{ième}$ INSTANCE)	138
TABLEAU G.1 : PLANIFICATION DE SIPHONNAGE ($7^{ième}$ INSTANCE)	139
TABLEAU G.2 : PLANIFICATION DE SIPHONNAGE ($7^{ième}$ INSTANCE)	140
TABLEAU G.3 : PLANIFICATION DE SIPHONNAGE ($7^{ième}$ INSTANCE)	141

TABLEAU G.4 : PLANIFICATION DE SIPHONNAGE (<i>7^{ième} INSTANCE</i>)	141
TABLEAU G.5 : PLANIFICATION DES DEMANDES DE FOUR (<i>7^{ième} INSTANCE</i>)	142
TABLEAU G.6 : PLANIFICATION DES DEMANDES DE TRANSPORT (<i>7^{ième} INSTANCE</i>)	142
TABLEAU G.7 : ASSIGNATION À LA DEMANDE DE FOUR 1 (<i>7^{ième} INSTANCE</i>) .	143
TABLEAU G.8 : ASSIGNATION À LA DEMANDE DE FOUR 2 (<i>7^{ième} INSTANCE</i>) .	143
TABLEAU G.9 : ASSIGNATION À LA DEMANDE DE FOUR 3 (<i>7^{ième} INSTANCE</i>) .	144
TABLEAU G.10 : ASSIGNATION À LA DEMANDE DE FOUR 4 (<i>7^{ième} INSTANCE</i>) .	144
TABLEAU G.11 : ASSIGNATION À LA DEMANDE DE TRANSPORT 1 (<i>7^{ième} INSTANCE</i>)	144
TABLEAU G.12 : ASSIGNATION À LA DEMANDE DE TRANSPORT 2 (<i>7^{ième} INSTANCE</i>)	145
TABLEAU G.13 : ASSIGNATION AU CARROUSEL (<i>7^{ième} INSTANCE</i>)	145
TABLEAU G.14 : DÉTAIL DE LA FONCTION OBJECTIF (<i>7^{ième} INSTANCE</i>)	145

LISTE DES FIGURES

FIGURE 2.1 – REPRÉSENTATION D'UNE SALLE DE CUVE	9
FIGURE 2.2 – REPRÉSENTATION DES FOURS D'UN CENTRE DE COULÉE	10
FIGURE 2.3 – EXEMPLE D'UN ARBRE DE BRANCHEMENT DE L'ALGORITHME DE SÉPARATION ET ÉVALUATION PROGRESSIVE	25
FIGURE 5.1 – TEMPS DE SORTIE DES TOURNÉES DE SIPHONNAGE ET DES DEMANDES DE MÉTAL (1 ^{ière} INSTANCE)	61
FIGURE 5.2 – COMPOSITION CHIMIQUE EN FER EN FONCTION DU TEMPS (1 ^{ière} INSTANCE)	62
FIGURE 5.3 – COMPOSITION CHIMIQUE EN SILICIUM EN FONCTION DU TEMPS (1 ^{ière} INSTANCE)	62
FIGURE 5.4 – ASSIGNATION DES TOURNÉES AUX DEMANDES DE MÉTAL (1 ^{ière} INSTANCE)	64
FIGURE 5.5 – TEMPS DE SORTIE DES TOURNÉES DE SIPHONNAGE ET DES DEMANDES DE MÉTAL (2 ^{ième} INSTANCE)	65
FIGURE 5.6 – COMPOSITION CHIMIQUE EN FER EN FONCTION DU TEMPS (2 ^{ième} INSTANCE)	66
FIGURE 5.7 – COMPOSITION CHIMIQUE EN SILICIUM EN FONCTION DU TEMPS (2 ^{ième} INSTANCE)	66
FIGURE 5.8 – ASSIGNATION DES TOURNÉES AUX DEMANDES DE MÉTAL (2 ^{ième} INSTANCE)	67
FIGURE 5.9 – TEMPS DE SORTIE DES TOURNÉES DE SIPHONNAGE ET DES DEMANDES DE MÉTAL (3 ^{ième} INSTANCE)	69
FIGURE 5.10 – COMPOSITION CHIMIQUE EN FER EN FONCTION DU TEMPS (3 ^{ième} INSTANCE)	69
FIGURE 5.11 – COMPOSITION CHIMIQUE EN SILICIUM EN FONCTION DU TEMPS (3 ^{ième} INSTANCE)	70
FIGURE 5.12 – ASSIGNATION DES TOURNÉES AUX DEMANDES DE MÉTAL (3 ^{ième} INSTANCE)	71

FIGURE 5.13 – TEMPS DE SORTIE DES TOURNÉES DE SIPHONNAGE ET DES DEMANDES DE MÉTAL (4 ^{ième} INSTANCE)	72
FIGURE 5.14 – COMPOSITION CHIMIQUE EN FER EN FONCTION DU TEMPS (4 ^{ième} INSTANCE)	73
FIGURE 5.15 – COMPOSITION CHIMIQUE EN SILICIUM EN FONCTION DU TEMPS (4 ^{ième} INSTANCE)	73
FIGURE 5.16 – ASSIGNATION DES TOURNÉES AUX DEMANDES DE MÉTAL (4 ^{ième} INSTANCE)	74
FIGURE 5.17 – TEMPS DE SORTIE DES TOURNÉES DE SIPHONNAGE ET DES DEMANDES DE MÉTAL (5 ^{ième} INSTANCE)	75
FIGURE 5.18 – COMPOSITION CHIMIQUE EN FER EN FONCTION DU TEMPS (5 ^{ième} INSTANCE)	76
FIGURE 5.19 – COMPOSITION CHIMIQUE EN SILICIUM EN FONCTION DU TEMPS (5 ^{ième} INSTANCE)	76
FIGURE 5.20 – ASSIGNATION DES TOURNÉES AUX DEMANDES DE MÉTAL (5 ^{ième} INSTANCE)	77
FIGURE 5.21 – TEMPS DE SORTIE DES TOURNÉES DE SIPHONNAGE ET DES DEMANDES DE MÉTAL (6 ^{ième} INSTANCE)	78
FIGURE 5.22 – COMPOSITION CHIMIQUE EN FER EN FONCTION DU TEMPS (6 ^{ième} INSTANCE)	79
FIGURE 5.23 – COMPOSITION CHIMIQUE EN SILICIUM EN FONCTION DU TEMPS (6 ^{ième} INSTANCE)	79
FIGURE 5.24 – ASSIGNATION DES TOURNÉES AUX DEMANDES DE MÉTAL (6 ^{ième} INSTANCE)	81
FIGURE 5.25 – TEMPS DE SORTIE DES TOURNÉES DE SIPHONNAGE ET DES DEMANDES DE MÉTAL (7 ^{ième} INSTANCE)	82
FIGURE 5.26 – COMPOSITION CHIMIQUE EN FER EN FONCTION DU TEMPS (7 ^{ième} INSTANCE)	82
FIGURE 5.27 – COMPOSITION CHIMIQUE EN SILICIUM EN FONCTION DU TEMPS (7 ^{ième} INSTANCE)	83

FIGURE 5.28 – ASSIGNATION DES TOURNÉES AUX DEMANDES DE MÉTAL
(7^{ième} INSTANCE) 84

DÉDICACE

*À mes parents, Jacky Lavoie et Renée Lambert,
Vous qui avez toujours cru en moi et m'avez soutenu dans chacun de mes projets. Merci du
fond du cœur.*

REMERCIEMENTS

Je remercie l'entreprise Rio Tinto de m'avoir permis de réaliser ma maîtrise sur un projet directement lié à ses activités. Avoir eu l'opportunité de travailler sur un projet industriel avec des contraintes réelles a été une expérience précieuse et enrichissante. J'espère que ce travail pourra, à terme, être mis en application au sein de leurs opérations.

Je remercie également ma directrice de recherche, Sara Séguin, pour son encadrement tout au long de ce projet. Son aide précieuse en matière de rédaction scientifique ainsi que son expertise en optimisation ont grandement contribué à l'élaboration de ce travail.

CHAPITRE I

INTRODUCTION

Ces dernières années, de nombreuses entreprises se sont tournées vers l'optimisation de leurs opérations pour maintenir leur compétitivité sur le marché. Dans cette quête d'efficacité, la recherche opérationnelle joue un rôle crucial en permettant le développement de modèles d'optimisation et de simulation, qui visent à maximiser la rentabilité et réduire les coûts. Le secteur de la production d'aluminium, caractérisé par des processus complexes et des enjeux économiques importants, offre de nombreuses opportunités pour la mise en œuvre de tels projets. L'optimisation des opérations au sein de ces usines représente un levier stratégique majeur pour améliorer la productivité, réduire la consommation d'énergie et, enfin, accroître la performance globale des entreprises du secteur. Ce mémoire s'intéresse spécifiquement à l'optimisation des assignations des creusets de métal au centre de coulée, un élément clé dans le processus de production. En analysant et modélisant ce processus, l'objectif est de développer des solutions permettant d'améliorer l'allocation des creusets de manière à maximiser l'efficacité de la production tout en minimisant les coûts associés.

1.1 PROBLÉMATIQUE

Une usine de production d'aluminium repose sur plusieurs opérations essentielles pour assurer son bon fonctionnement, telles que le siphonnage des cuves, le changement d'anodes et la coulée des produits d'aluminium. Parmi ces opérations, le transfert des creusets de métal depuis le centre d'électrolyse jusqu'au centre de coulée joue un rôle déterminant

dans l'efficacité globale de la production. Ce processus implique de nombreuses décisions séquentielles complexes, notamment l'assignation des creusets aux différentes demandes : four, transport ou carrousel. Il s'agit ici d'un problème d'assignation, dans lequel il est nécessaire de distribuer de manière optimale les creusets en fonction de plusieurs critères.

En effet, l'assignation des creusets nécessite de prendre en compte un ensemble de facteurs : les contraintes de capacité des équipements, les délais de production, ainsi que les caractéristiques spécifiques de chaque creuset, telles que son poids ou sa concentration chimique en fer et silicium. Cette tâche d'assignation n'est pas triviale, car elle doit respecter des priorités basées sur la période de chargement des équipements, l'état de la flotte de creusets, et les exigences techniques propres à chaque étape du processus de production. De plus, l'interdépendance entre ces éléments rend la gestion du flux des creusets particulièrement complexe et dynamique. Le problème d'assignation devient alors un défi, où les décisions doivent être prises rapidement et de manière coordonnée pour éviter des interruptions de production, minimiser les temps d'attente et optimiser l'utilisation des ressources disponibles.

Pendant une période de travail de 12 heures, de multiples creusets et demandes arrivent simultanément, augmentant la complexité de la gestion. Actuellement, cette tâche d'assignation est réalisée manuellement par un répartiteur. Celui-ci doit posséder une connaissance approfondie des opérations des deux centres (électrolyse et coulée) pour prendre des décisions optimales. Cela implique une charge cognitive élevée et un risque important d'erreurs humaines, notamment dans un environnement où les décisions doivent être prises rapidement et sous pression.

Dans ce contexte, ce mémoire propose de développer un modèle d'optimisation pour le problème d'assignation des creusets de métal, en prenant en compte les contraintes spécifiques et complexes de la vie réelle. Le modèle visera à assister le répartiteur dans ses prises de décision en intégrant des critères, tels que les quantités de métal des demandes, les variations des caractéristiques des creusets (poids et chimie), les périodes de chargement des demandes, ainsi que les priorités spécifiques de chaque étape du processus. L'objectif est de créer un outil d'optimisation capable de proposer des solutions qui respectent ces contraintes opérationnelles, tout en maximisant l'efficacité des processus. En réduisant la dépendance à l'expertise manuelle, ce modèle permettra d'améliorer la précision des décisions, d'assurer une meilleure fluidité des opérations et de réduire les risques d'erreurs humaines, tout en garantissant que les objectifs de production sont respectés dans un environnement dynamique.

1.2 OBJECTIFS DU PROJET

L'objectif principal de ce mémoire est de formuler un problème d'optimisation en nombres entiers pour l'assignation optimale des creusets d'électrolyse aux différentes demandes de métal dans une usine de production d'aluminium. Ce problème d'optimisation devra permettre de déterminer la répartition la plus efficace des creusets, en respectant les contraintes spécifiques liées aux différentes étapes du processus de production. Le modèle proposé doit non seulement maximiser l'efficacité du processus de production, mais aussi respecter des contraintes opérationnelles现实的 qui se manifestent dans le cadre d'une production en temps réel.

Le modèle d'optimisation développé prend en compte plusieurs contraintes majeures.

Tout d'abord, il tient compte des caractéristiques des demandes de métal. Chaque demande, qu'il s'agisse de celle d'un four ou d'un transport, est définie par une quantité de métal spécifique que le four ou le creuset de transport doit atteindre pour être considéré comme complet. En outre, chaque demande doit respecter une concentration maximale de certains éléments chimiques, tels que le fer et le silicium. Ensuite, des contraintes sont imposées sur les périodes de chargement. Des délais stricts doivent être respectés pour chaque demande de chargement, afin de garantir que les creusets arrivent à temps pour chaque demande. Cela permet d'éviter toute interruption dans le processus, que ce soit pour la machine de coulée ou pour le départ des camions transportant l'aluminium. Enfin, les caractéristiques spécifiques des creusets doivent également être prises en compte. Chaque creuset possède des spécifications uniques, telles que son poids et sa concentration en fer et silicium, qui influencent la manière dont il est géré et traité dans le cadre du processus de production. Ces spécifications doivent donc être intégrées lors de l'assignation des creusets aux différentes demandes.

Les trois types de demandes à gérer dans ce modèle sont les suivants. Le premier type est la demande de four, où le creuset doit être utilisé pour alimenter un four, lequel se videra ensuite dans une machine à couler. Le deuxième type est la demande de transport, où le creuset doit être déplacé pour remplir un creuset de transport, qui est fixé à un camion destiné à circuler sur la route. Enfin, le troisième type de demande concerne le carrousel, où le creuset est directement vidé dans des moules de forme conventionnelle, destinés à être vendus pour la refonte.

Afin de formuler correctement ce modèle d'optimisation, une analyse détaillée des opérations des différents secteurs de l'aluminerie est réalisée pour mieux comprendre les

contraintes pratiques et les besoins spécifiques de chaque étape. Les contraintes liées aux opérations réelles de l'usine seront également abordées de manière approfondie, pour garantir que le modèle soit applicable sur le terrain.

En outre, un sous-objectif important de ce projet sera d'utiliser des données opérationnelles réelles provenant de l'usine pour tester et valider le modèle. Ces données permettront de créer des solutions réalisables et de les analyser en vue d'évaluer la performance du modèle. Cette étape de validation visera à confirmer que la formulation du problème et les solutions proposées sont adaptées à la réalité de la production, tout en permettant d'améliorer la gestion des creusets et l'efficacité globale des opérations de l'usine.

Enfin, le projet conclut par une évaluation détaillée des résultats obtenus à l'aide du modèle d'optimisation, en mettant en évidence les gains en matière de fluidité des opérations, de réduction des erreurs humaines et d'amélioration des performances de production.

1.3 STRUCTURE DU MÉMOIRE

Le chapitre 1 de ce mémoire présente le contexte général du domaine de la production d'aluminium, définit la problématique et expose les objectifs poursuivis dans le cadre de ce travail. Le chapitre 2 décrit les différentes composantes d'une aluminerie et explique les principales opérations qui y sont réalisées. Il illustre également le problème à résoudre à travers un exemple concret et explore les travaux scientifiques pertinents dans le domaine de l'optimisation de la production d'aluminium. Le chapitre 3 détaille le modèle d'optimisation proposé pour résoudre la problématique. Il fournit une explication approfondie des paramètres, des variables, des contraintes et de la fonction multiobjectif du modèle, avant de traiter de

la gestion des instances non-réalisables. Le chapitre 4 décrit la construction du système de décision en temps réel, en abordant la collecte des données ainsi que les calculs nécessaires à la gestion de la chimie des creusets. Le chapitre 5 présente les résultats obtenus à partir des différentes instances d'optimisation. Des tableaux, graphiques et diagrammes de Gantt sont fournis pour illustrer ces résultats. Enfin, ce chapitre se termine par une discussion sur les implications de ces résultats pour l'amélioration des opérations de l'usine.

CHAPITRE II

REVUE DE LITTÉRATURE

Cette section définit les différentes composantes d'une aluminerie, ensuite, le problème est décrit en donnant un exemple détaillé. Finalement, un survol des articles scientifiques dans le domaine de l'aluminium est présenté.

2.1 PROCÉDÉS FONDAMENTAUX D'UNE ALUMINERIE

2.1.1 ÉLECTROLYSE

L'électrolyse est un procédé chimique qui permet de produire de l'aluminium à partir d'alumine extraite de la bauxite. L'alumine est dissoute dans un bain fluoré d'électrolyse à l'intérieur d'une cuve Wikipedia (2023). Les opérations liées à l'électrolyse sont décrites en détail. Tout d'abord, le centre d'électrolyse est constitué de plusieurs cuves. Le schéma du centre d'électrolyse est présenté à la figure 2.1. Dans cette représentation, chaque carré bleu correspond à une salle de cuves, et celles-ci sont siphonnées en alternance. Parmi les six salles, trois sont siphonnées simultanément. À l'intérieur des cuves, l'aluminium est produit selon le procédé d'électrolyse. Le métal doit être périodiquement extrait de la cuve et transporté vers un centre de coulée. Chaque cuve doit être siphonnée à des intervalles de 24 heures.

Le métal en fusion est transféré du centre d'électrolyse vers le centre de coulée à l'aide de creusets. Ces creusets ont une capacité maximale d'environ 13 200 kg, mais cette capacité peut varier en fonction du degré d'encrassement. L'aluminium peut se solidifier sur les parois

du creuset, ce qui peut entraîner une diminution de sa capacité effective. Lorsqu'un creuset atteint un niveau d'encrassement trop important, il est envoyé au lavage pour éliminer le métal accumulé sur les parois. Cela peut affecter le nombre de creusets disponibles pour le siphonnage du métal.

En fonction de la cuve, il est nécessaire de siphonner entre 2000 kg et 4680 kg de métal dépendamment de l'accumulation de métal dans la cuve. Ainsi, un creuset peut contenir le métal en fusion provenant d'environ 3 à 6 cuves. La composition chimique des cuves varie en fonction de la qualité de l'alumine, des anodes présentes dans la cuve et des opérations effectuées. Les impuretés les plus courantes comprennent le fer, le silicium, le nickel, phosphore et le cuivre.

Juste avant la période de siphonnage, une planification des cuves à siphonner est établie. Cette planification regroupe les cuves pour former des tournées de siphonnage de métal. Elle indique la quantité de métal à siphonner dans chaque cuve, le poids et la composition chimique résultante des cuves combinées. De plus, elle estime une date de siphonnage qui est incluse dans la planification. Un exemple de cette planification est présenté dans le tableau 2.1.

2.1.2 COULÉE

Dans cette sous-section, les opérations liées au centre de coulée sont expliquées en détail. Premièrement, le centre de coulée comporte plusieurs équipements pour couler le métal en différents types de lingot. Chaque équipement de coulée est lié à deux fours en amont, comme montré à la figure 2.2. Le métal dans les fours est transféré en alternance dans la



FIGURE 2.1 : Représentation d'une salle de cuve

TABLEAU 2.1 : Planification de siphonnage

No. Tournée	Heure de siphonnage	Poids à siphonner (kg)	Fe (%)	Si (%)	Ni (%)	P (%)
1	7h00	12000	0.0696	0.0499	0.0070	0.0002
2	7h30	11500	0.0725	0.0343	0.0057	0.0011
3	8h00	11000	0.0834	0.0448	0.0070	0.0013
4	8h30	12100	0.0771	0.0432	0.0071	0.0005
5	9h00	10800	0.0937	0.0372	0.0062	0.0010
...

machine à couler. Lorsqu'un four coule le métal dans la machine, l'autre est en cours de remplissage. Celui qui est en cours de remplissage peut recevoir le contenu des creusets de métal en fusion provenant de l'électrolyse. Selon la commande du produit d'aluminium à couler, la quantité ainsi que la composition chimique du métal sont connues à l'avance. Pour atteindre les spécifications chimiques, des ingrédients chimiques sont ajoutés à la fournée avant de recevoir le contenu des creusets de métal. Des rebuts de métal sont parfois ajoutés à la

fournée. Ces rebuts proviennent de coulées manquées, que l'usine doit passer pour minimiser les pertes. De plus, une fournée est définie par une période de la journée indiquant à quelle heure le four peut prendre le métal et à quelle heure le four doit être plein. Certaines machines coulent le métal en fusion en continu, ceci veut dire qu'il doit toujours avoir du métal dans le dalot qui amène le métal. Ceci demande une bonne planification, car le four qui est en chargement doit être rempli avant une certaine période, sinon la machine de coulée doit être arrêtée. Il faut donc prévoir du métal afin de s'assurer que le four en remplissage aura la quantité requise de métal selon la planification. Cependant, il ne faut pas qu'il soit rempli trop à l'avance, car le four doit être maintenu à une certaine température et ceci demande une grande quantité d'énergie.

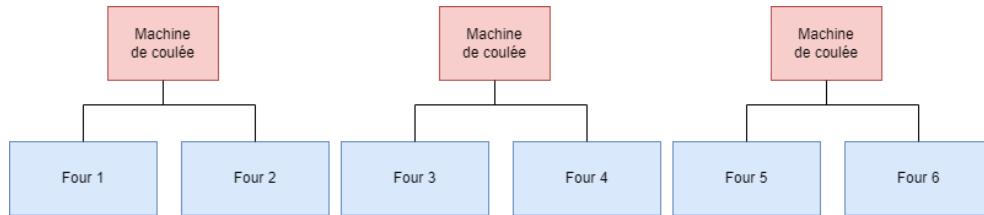


FIGURE 2.2 : Représentation des fours d'un centre de coulée

En plus des fours, le centre de coulée a aussi un carrousel. Cet équipement permet de couler le métal en lingot conventionnel servant comme produit de deuxième transformation. Ces lingots sont vendus en fonction de leur composition chimique. Moins le métal contient d'impureté, comme le fer, le silicium, le nickel et le phosphore, plus le lingot a une grande valeur. Un creuset d'électrolyse peut être assigné au carrousel seulement si son temps d'attente est inférieur à 2 heures. Couler un creuset d'électrolyse sur le carrousel peut prendre environ 30 minutes. Ceci veut dire qu'une file d'attente peut se créer devant le carrousel si trop de creusets sont assignés à celui-ci.

Finalement, le centre de coulée contient un centre de transfert pour transférer le métal d'une usine à une autre. Au centre de transfert, le métal est transféré dans un creuset de transport fixé sur un camion qui peut transporter le métal d'usine en usine. Le camion qui transporte le métal contient 2 creusets de 15 tonnes de capacité chacun. Les transports sont traités comme les demandes de four, c'est-à-dire qu'ils ont une quantité et une composition chimique spécifique. Un creuset d'électrolyse peut être assigné à une demande de transport seulement si son temps d'attente est inférieur à 2 heures. Le transfert de métal est nécessaire lorsque le centre d'électrolyse d'une usine ne produit pas assez de métal pour remplir sa demande ou lorsque l'usine en question n'est pas capable de couler le métal provenant de l'électrolyse. Ceci peut survenir lorsqu'une machine de coulée est brisée.

2.1.3 FLUX DE MÉTAL

Dans cette sous-section, les opérations liées au flux de métal sont décrites en détail. Les creusets sont siphonnés à l'aide d'un siphon fixé sur un pont roulant et, lorsque le siphonnage du creuset est terminé, un transporteur de creuset se charge de transporter le creuset au centre de coulée. Le centre de coulée contient des places conçues pour mettre un creuset en attente. Cet endroit est muni d'un réchaud pour éviter que le creuset ne perde trop de chaleur. Une fois rendu au centre de coulée, un véhicule transvide le creuset dans le four approprié. Chaque creuset est identifié par un numéro et ceci permet d'identifier le four auquel cette tournée est assignée. Lorsqu'un creuset est assigné à une demande de transport, il est probable que seulement une partie du creuset soit assigné à la demande. Cela est dû au fait qu'un creuset de transport a une capacité de 15 tonnes et qu'en moyenne les creusets d'électrolyse contiennent

12 tonnes. Lorsque le contenu du creuset n'est pas assigné en entier à la demande, une seconde assignation est nécessaire.

2.2 DESCRIPTION DU PROBLÈME

Dans cette section, le problème à résoudre est présenté. D'un côté, les creusets d'électrolyse sont siphonnés selon une planification établie préalablement. Autrement dit, le temps de sortie, la quantité et la composition chimique des creusets sont connus avec un certain niveau de confiance. D'un autre côté, les fournées et les transports sont planifiés, c'est-à-dire que la période de chargement, la quantité et la composition chimique des fournées et des transports sont connues à l'avance. Enfin, la disponibilité du carrousel est aussi connue. Le but du problème est d'assigner les creusets à une des trois possibilités suivantes : une demande de four, une demande de transport ou au carrousel. Il se peut qu'un creuset soit doublement assigné. Par exemple, une partie d'un creuset peut être assigné à une demande de four pour la compléter et le reste du métal peut être assigné au carrousel. Pour bien illustrer le problème, voici un exemple détaillé.

Premièrement, les données de la planification de siphonnage de métal sont présentées dans le tableau 2.2. L'heure de siphonnage signifie l'heure à laquelle le creuset de métal est plein et est prêt à être envoyé au centre de coulée. Les concentrations en pourcentage pour le fer et silicium sont également inscrites dans le tableau. Cette concentration est calculée à partir d'une moyenne pondérée du métal siphonné dans chaque cuve. Finalement, le profit de chaque tournée est écrit en dernière colonne du tableau. Le profit de chaque tournée suit une fonction en escalier selon le tableau 2.3. Par exemple, une tournée a un profit de 100 points si

ses concentrations en fer et en silicium sont inférieures à 0,0440%. Plus le profit de la tournée est grand, plus le prix du métal est élevé sur le marché. Le profit des tournées est comptabilisé dans la fonction objectif lorsqu'une tournée est assignée au carrousel.

TABLEAU 2.2 : Planification de siphonnage

No. Tournée	Heure de siphonnage	Poids à siphonner (kg)	Fe (%)	Si (%)	Profit
1	7h00	12 370	0,0795	0,0399	30
2	7h30	12 180	0,0806	0,0403	30
3	8h00	13 042	0,0574	0,0263	50
4	8h30	13 121	0,0783	0,0388	30
5	9h00	12 230	0,0641	0,0461	30
6	9h30	13 161	0,0636	0,0367	50
7	10h00	13 150	0,0776	0,0417	30
8	10h30	12 881	0,0705	0,0433	30

Deuxièmement, les demandes de four sont présentées dans le tableau 2.4. L'heure de début et l'heure de fin représentent la période à respecter pour le chargement du four. C'est-à-dire que des assignations à ce four doivent être dans cet intervalle. Les quantités minimales et maximales représentent un intervalle de poids nécessaire à assigner à ce four pour ne pas avoir de perte. Finalement, la concentration en fer et en silicium est présente. La moyenne en fer et en silice pondérée par le poids des creusets doit être inférieure à ces deux quantités.

Troisièmement, les demandes de transport sont présentées dans le tableau 2.5. Puisque

TABLEAU 2.3 : Profit des tournées de siphonnage

Alliage	Fe (%)	Si (%)	Profit
P0404	0,0440	0,0440	100
P0406	0,0640	0,0440	50
P0606	0,0640	0,0640	40
P0610	0,1000	0,0640	30
P1020	0,2000	0,1000	10

TABLEAU 2.4 : Planification des demandes de four

No. Four	Heure début	Heure fin	Quantité min.	Quantité max.	Fe (%)	Si (%)
1	8h00	10h00	35 000	45 000	0,0800	0,0500

les demandes de transport sont traitées de la même façon que les demandes de four, la signification des données est identique. Finalement, le carrousel est disponible pour toute la durée du quart de travail.

TABLEAU 2.5 : Planification des demandes de transport

No. Transport	Heure début	Heure fin	Quantité min.	Quantité max.	Fe (%)	Si (%)
1	10h30	11h30	17500	17500	0,0700	0,0550

Pour résoudre ce problème, le logiciel Gurobi Optimization, LLC (2024) est utilisé. Cette librairie commerciale permet de résoudre des problèmes linéaires en nombres entiers

de manière efficace. Elle utilise la procédure par évaluation et séparation progressive qui est décrite en détail dans la section 2.4, ainsi qu'une multitude d'heuristiques. Une solution réalisable pour cette instance du problème est présentée dans les tableaux suivants. D'abord, les assignations à la demande de four sont présentées, ensuite celles à la demande de transport et enfin celles du carrousel.

Dans cette solution, les tournées 1, 2 et 4 sont assignées complètement à la demande de four. Le four contient un poids total de 37 671 kg. La concentration finale en fer et en silicium est de 0,0794% et 0,0396% respectivement. Toutes les conditions sont respectées au niveau de la quantité de métal et de la chimie. De plus, les tournées sont assignées dans l'intervalle de temps désiré.

TABLEAU 2.6 : Assignation à la demande de four

No. Tournée	Heure siphonné	Poids assigné	Heure d'assignation
1	7h00	12 370	8h00
2	7h30	12 180	8h15
4	8h30	13 121	9h00

Les tournées 5 et 8 sont assignées à la demande de transport. La tournée 8 est divisée en deux pour respecter les quantités minimales et maximales de métal à assigner pour le transport. Le reste de la tournée est assigné au carrousel. Le poids total de la demande est 17 500 kg et les concentrations de fer et de silicium sont de 0,0660% et 0,0453% respectivement. Toutes les contraintes de quantité, chimie et temps sont également respectées.

TABLEAU 2.7 : Assignation à la demande de transport

No.	Tournée	Heure siphonné	Poids assigné	Heure d'assignation
5		9h00	12 230	10h30
8		10h30	5 270	11h00

Les assignations au carrousel sont planifiées de façon à maximiser le profit. Les tournées ayant le plus grand profit c'est-à-dire les tournées 3 et 6 sont assignées au carrousel. Finalement, la tournée 7 et le reste de la tournée 8 sont assignées au carrousel.

TABLEAU 2.8 : Assignation au carrousel

No.	Tournée	Heure siphonné	Poids assigné	Heure d'assignation	Profit
3		8h00	13 042	8h30	50
6		9h30	13 161	10h00	50
7		10h00	13 150	10h30	30
8		10h30	7 611	11h30	30

Ceci représente un exemple simplifié du problème avec seulement une demande de four, une demande de transport et le carrousel. Cet exemple est présenté afin de montrer les contraintes principales et les objectifs principaux à prendre en considération. De plus, cette instance prend en compte seulement 2 éléments chimiques. Les instances de problème réel peuvent contenir jusqu'à 5 demandes de four et 5 demandes de transport avec de multiples éléments chimiques.

2.3 TRAVAUX ANTÉRIEURS

Dans cette section, des articles portant sur la recherche opérationnelle en lien avec les alumineries sont présentés. De plus, des articles sur le problème d'assignation ainsi que des articles sur des problèmes avec des fonctions multiobjectifs sont présentés.

Beaucoup d'articles ont pour sujet l'ordonnancement des coulées dans le but de minimiser les retards de commandes. Par exemple, l'article de Marc Gravel et Gagné (2000) traite de l'ordonnancement de produit de coulée sur une machine de coulée avec 3 fours en amont. Plusieurs contraintes de préséance sont présentes dans le problème. Lorsque deux fournées se suivent, les alliages doivent être environ du même type ou sinon un lavage doit être exécuté et ceci prend un temps considérable. Le problème revient à trouver la séquence optimale de n commandes sur m machines parallèles. Dans l'article, le problème est résolu par un algorithme génétique.

Un second article qui traite de l'ordonnancement des fournées est Gravel *et al.* (2002). L'ordonnancement se fait sur une machine de coulée continue alimentée par deux fours en amont. Concrètement, les deux fours déversent alternativement du métal en fusion dans la machine de coulée de manière continue. Ils sont remplis en alternance pour maintenir un flux constant. Le problème est résolu à l'aide d'une métaheuristique de colonie de fourmis. L'ordonnancement prend en compte plusieurs facteurs, notamment les alliages de métal, le nombre de pièces à produire, les dimensions des pièces et les dates de livraison. L'aluminerie décrite dans cet article ne dispose pas de centre d'électrolyse, ce qui signifie que le métal provient d'autres usines à proximité. Cet article examine le flux de métal, soulignant la

nécessité pour le centre de coulée de garantir la disponibilité du métal en fusion.

Les articles de Ladurantaye *et al.* (2007), Duman *et al.* (2008) et Tang *et al.* (2000) abordent des problématiques similaires liées à l'ordonnancement et à la planification de la production d'un laminoir dans le domaine de l'aluminium et de l'acier. Les deux premiers articles se concentrent sur l'optimisation de l'ordonnancement d'un laminoir d'aluminium pour minimiser les temps d'installation pour réaliser les commandes. Dans le premier, une heuristique est développée pour optimiser la planification des fournées, tandis que le second présente un modèle d'optimisation linéaire en nombres entiers. Le troisième article, quant à lui, traite exactement le même problème, cependant appliqué au domaine de l'acier. Le problème est résout à l'aide d'un algorithme génétique. Par la suite, les articles Guo *et al.* (2021) et Schwindt et Trautmann (2003) traitent de l'ordonnancement de la production de lingots de laminoir en prenant en compte la production à l'électrolyse. Bien que cet article partage certaines similitudes avec les autres, il se distingue par l'influence de l'optimisation sur l'ordre de siphonnage des cuves. Ces articles sont intéressants puisqu'elles montrent les applications de la recherche opérationnelle appliquée au domaine de la production d'aluminium.

Les articles Steinrücke (2011) et Ferretti *et al.* (2007) traitent de la chaîne de valeur de la production d'aluminium. L'article de Steinrücke (2011) propose une modélisation de cette chaîne de valeur et présente un modèle d'optimisation linéaire en nombres entiers pour résoudre le problème, tout en développant également une heuristique. De son côté, Ferretti *et al.* (2007) se concentre sur la décarbonation de cette même chaîne de valeur en proposant un modèle d'optimisation pour réduire les émissions de CO₂ dans le processus de production.

Une partie du modèle d'optimisation dans ce mémoire fait référence au problème classique d'assignation de ressource à des tâches. Il est donc intéressant de voir comment modéliser et résoudre ce problème avec des algorithmes efficaces. Les articles Balinski et Gomory (1964), Balinski (1985) et Jonker et Volgenant (1987) présentent différents algorithmes pour résoudre un problème d'assignation linéaire. Ces articles se concentrent beaucoup sur la méthode utilisée pour résoudre le problème d'assignation. L'un des principaux avantages de ces articles réside dans leur présentation détaillée des méthodes algorithmiques pour résoudre le problème d'assignation linéaire, qui peut être une sous-partie utile à la résolution d'un problème plus complexe, comme celui modélisé dans ce mémoire. Cependant, ces modèles académiques présentent peu de contraintes et ne reflètent pas les caractéristiques des problèmes industriels.

D'un côté plus pratique, beaucoup d'articles traitent des problèmes stochastiques d'assignation dynamique. L'article Powell (1996) présente plusieurs formulations d'un problème d'assignation des transporteurs de fret en charge complète. Ceci fait référence aux entreprises de transport qui prennent en charge des cargaisons complètes. L'article montre en détail les contraintes opérationnelles du problème et est beaucoup axé sur la mise en pratique des solutions que le problème d'optimisation produit. Le modèle déterministe, le modèle déterministe dynamique et le modèle stochastique dynamique sont les principaux modèles montrés dans l'article. Cet article a le grand avantage de résoudre un problème industriel qui comporte plusieurs objectifs à optimiser ainsi que de nombreuses contraintes. De plus, l'article Powell (1986) présente également une formulation stochastique d'un problème d'assignation dynamique. La méthode utilisée pour résoudre le problème est l'algorithme de Frank-Wolf.

Le problème d'optimisation traité dans ce mémoire comporte beaucoup de fonctions

objectifs à optimiser. Plusieurs articles montrent différentes méthodes pour gérer des problèmes multiobjectifs. L'article Sharma et Kumar (2022) présente différentes techniques pour résoudre des problèmes multiobjectifs. La relation de dominance entre les différentes fonctions à optimiser ainsi que l'optimalité de Pareto est montrée dans l'article. L'article se concentre beaucoup sur les heuristiques et comment adapter les heuristiques pour traiter des problèmes multiobjectifs. L'article Özlen (2009) montre un algorithme pour générer les toutes les solutions non dominées.

Pour illustrer des exemples d'applications où des formulations de problèmes avec plusieurs fonctions objectifs sont utilisées, plusieurs articles peuvent être cités. L'article de Sarker *et al.* (2019) présente un modèle d'optimisation avec une fonction multiobjectif pour modéliser la chaîne d'approvisionnement des énergies renouvelables de la biomasse et du bio gaz. Cet article montre une belle application où plusieurs objectifs doivent être soit minimisés ou maximisés. L'article Askary, Milad *et al.* (2024) présente un modèle à fonction multiobjectif pour optimiser la chaîne d'approvisionnement de l'industrie métallurgique. La fonction multiobjectif contient plusieurs objectifs à optimiser. Le coût logistique ainsi que le coût de production sont minimisés dans la fonction objectif. Le score de localisation est maximisé dans la fonction objectif. L'efficacité de la ligne de production est maximisée dans la fonction objectif.

À la connaissance de l'auteur, aucun article ne traite spécifiquement du problème de la répartition des creusets d'électrolyse à la coulée. Bien que plusieurs travaux aient abordé des problèmes liés à la planification des coulées, ceux-ci reposent majoritairement sur des approches heuristiques. L'originalité de ce mémoire réside dans le fait qu'il s'attaque à un

problème industriel réel, complexe et multiobjectif, en proposant une formulation exacte sous la forme d'un problème d'optimisation linéaire en nombres entiers.

2.4 PROCÉDURE PAR ÉVALUATION ET SÉPARATION PROGRESSIVE

Dans cette section, un survol de la procédure par évaluation et séparation progressive est présenté. Cette méthode est utilisée dans tous les solveurs commerciaux, tels que Gurobi Optimization, LLC (2024), FICO Xpress Solver (2025), IBM CPLEX Solver (2025), etc. Cet algorithme est utilisé lorsque certaines variables du problème sont restreintes à des valeurs entières.

L'algorithme par évaluation et séparation progressive permet de résoudre des problèmes de programmation linéaire en nombres entiers. Supposons que x_c représente les variables continues du problème, tandis que x_e représente les variables entières. A_c est la matrice qui représente les coefficients des variables continues dans les contraintes du problème et c_c est le vecteur de profit des variables continues. De la même manière, la matrice A_e et le vecteur c_e représentent la même chose, mais pour les variables entières du problème. Le vecteur b définit le côté droit des inégalités, soit la valeur à respecter pour la contrainte. Le problème à résoudre est le suivant :

$$\max c_c x_c + c_e x_e$$

$$sujet \ à A_c x_c + A_e x_e \leq b$$

$$x_c, x_e \geq 0, x_c \in \mathbb{R}, x_e \in \mathbb{Z}$$

Tout au long de la procédure, l'algorithme maintient une borne inférieure. Dans un

problème de maximisation, la borne inférieure est la meilleure solution entière jusqu'à présent.

L'algorithme débute par résolution de la relaxation linéaire du problème avec la méthode du simplexe qui est présenté dans le livre Hillier et Lieberman (2001). La relaxation linéaire du problème est définie par le problème initial où les contraintes sur les variables entières ont été retirées pour qu'elles puissent prendre des valeurs continues. Si la relaxation linéaire du problème est non-réalisable, l'algorithme se termine et le problème initial est aussi non-réalisable, car ce problème est plus contraint que la relaxation linéaire. À l'opposé, si le problème est réalisable et que toutes les variables initialement contraintes à être entières sont entières également dans la relaxation linéaire, alors la solution est aussi optimale pour le problème initial et l'algorithme se termine. Finalement, si la relaxation linéaire est réalisable, mais qu'une variable qui était initialement censée prendre une valeur entière prend une valeur fractionnaire, un branchement est effectué sur cette variable. Supposons que $x_j \in x_e$ est une telle variable qui prend une valeur fractionnaire $x_j = f$. Deux sous-problèmes sont alors créés avec une nouvelle contrainte dans chaque problème. Le premier sous-problème généré est la relaxation linéaire initiale auquel on a ajouté la contrainte $x_j \leq \lfloor f \rfloor$ tandis que le deuxième sous-problème, la contrainte $x_j \geq \lceil f \rceil$ est ajoutée. Chaque sous-problème est résolu un après l'autre. À cette étape, lorsqu'un des deux sous-problèmes est résolu, trois cas peuvent survenir :

1. Le sous-problème est aussi non-réalisable et l'algorithme arrête de brancher sur ce nœud du problème.
2. Le sous-problème est réalisable et toutes les variables qui étaient contraintes à des valeurs entières prennent effectivement des valeurs entières. Dans ce scénario, si la solution entière trouvée est meilleure que la borne inférieure courante, la borne inférieure

est mise à jour avec la valeur de la fonction objectif. Il n'y a donc plus de branchement sur ce nœud qui se fait par la suite.

3. La relaxation linéaire du sous-problème admet une solution, mais certaines variables entières prennent des valeurs fractionnaires. À ce moment, deux cas doivent être pris en considération. Le premier cas survient lorsque la valeur de la fonction objectif de la relaxation linéaire est inférieure à la meilleure solution entière trouvée jusqu'à présent. Dans ce cas, il n'est pas nécessaire de continuer le branchement sur ce nœud, car, même si une solution entière est trouvée par la suite avec un autre branchement, elle ne sera pas meilleure puisqu'elle est bornée par la valeur de la fonction objectif de la relaxation linéaire courante. À l'opposé, si la valeur de la fonction objectif est supérieure à la borne inférieure, alors on continue le branchement, car il existe encore des chances qu'une solution entière meilleure que celle courante soit trouvée.

Ce processus est répété jusqu'à ce que tous les nœuds soient explorés. L'exemple illustré à la figure 2.3 montre l'algorithme de séparation et évaluation progressive en détail. Le problème d'optimisation initial à résoudre est le suivant :

$$\max z = 2x_1 + 3x_2$$

$$x_1 + x_2 \leq 3$$

$$x_1 + 3x_2 \leq 6$$

$$x_1, x_2 \in \mathbb{Z}_{\geq 0}$$

Dans le premier nœud de l'algorithme, les contraintes d'intégralité ne sont plus présentes

et l'algorithme du simplexe peut être utilisé pour résoudre le problème. Puisque c'est un problème de maximisation, la borne inférieure peut être initialisée à $z_{min} = -\infty$. La solution du problème donne $x_1 = 1,5$, $x_2 = 1,5$ et $z = 7,5$. Les variables x_1 et x_2 prennent toutes les deux des valeurs fractionnaires. Un branchement est fait sur la variable x_1 et deux sous-problèmes sont créés. Un sous-problème dans lequel la contrainte $x_1 \leq 1$ est ajoutée et l'autre la contrainte $x_1 \geq 2$. Le deuxième nœud exploré est celui où la contrainte $x_1 \leq 1$ est ajoutée. La résolution de ce problème avec l'algorithme du simplexe donne la solution : $x_1 = 1$, $x_2 = 1,66$ et $z = 7$. Dans cette solution, la variable x_2 prend une valeur fractionnaire. Un branchement est donc fait sur cette variable et les contraintes $x_2 \leq 1$ et $x_2 \geq 2$ sont ajoutées pour former deux autres sous-problèmes à ce sous-problème. Le sous-problème avec la contrainte $x_2 \leq 1$, qui est représenté par le nœud (3), est d'abord exploré. La résolution de ce problème donne la solution $x_1 = 1$, $x_2 = 1$ et $z = 5$. Cette solution est entière, donc plus aucun branchement est nécessaire pour ce nœud. La borne inférieure pour le problème initial est donc de $z_{min} = 5$. La borne supérieure pour le nœud (2) est de 7, l'autre branche de ce nœud doit donc être explorée, puisque la borne supérieure de ce nœud est plus grande que la borne inférieure globale et il existe encore des chances de trouver meilleure solution entière. La solution du nœud (4) est $x_1 = 0$, $x_2 = 2$ et $z = 6$. Cette solution est entière, donc le branchement n'est plus nécessaire sur ce nœud. La nouvelle borne inférieure globale est donc mise à jour pour prendre une valeur de $z_{min} = 6$. Tous les nœuds la branche $x_1 \leq 1$ du nœud (1) sont explorés. La branche $x_1 \geq 2$ du nœud (1) est donc explorée puisque sa borne supérieure est plus grande à la borne inférieure globale et encore une fois, il existe des chances qu'une solution entière meilleure soit trouvée. La solution du nœud (5) donne $x_1 = 2$, $x_2 = 1$ et $z = 7$. Cette solution est entière et est plus grande que la meilleure solution courante qui est de $z_{min} = 6$. Finalement, la solution

du problème initiale est $x_1 = 2$, $x_2 = 1$ et $z = 7$.

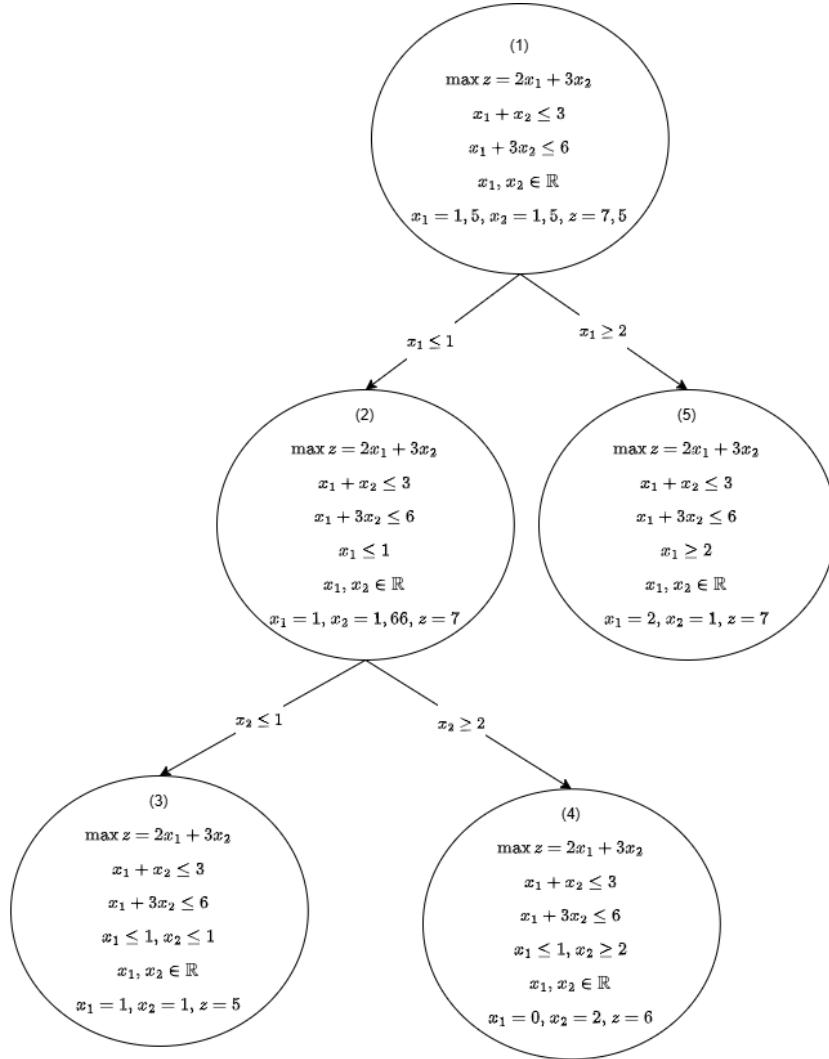


FIGURE 2.3 : Exemple d'un arbre de branchement de l'algorithme de séparation et évaluation progressive

Dans l'article de Klotz et Newman (2013), l'algorithme est expliqué plus en détail, et les grandes lignes directrices pour résoudre des problèmes linéaires en nombres entiers complexes y sont également présentées. La génération de solution de départ, la génération d'inégalité valide dans la relaxation linéaire et la reformulation sont quelques techniques présentées dans l'article pour améliorer la performance de l'algorithme. Dans les livres Hillier et Lieberman

(2001) et Ramteen Sioshansi (2017), l'algorithme de séparation et évaluation progressive est également décrit en détail. Finalement, pour bien modéliser le problème mathématiquement, le livre Williams (2013) offre une multitude d'exemples de modélisation de problèmes industriels. Cette référence permet d'avoir une bonne vue d'ensemble sur les différentes techniques de modélisation d'un problème linéaire en nombres entiers.

CHAPITRE III

MODÈLE D'OPTIMISATION DÉTERMINISTE

Cette section définit le problème d'optimisation déterministe. Les composantes du problème sont présentées dans l'ordre suivant : les ensembles, les paramètres, les variables, les contraintes et la fonction multiobjectif. Ensuite, différentes méthodes sont abordées pour prévenir la non-réalisabilité du problème.

3.1 MODÈLE D'OPTIMISATION

3.1.1 ENSEMBLES

Les ensembles suivants permettent de définir les plages d'indice du modèle d'optimisation et également de regrouper les indices par entité dans le modèle d'optimisation. Ces ensembles sont présentés ci-dessous.

R : Ensemble des tournées de siphonnage

D : Ensemble des demandes de four

P : Ensemble des demandes de transport

T : Ensemble des périodes de temps de duré de 15 minutes dans la période d'optimisation

E : Ensemble des éléments chimiques

3.1.2 PARAMÈTRES

Deux types de paramètres sont présents dans le modèle : les paramètres qui proviennent des systèmes sources et les paramètres modifiables selon les besoins de l'usine.

PARAMÈTRES DES SYSTÈMES SOURCES

Parmi les paramètres qui proviennent des systèmes sources, on trouve les temps de sortie des tournées de siphonnage, les temps de chargement des fours et des transports, les quantités minimales et maximales des fours et des transports, etc. Une particularité de ces paramètres est qu'ils sont sujets à des changements d'une instance à l'autre. Puisque le modèle contient beaucoup de paramètres, les indices sont au bas et les lettres en exposant font partie de la définition du paramètre. L'ensemble de ces paramètres est présenté ci-dessous.

s_i : Temps de siphonnage prédit pour la tournée de siphonnage $i \in \mathbf{R}$.

$s_j^{d_start}$: Période où la demande de four $j \in \mathbf{D}$ débute.

$s_j^{d_end}$: Période où la demande de four $j \in \mathbf{D}$ se termine.

$s_l^{p_start}$: Période où la demande de transport $l \in \mathbf{P}$ débute.

$s_l^{p_end}$: Période où la demande de transport $l \in \mathbf{P}$ se termine.

w_i : Poids en kilogrammes de la tournée de siphonnage $i \in \mathbf{R}$.

$w_j^{d_min}$: Poids minimal de métal en kilogrammes de la demande de four $j \in \mathbf{D}$.

$w_j^{d_max}$: Poids maximal de métal en kilogrammes de la demande de four $j \in \mathbf{D}$.

$w_l^{p_min}$: Poids minimal de métal en kilogrammes de la demande de transport $l \in \mathbf{P}$.

$w_l^{p_max}$: Poids maximal de métal en kilogrammes de la demande de transport $l \in \mathbf{P}$.

$e_{i,k}$: Concentration de l'élément $k \in \mathbf{E}$ en ppm dans la tournée de siphonnage $i \in \mathbf{R}$.

$e_{j,k}^{d_max}$: Concentration maximale de l'élément $k \in \mathbf{E}$ en ppm de la demande de four $j \in \mathbf{D}$.

$e_{l,k}^{p_max}$: Concentration maximale de l'élément $k \in \mathbf{E}$ en ppm de la demande de transport $l \in \mathbf{P}$.

a_i^d : Nombre maximal de périodes que la tournée de siphonnage $i \in \mathbf{R}$ peut attendre pour être assigné à une demande de four quelconque.

a_i^c : Nombre maximal de périodes que la tournée de siphonnage $i \in \mathbf{R}$ peut attendre pour être assigné au carrousel.

a_i^p : Nombre maximal de périodes que la tournée de siphonnage $i \in \mathbf{R}$ peut attendre pour être assignée à un transport quelconque.

PARAMÈTRES MODIFIABLES SELON LES BESOINS

Les paramètres suivants sont déterminés par des experts du domaine. Normalement, ils ne changent pas d'une instance à l'autre, mais il peut arriver qu'ils soient modifiés en raison d'un changement au niveau de l'usine ou d'un changement opérationnel. Des exemples de ce type de paramètre sont le nombre maximal d'assignations d'une tournée de siphonnage ou le poids minimal qui peut être assigné à une demande de four. Un sommaire de ces paramètres est présenté ci-dessous.

p_i : Profit réalisé si la tournée $i \in \mathbf{R}$ est envoyée au carrousel.

τ : Nombre maximal de périodes entre deux assignations pour une tournée de siphonnage de métal à deux demandes de transport différentes.

ω^d : Poids minimal en kilogrammes pour une assignation à une demande de four quelconque.

ω^p : Poids minimal en kilogrammes pour une assignation à une demande de transport quelconque.

ω^c : Poids minimal en kilogrammes pour une assignation au carrousel.

ψ : Nombre de périodes pour transporter une tournée de siphonnage de métal au centre de coulée.

ϕ^d : Nombre de périodes pour verser une tournée de siphonnage de métal dans une demande de four quelconque.

ϕ^c : Nombre de périodes pour verser une tournée de siphonnage de métal au carrousel.

ϕ^p : Nombre de périodes pour verser une tournée de siphonnage de métal dans une demande de transport quelconque.

θ : Nombre maximal d'assignations pour une tournée de siphonnage de métal.

β : Nombre de creusets dans l'usine.

Θ : Nombre de périodes entre deux tournées de siphonnage de métal assignées au carrousel.

Φ : Nombre maximal d'assignations de tournées de siphonnage dans une période.

γ : Période qui détermine si une tournée de siphonnage doit obligatoirement être assignée. Si la tournée de siphonnage a une période de sortie inférieure à γ , elle doit être obligatoirement assignée.

Γ : Période à laquelle des tournées de siphonnage de métal peuvent commencer à être assignées au carrousel.

η : Poids pour minimiser les périodes d'attente des tournées qui sont assignées au carrousel.

ε^{zx} : Poids pour les doubles assignations au transport et au four.

ε^{xy} : Poids pour les doubles assignations au four et au carrousel.

ε^{zy} : Poids pour les doubles assignations au transport et au carrousel.

ρ : Poids pour maximiser la quantité de métal qui est versé dans deux transports rapprochés.

μ : Poids pour les tournées sans assignation.

σ^a : Poids des variables d'écart pour satisfaire les demandes de four.

σ^c : Poids des variables d'écart pour satisfaire les demandes de transport.

3.1.3 VARIABLES

Le problème implique de nombreuses décisions dichotomiques, ce qui explique la présence d'un grand nombre de variables binaires dans le modèle. Une convention courante dans la nomenclature des variables consiste à utiliser la lettre x pour les affectations aux demandes de four, la lettre y pour les affectations au carrousel, et la lettre z pour les affectations aux demandes de transport. Puisqu'il est possible d'utiliser qu'une portion du métal en fusion d'un creuset, une décision sur la quantité de métal assigné doit être prise. Des variables continues sont introduites dans le modèle pour gérer ce type de décision.

VARIABLES BINAIRES

Les trois types de variables suivants sont les principales du problème, ils définissent si une tournée de siphonnage est assignée à l'un des trois endroits suivants : aux fours, au

carrousel ou aux transports.

$$x_{t,i,j} = \begin{cases} 1 & \text{Si à la période } t \in \mathbf{T}, \text{ la tournée de siphonnage de métal} \\ & i \in \mathbf{R} \text{ est assignée à la demande de four } j \in \mathbf{D}, \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

$$y_{t,i} = \begin{cases} 1 & \text{Si à la période } t \in \mathbf{T}, \text{ la tournée de siphonnage de métal} \\ & i \in \mathbf{R} \text{ est assignée au carrousel,} \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

$$z_{t,i,l} = \begin{cases} 1 & \text{Si à la période } t \in \mathbf{T}, \text{ la tournée de siphonnage de métal} \\ & i \in \mathbf{R} \text{ est assignée à la demande de transport } l \in \mathbf{P}, \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

Les trois types de variables suivants représentent les assignations sans prendre en compte

les périodes $t \in \mathbf{T}$.

$$x_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{si la tournée de siphonnage de métal } i \in \mathbf{R} \text{ est assignée} \\ & \text{à la demande de four } j \in \mathbf{D}, \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

$$y_i = \begin{cases} 1 & \text{Si la tournée de siphonnage de métal } i \in \mathbf{R} \text{ est assignée} \\ & \text{au carrousel,} \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

$$z_{i,l} = \begin{cases} 1 & \text{si la tournée de siphonnage de métal } i \in \mathbf{R} \text{ est assignée} \\ & \text{à la demande de transport } l \in \mathbf{P}, \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

Les deux types de variables suivants représentent les assignations sans prendre en compte les périodes $t \in \mathbf{T}$ et la demande spécifique. Autrement dit, ces types de variables indiquent si la tournée de siphonnage est assignée à un four quelconque ou à un transport quelconque.

$$x_i = \begin{cases} 1 & \text{Si la tournée de siphonnage de métal } i \in \mathbf{R} \text{ est assignée} \\ & \text{à une demande de four quelconque,} \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

$$z_i = \begin{cases} 1 & \text{Si la tournée de siphonnage de métal } i \in \mathbf{R} \text{ est assignée} \\ & \text{à une demande de transport,} \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

Les quatre types de variables suivants indiquent si les tournées de siphonnage sont dans un creuset à la période $t \in \mathbf{T}$. Ces variables sont utiles pour respecter le nombre de creusets présents dans l'usine.

$$x_{t,i}^{(c)} = \begin{cases} 1 & \text{Si à la période } t \in \mathbf{T}, \text{ la tournée de siphonnage de métal } i \in \mathbf{R} \\ & \text{est dans un creuset qui est assigné à une demande de four,} \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

$$y_{t,i}^{(c)} = \begin{cases} 1 & \text{Si à la période } t \in \mathbf{T}, \text{ la tournée de siphonnage de métal } i \in \mathbf{R} \\ & \text{est dans un creuset qui est assigné à une demande de four,} \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

$$z_{t,i}^{(c)} = \begin{cases} 1 & \text{Si à la période } t \in \mathbf{T}, \text{ la tournée de siphonnage de métal } i \in \mathbf{R} \\ & \text{est dans un creuset qui est assigné au carrousel,} \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

$$w_{t,i}^{(c)} = \begin{cases} 1 & \text{si à la période } t \in \mathbf{T}, \text{ la tournée de siphonnage de métal } i \in \mathbf{R} \\ & \text{est dans un creuset,} \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

Les trois types variables suivants indiquent si la tournée $i \in \mathbf{R}$ est assigné en double.

$$zx_i = \begin{cases} 1 & \text{Si la tournée de siphonnage de métal } i \in \mathbf{R} \text{ est assignée} \\ & \text{en double à une demande de transport et à une demande de four,} \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

$$xy_i = \begin{cases} 1 & \text{Si la tournée de siphonnage de métal } i \in \mathbf{R} \text{ est assignée} \\ & \text{en double à une demande de four et au carrousel,} \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

$$zy_i = \begin{cases} 1 & \text{Si la tournée de siphonnage de métal } i \in \mathbf{R} \text{ est assignée} \\ & \text{en double à une demande de transport et au carrousel,} \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

Les deux types de variables suivants représentent les doubles assignations avec au moins une assignation au transport.

$$z_{i,l}^{(double)} = \begin{cases} 1 & \text{si la tournée de siphonnage de métal } i \in \mathbf{R} \text{ est assignée doublement} \\ & \text{à une demande de transport, une demande de four et au carrousel,} \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

$$z_{i,l_1,l_2}^{(dt)} = \begin{cases} 1 & \text{si la tournée de siphonnage de métal } i \in \mathbf{R} \text{ est assignée doublement} \\ & \text{à une demande de transport rapproché } l_1 \in \mathbf{P} \text{ et } l_2 \in \mathbf{P}, \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

Le type de variables suivant spécifie si la tournée $i \in \mathbf{R}$ n'est pas affectée.

$$xyz_i = \begin{cases} 1 & \text{si la tournée de siphonnage de métal } i \in \mathbf{R} \text{ n'est pas assigné} \\ & \text{à une demande,} \\ 0 & \text{sinon.} \end{cases}$$

VARIABLES CONTINUES

Les variables a , b et c représentent les quantités de métal assignées en kilogrammes.

Avec les variables x , y et z , elles constituent les principales variables du problème.

$a_{t,i,j}$: Quantité de métal en kilogrammes à la période $t \in \mathbf{T}$ de la tournée de siphonnage $i \in \mathbf{R}$ versé dans le four associé à la demande de four $j \in \mathbf{D}$.

$b_{t,i}$: Quantité de métal en kilogrammes à la période $t \in \mathbf{T}$ de la tournée de siphonnage $i \in \mathbf{R}$ versé au carrousel.

$c_{t,i,l}$: Quantité de métal en kilogrammes à la période $t \in \mathbf{T}$ de la tournée de siphonnage $i \in \mathbf{R}$ versé dans le creuset de transport associé à la demande de transport $l \in \mathbf{P}$.

Les variables suivantes représentent des poids à minimiser ou à maximiser dans la fonction objectif.

$c_{t,l_1,l_2}^{(dt)}$: Quantité de métal en kilogrammes de la tournée $i \in R$ assigné à deux transports rapprochés $l_1 \in \mathbf{P}$ et $l_2 \in \mathbf{P}$.

a_j^{slack} : Variable d'écart pour la demande de four $j \in \mathbf{D}$.

c_l^{slack} : Variable d'écart pour la demande de transport $l \in \mathbf{P}$.

$w_t^{(c)}$: Nombre de creusets pleins dans l'usine à la période $t \in \mathbf{T}$.

3.1.4 CONTRAINTES

Cette sous-section présente les contraintes du problème d'optimisation.

ASSIGNATION DES CREUSETS

Les deux premières contraintes visibles aux équations (3.1) et (3.2) assurent que chaque creuset est assigné au maximum à une demande de four ou au carrousel.

$$\sum_{t \in \mathbf{T}} \sum_{j \in \mathbf{D}} x_{t,i,j} \leq 1, \forall i \in \mathbf{R} \quad (3.1)$$

$$\sum_{t \in \mathbf{T}} y_{t,i} \leq 1, \forall i \in \mathbf{R} \quad (3.2)$$

ASSIGNATIONS MULTIPLES AUX DEMANDES DE TRANSPORT

Puisqu'un creuset de transport a une capacité d'environ douze tonnes métriques et que les demandes de transport sont parfois rapprochées, il arrive qu'une partie du métal du creuset d'électrolyse soit vidée dans un premier creuset de transport et que le reste soit vidé dans le second. C'est pourquoi les contraintes définies par l'équation (3.3) limitent à deux assignations les tournées assignées aux transports. Les contraintes définies par l'équation (3.4) assurent de ne pas permettre deux assignations aux transports dans lesquels les demandes sont trop éloignées dans le temps. En d'autres termes, lorsque l'intervalle temporel séparant le début de la demande de transport $l_2 \in \mathbf{P}$ et la fin de la demande de transport $l_1 \in \mathbf{P}$ est plus grande que le paramètre τ l'assignation pour la tournée $i \in \mathbf{R}$ est limité à une seule des deux demandes.

$$\sum_{t \in \mathbf{T}} \sum_{l \in \mathbf{P}} z_{t,i,l} \leq 2, \forall i \in \mathbf{R} \quad (3.3)$$

$$\sum_{t \in \mathbf{T}} (z_{t,i,l_1} + z_{t,i,l_2}) \leq 1, \forall (l_1, l_2) \in \mathbf{P}^2 \mid s_{l_2}^{p_start} - s_{l_1}^{p_end} > \tau \text{ \& } l_1 < l_2 \quad (3.4)$$

NOMBRE MAXIMAL D'ASSIGNATIONS PAR TOURNÉE

Les contraintes définies par l'équation (3.5) bornent le nombre maximal d'assignations pour une tournée. La borne est paramétrable, car elle peut varier entre 1 et 2 selon le type d'instance à résoudre.

$$\sum_{t \in \mathbf{T}} \left(\sum_{j \in \mathbf{D}} x_{t,i,j} + y_{t,i} + \sum_{l \in \mathbf{P}} z_{t,i,l} \right) \leq \theta, \forall i \in \mathbf{R} \quad (3.5)$$

QUANTITÉS DE MÉTAL COULÉES

Les contraintes définies par les équations (3.6) à (3.8) activent les variables continues qui indiquent la quantité de métal coulée. Ces variables continues sont contraintes par une borne inférieure, correspondant à la quantité minimale assignable soit à une demande de four, soit au carrousel, soit à une demande de transport. De plus, elles sont bornées supérieurement par la quantité de métal de la tournée en question $i \in \mathbf{R}$.

$$\omega^d \cdot x_{t,i,j} \leq a_{t,i,j} \leq w_i \cdot x_{t,i,j}, \forall t \in \mathbf{T}, \forall i \in \mathbf{R}, \forall j \in \mathbf{D} \quad (3.6)$$

$$\omega^c \cdot y_{t,i} \leq b_{t,i} \leq w_i \cdot y_{t,i}, \forall t \in \mathbf{T}, \forall i \in \mathbf{R} \quad (3.7)$$

$$\omega^p \cdot z_{t,i,l} \leq c_{t,i,l} \leq w_i \cdot z_{t,i,l}, \forall t \in \mathbf{T}, \forall i \in \mathbf{R}, \forall l \in \mathbf{P} \quad (3.8)$$

QUANTITÉ TOTALE DE MÉTAL ASSIGNÉ POUR UNE TOURNÉE

Les contraintes définies par l'équation (3.9) assurent que tout le métal d'une tournée soit versé dans n'importe lequel équipement de coulée si la période de temps de siphonnage prédict est inférieure au paramètre γ . Les contraintes définies par l'équation (3.10) ont le même objectif, cependant, les variables binaires xyz_i sont introduites dans l'équation pour éviter d'avoir des instances non-réalisables lorsque les demandes de métal sont inférieures à la sortie du métal de l'électrolyse. Ces variables binaires sont minimisées dans la fonction objectif.

$$\sum_{t \in \mathbf{T}} \left(\sum_{j \in \mathbf{D}} a_{t,i,j} + b_{t,i} + \sum_{l \in \mathbf{P}} c_{t,i,l} \right) = w_i, \forall i \in \mathbf{R} \mid s_i < \gamma \quad (3.9)$$

$$\sum_{t \in \mathbf{T}} \left(\sum_{j \in \mathbf{D}} a_{t,i,j} + b_{t,i} + \sum_{l \in \mathbf{P}} c_{t,i,l} \right) = w_i(1 - xyz_i), \forall i \in \mathbf{R} \mid s_i > \gamma \quad (3.10)$$

QUANTITÉ TOTALE DES DEMANDES DE MÉTAL

Les contraintes définies par l'équation (3.11) assurent que la quantité de métal d'une demande de four soit bornée entre la quantité minimale et maximale demandée. Les contraintes montrées à l'équation (3.12) ont le même but cependant, elles sont désignées pour le transport. Les variables d'écart a_j^{slack} et c_l^{slack} sont ajoutées dans les deux équations pour éviter d'avoir des instances non-réalisables lorsque la sortie du métal à l'électrolyse est inférieure à la demande de métal au centre de coulée.

$$w_j^{d_min} - a_j^{slack} \leq \sum_{t \in \mathbf{T}} \sum_{i \in \mathbf{R}} a_{t,i,j} \leq w_j^{d_max}, \forall j \in \mathbf{D} \quad (3.11)$$

$$w_l^{p_min} - c_l^{slack} \leq \sum_{t \in \mathbf{T}} \sum_{i \in \mathbf{R}} c_{t,i,l} \leq w_l^{p_max}, \forall l \in \mathbf{P} \quad (3.12)$$

CONCENTRATION CHIMIQUE DES DEMANDES DE MÉTAL

Les équations (3.13) et (3.14) garantissent le respect des spécifications chimiques des fournées et des transports. Plus précisément, la moyenne en ppm de chaque élément chimique $k \in \mathbf{E}$ pondérée par le poids des tournées ne doit pas dépasser la limite $e_{j,k}^{d_max}$ de la fournée $j \in \mathbf{D}$. Le même raisonnement s'applique pour les demandes de transport.

$$\sum_{i \in \mathbf{R}} \sum_{t \in \mathbf{T}} e_{i,k}^t a_{t,i,j} \leq \sum_{i \in \mathbf{R}} \sum_{t \in \mathbf{T}} e_{j,k}^{d_max} a_{t,i,j}, \forall j \in \mathbf{D}, \forall k \in \mathbf{E} \quad (3.13)$$

$$\sum_{i \in \mathbf{R}} \sum_{t \in \mathbf{T}} e_{i,k}^t c_{t,i,l} \leq \sum_{i \in \mathbf{R}} \sum_{t \in \mathbf{T}} e_{l,k}^{p_max} c_{t,i,l}, \forall l \in \mathbf{P}, \forall k \in \mathbf{E} \quad (3.14)$$

PÉRIODE D'ASSIGNATION POUR LES DEMANDES DE MÉTAL

Les assignations aux demandes de four et aux demandes de transport doivent être effectuées dans l'intervalle de temps défini préalablement. Autrement dit, les contraintes montrées par les équations (3.15) et (3.16) assurent que les périodes d'assignation doit être entre les périodes de début et de fin des demandes. Sinon, l'assignation est impossible.

$$x_{t,i,j} = 0, \forall t \in \mathbf{T}, \forall i \in \mathbf{R}, \forall j \in \mathbf{D} | t < s_j^{d_start} \vee t \geq s_j^{d_end} \quad (3.15)$$

$$z_{t,i,l} = 0, \forall t \in \mathbf{T}, \forall i \in \mathbf{R}, \forall l \in \mathbf{P} | t < s_l^{p_start} \vee t \geq s_l^{p_end} \quad (3.16)$$

PÉRIODE D'ASSIGNATION POUR LES TOURNÉES DE SIPHONNAGE

Une tournée ne peut pas être assignée si elle n'est pas siphonnée et disponible au centre de coulée. Les variables d'assignation sont donc initialisées à zéro lorsque le temps $t \in \mathbf{T}$ des variables d'assignments est inférieur au temps de sortie s_i^t de la tournée $i \in \mathbf{R}$ additionné au temps pour transporter le creuset au centre de coulée ψ . Un temps d'attente maximal est imposé aux tournées, sinon le métal à l'intérieur des creusets pourrait se solidifier et engendrer une perte importante. Les temps d'attente sont différents selon le lieu d'assignation de la tournée. Les contraintes définies par les équations (3.17) à (3.19) assurent le respect de ces conditions.

$$x_{t,i,j} = 0, \forall t \in \mathbf{T} \mid t \leq s_i^t + \psi \vee t > a_i^d, \forall i \in \mathbf{R}, \forall j \in \mathbf{D} \quad (3.17)$$

$$y_{t,i} = 0, \forall t \in \mathbf{T} \mid t \leq s_i^t + \psi \vee t > a_i^c, \forall i \in \mathbf{R} \quad (3.18)$$

$$z_{t,i,l} = 0, \forall t \in \mathbf{T} \mid t \leq s_i^t + \psi \vee t > a_i^p, \forall i \in \mathbf{R}, \forall l \in \mathbf{P} \quad (3.19)$$

ASSIGNATION AU CARROUSEL

Les contraintes définies par l'équation (3.20) assurent qu'aucune assignation au carrousel ne soit permise lorsqu'il y a déjà des creusets d'assignés au début de la période d'optimisation. D'autre part, le carrousel a une capacité de couler qui est paramétrable. Normalement, le temps pour couler une tournée sur le carrousel est d'environ 30 minutes. Les contraintes définies par l'équation (3.21) permettent de limiter le nombre d'assignments au carrousel.

$$\sum_{\tau \in [t, t+\Theta]} \sum_{i \in \mathbf{R}} y_{\tau,i} \leq 0, \forall t \in \mathbf{T} \mid t < \Gamma \quad (3.20)$$

$$\sum_{\tau \in [t, t+\Theta]} \sum_{i \in \mathbf{R}} y_{\tau, i} \leq 1, \forall t \in \mathbf{T} \mid t \geq \Gamma \quad (3.21)$$

CAPACITÉ DU CENTRE DE COULÉE

Les contraintes définies par les équations (3.22) à (3.24) permettent de prendre en considération la capacité d'assignation du centre de coulée. Pour toutes les périodes de temps, le nombre d'assignations ne peut pas dépasser le paramètre Φ . Ce paramètre indique le nombre d'assignations maximales par période pour les trois types d'assignations.

$$\sum_{i \in \mathbf{R}} \sum_{j \in \mathbf{D}} x_{t, i, j} \leq \Phi, \forall t \in \mathbf{T} \quad (3.22)$$

$$\sum_{i \in \mathbf{R}} y_{t, i} \leq \Phi, \forall t \in \mathbf{T} \quad (3.23)$$

$$\sum_{i \in \mathbf{R}} \sum_{l \in \mathbf{P}} z_{t, i, l} \leq \Phi, \forall t \in \mathbf{T} \quad (3.24)$$

DIFFÉRENTE PÉRIODE POUR LES ASSIGNATIONS MULTIPLES

Lorsqu'une tournée est assignée à deux endroits différents, il ne faut pas que les deux assignations soient assignées à la même période de temps, car il faut compter un certain temps avant de faire la deuxième assignation. Les contraintes définies par l'équation (3.25) limitent à une assignation toutes les tournées de siphonnage à chaque période de temps.

$$\sum_{j \in \mathbf{D}} x_{t, i, j} + y_{t, i} + \sum_{l \in \mathbf{P}} z_{t, i, l} \leq 1, \forall t \in \mathbf{T}, \forall i \in \mathbf{R} \quad (3.25)$$

ACTIVATION DES VARIABLES COMPACTES

Les contraintes définies par l'équation (3.26) permettent d'activer les variables d'assignation $x_{i,j}$ pour déterminer si une tournée est assignée à une demande de four particulière. Dans le même ordre d'idée, les contraintes définies par l'équation (3.27) activent les variables d'assignation $z_{i,l}$ dans le but de déterminer si la tournée $i \in \mathbf{R}$ est assignée à une demande de transport particulière. Les variables d'assignation x_i dans les contraintes définies par l'équation (3.28) permettent de déterminer si la tournée $i \in \mathbf{R}$ est assignée à une demande de four quelconque. Les contraintes définies par l'équation (3.29) permettent d'activer les variables d'assignation y_i pour savoir si la tournée $i \in \mathbf{R}$ est assignée au carrousel. Les contraintes définies par l'équation (3.30) activent les variables d'assignation z_i pour déterminer si la tournée $i \in \mathbf{R}$ est assignée à un transport quelconque.

$$x_{i,j} = \sum_{t \in \mathbf{T}} x_{t,i,j}, \forall i \in \mathbf{R}, \forall j \in D \quad (3.26)$$

$$\sum_{t \in \mathbf{T}} z_{t,i,l} \leq 2z_{i,l}, \forall i \in \mathbf{R}, \forall l \in \mathbf{P} \quad (3.27)$$

$$x_i = \sum_{j \in \mathbf{D}} x_{i,j}, \forall i \in \mathbf{R} \quad (3.28)$$

$$y_i = \sum_{t \in \mathbf{T}} y_{t,i}, \forall i \in \mathbf{R} \quad (3.29)$$

$$\sum_{t \in \mathbf{T}} \sum_{l \in \mathbf{P}} z_{t,i,l} \leq 2z_i, \forall i \in \mathbf{R} \quad (3.30)$$

ACTIVATION DES VARIABLES DE DOUBLES ASSIGNATIONS

Les contraintes définies par les équations (3.31) à (3.33) permettent d'activer les variables de double assignation zx_i , xy_i et zy_i . Par exemple, lorsqu'une certaine tournée est assignée en

double au transport et ensuite au carrousel, la variable d'assignation zy_i va être activée.

$$z_i + x_i \leq 1 + zx_i, \forall i \in \mathbf{R} \quad (3.31)$$

$$x_i + y_i \leq 1 + xy_i, \forall i \in \mathbf{R} \quad (3.32)$$

$$z_i + y_i \leq 1 + zy_i, \forall i \in \mathbf{R} \quad (3.33)$$

Les contraintes définies par l'équation (3.34) activent les variables $z_{i,l}^{(double)}$ qui permettent de savoir si une tournée $i \in \mathbf{R}$ est assignée en double à une demande de transport $l \in \mathbf{P}$ et à soit une demande de four quelconque ou au carrousel. Ensuite, les contraintes définies par l'équation (3.35) permettent de limiter le nombre de doubles assignations pour une même demande de transport $l \in \mathbf{P}$.

$$z_{i,l} + y_i + x_i \leq 1 + z_{i,l}^{(double)}, \forall i \in \mathbf{R}, \forall l \in \mathbf{P} \quad (3.34)$$

$$\sum_{i \in \mathbf{R}} z_{i,l}^{(double)} \leq 1, \forall l \in \mathbf{P} \quad (3.35)$$

Les contraintes définies par l'équation (3.36) activent les variables $xy_{i,j}$ qui permettent de déterminer si une tournée $i \in \mathbf{R}$ est assignée à une demande de four $j \in \mathbf{D}$ et au carrousel. Ensuite, les contraintes définies par l'équation (3.37) permettent de limiter le nombre de doubles assignations pour une même demande de four $j \in \mathbf{D}$.

$$x_{i,j} + y_i \leq 1 + xy_{i,j}, \forall i \in \mathbf{R}, \forall j \in \mathbf{D} \quad (3.36)$$

$$\sum_{i \in \mathbf{R}} xy_{i,j} \leq 1, \forall j \in \mathbf{D} \quad (3.37)$$

PRÉSÉANCE DES DOUBLES ASSIGNATIONS

Les contraintes définies par l'équation (3.38) assurent que la première assignation soit assignée au transport et la deuxième assignation soit assignée au carrousel lorsqu'une tournée est doublement assignée à une demande de transport et au carrousel. De manière analogue, lorsqu'une tournée est doublement assignée à une demande de transport et une demande de four, la première moitié est assignée au transport et ensuite la deuxième moitié est assignée au four. Les contraintes définies par l'équation (3.39) assurent ce genre de comportement.

$$y_{t,i} \leq \sum_{\tau \in [0,t-1]} \sum_{l \in \mathbf{P}} z_{\tau,i,l} + 1 - z_i, \forall t \in \mathbf{T}, \forall i \in \mathbf{R} \quad (3.38)$$

$$\sum_{j \in \mathbf{D}} x_{t,i,j} \leq \sum_{\tau \in [0,t-1]} \sum_{l \in \mathbf{P}} z_{\tau,i,l} + 1 - z_i, \forall t \in \mathbf{T}, \forall i \in \mathbf{R} \quad (3.39)$$

NOMBRE DE CREUSETS DANS L'USINE

Les contraintes définies par les équations (3.40) à (3.50) servent à respecter le nombre de creusets présents dans l'usine. Premièrement, les contraintes définies par les équations (3.40) à (3.42) permettent d'activer les variables $x_{t,i}^{(c)}$, $y_{t,i}^{(c)}$ et $z_{t,i}^{(c)}$ qui indiquent si la tournée $i \in \mathbf{R}$ est déjà siphonnée dans un creuset et qu'elle est assignée aux fours, au carrousel ou aux transports.

$$\sum_{j \in \mathbf{D}} x_{t,i,j} \leq x_{t,i}^{(c)}, \forall i \in \mathbf{R}, \forall t \in [s_i, Card(\mathbf{T})] \quad (3.40)$$

$$y_{t,i} \leq y_{t,i}^{(c)}, \forall i \in \mathbf{R}, t \in [s_i, Card(\mathbf{T})] \quad (3.41)$$

$$\sum_{l \in \mathbf{P}} z_{t,i,l} \leq z_{t,i}^{(c)}, \forall i \in \mathbf{R}, \forall t \in [s_i, Card(\mathbf{T})] \quad (3.42)$$

Les contraintes définies par les équations (3.43) à (3.45) permettent de mettre à 1 les variables $x_{t,i}^{(c)}$, $y_{t,i}^{(c)}$ et $z_{t,i}^{(c)}$ lorsque la tournée de siphonnage a été assignée.

$$x_{t+1,i}^{(c)} \leq x_{t,i}^{(c)}, \forall i \in \mathbf{R}, t \in [s_i, Card(\mathbf{T}) - 1] \quad (3.43)$$

$$y_{t+1,i}^{(c)} \leq y_{t,i}^{(c)}, \forall i \in \mathbf{R}, t \in [s_i, Card(\mathbf{T}) - 1] \quad (3.44)$$

$$z_{t+1,i}^{(c)} \leq z_{t,i}^{(c)}, \forall i \in \mathbf{R}, t \in [s_i, Card(\mathbf{T}) - 1] \quad (3.45)$$

Les contraintes définies par les équations (3.46) à (3.48) permettent d'activer les variables $w_{t,i}^{(c)}$ qui représentent si une tournée $i \in \mathbf{R}$ est déjà siphonnée dans un creuset. Finalement, les contraintes définies par les équations (3.49) et (3.50) permettent de compter le nombre de creusets pleins dans l'usine et de limiter le nombre de creusets à β qui représente le nombre de creusets disponibles dans l'usine.

$$x_{t,i}^{(c)} \leq \theta w_{t,i}^{(c)}, \forall t \in \mathbf{T}, \forall i \in \mathbf{R} \quad (3.46)$$

$$y_{t,i}^{(c)} \leq \theta w_{t,i}^{(c)}, \forall t \in \mathbf{T}, \forall i \in \mathbf{R} \quad (3.47)$$

$$z_{t,i}^{(c)} \leq \theta w_{t,i}^{(c)}, \forall t \in \mathbf{T}, \forall i \in \mathbf{R} \quad (3.48)$$

$$w_t^{(c)} = \sum_{i \in \mathbf{R}} w_{t,i}^{(c)}, \forall t \in \mathbf{T} \quad (3.49)$$

$$w_t^{(c)} \leq \beta, \forall t \in \mathbf{T} \quad (3.50)$$

MAXIMISATION DES DOUBLES ASSIGNATIONS AU TRANSPORT

Les contraintes définies par les équations (3.51) à (3.54) permettent de maximiser les doubles assignations aux transports qui sont planifiées environ dans le même intervalle de

temps. Plus précisément, les contraintes définies par l'équation (3.51) permettent d'activer les variables $z_{i,l_1,l_2}^{(dt)}$ qui indiquent si une tournée est doublement assignée à deux demandes de transport $l_1 \in P$ et $l_2 \in \mathbf{P}$. Les contraintes définies par les équations (3.52) et (3.53) assurent que les variables $z_{i,l_1,l_2}^{(dt)}$ ne soit pas activées lorsque les tournées ne sont pas assignées aux transports $l_1 \in \mathbf{P}$ et $l_2 \in \mathbf{P}$. Finalement, les contraintes définies par l'équation (3.54) permettent de mettre une limite sur les variables $c_{i,l_1,l_2}^{(dt)}$ qui sont maximisées dans la fonction objectif.

$$\sum_{t \in \mathbf{T}} z_{t,i,l_1} + \sum_{t \in \mathbf{T}} z_{t,i,l_2} \leq 1 + z_{i,l_1,l_2}^{(dt)}, \forall i \in \mathbf{R}, \forall (l_1, l_2) \in \mathbf{P}^2 \mid l_1 < l_2 \text{ \& } s_{l_2}^{p_start} - s_{l_1}^{p_end} \leq \tau \quad (3.51)$$

$$z_{i,l_1,l_2}^{(dt)} \leq \sum_{t \in \mathbf{T}} z_{t,i,l_1}, \forall i \in \mathbf{R}, \forall (l_1, l_2) \in \mathbf{P}^2 \mid l_1 < l_2 \text{ \& } s_{l_2}^{p_start} - s_{l_1}^{p_end} \leq \tau \quad (3.52)$$

$$z_{i,l_1,l_2}^{(dt)} \leq \sum_{t \in \mathbf{T}} z_{t,i,l_2}, \forall i \in \mathbf{R}, \forall (l_1, l_2) \in \mathbf{P}^2 \mid l_1 < l_2 \text{ \& } s_{l_2}^{p_start} - s_{l_1}^{p_end} \leq \tau \quad (3.53)$$

$$c_{i,l_1,l_2}^{(dt)} \leq w_i z_{i,l_1,l_2}^{(dt)}, \forall i \in \mathbf{R}, \forall (l_1, l_2) \in \mathbf{P}^2 \mid l_1 < l_2 \text{ \& } s_{l_2}^{p_start} - s_{l_1}^{p_end} \leq \tau \quad (3.54)$$

Les contraintes définies par l'équation (3.55) permettent d'avoir seulement une assignation double par deux transports rapprochés.

$$\sum_{i \in \mathbf{R}} z_{i,l_1,l_2}^{(dt)} \leq 1, \forall (l_1, l_2) \in \mathbf{P}^2 \mid l_1 < l_2 \text{ \& } s_{l_2}^{p_start} - s_{l_1}^{p_end} \leq \tau \quad (3.55)$$

3.1.5 FONCTION MULTIOBJECTIF

Le problème comporte plusieurs objectifs à prendre en compte. Une fonction multiobjectif est construite avec des paramètres ajustés en fonction des besoins opérationnels. Cette fonction multiobjectif est constituée de la somme des équations (3.56) à (3.63). Le premier objectif est de maximiser la qualité des creusets envoyés au carrousel. L'équation suivante est ajoutée dans la fonction objectif :

$$\sum_{t \in \mathbf{T}} \sum_{i \in \mathbf{R}} p_i y_{t,i} \quad (3.56)$$

Le deuxième objectif est de minimiser le temps d'attente des creusets assignés au carrousel. L'équation (3.57) a pour but de minimiser le nombre de périodes que la tournée reste non assignée. Ce terme est donc soustrait dans la fonction objectif :

$$-\sum_{t \in \mathbf{T}} \sum_{i \in \mathbf{R}} \eta(t - s_i^t) y_{t,i} \quad (3.57)$$

Le troisième objectif est de minimiser le nombre de creusets pleins à chaque période de temps dans l'usine. La fonction objectif minimise la somme du nombre de creusets pleins à chaque période de temps, représentée par l'équation (3.58) :

$$-\sum_{t \in \mathbf{T}} w_t^{(c)} \quad (3.58)$$

Le quatrième objectif représenté par l'équation (3.59) est de minimiser les doubles assignations à des destinations différentes. C'est-à-dire minimiser le nombre de doubles assignations dont une première assignation a été faite à une demande de transport et la seconde à une demande de four, ou qu'une première assignation est faite à une demande de four et l'autre au carrousel, ou qu'une première assignation est faite à une demande de transport tandis que l'autre est faite au carrousel.

$$-\sum_{i \in \mathbf{R}} \epsilon^{zx} zx_i + \epsilon^{xy} xy_i + \epsilon^{zy} zy_i \quad (3.59)$$

Le cinquième objectif qui est représenté par l'équation (3.60) maximise les doubles assignations pour deux demandes de transports rapprochés. Autrement dit, les demandes de transport pour lesquelles la différence entre le début du chargement de la deuxième demande

de transport $s_{l_2}^{p_start}$ et la fin du chargement de la première demande de transport $s_{l_1}^{p_end}$ est inférieure au paramètre τ qui représente un nombre de périodes limite à ne pas dépasser. On maximise donc la quantité de métal $c_{t,l_1,l_2}^{(dt)}$ qui est assignée.

$$\sum_{i \in \mathbf{R}} \sum_{l_1 \in \mathbf{P}} \sum_{l_2 \in \mathbf{P} | l_1 < l_2 \text{ & } s_{l_2}^{p_start} - s_{l_1}^{p_end} \leq \tau} \rho c_{t,l_1,l_2}^{(dt)} \quad (3.60)$$

Le sixième objectif qui est représenté par l'équation (3.61) minimise les tournées sans assignations. Une plus grande pénalité est accordée aux tournées de siphonnage qui sont planifiées plus tôt dans le quart de travail. Le terme $(T - s_i^t)$ permet d'avoir ce genre de comportement qui prend une plus grande valeur lorsque la période de siphonnage s_i^t est plus petite et une plus petite valeur lorsque la période de siphonnage s_i^t est plus grande.

$$- \sum_{i \in \mathbf{R}} \mu (T - s_i) xyz_i \quad (3.61)$$

Le septième objectif qui est représenté par l'équation (3.62) minimise les écarts entre les quantités de métal assignées aux demandes de four et les quantités minimales requises pour les demandes de four. La variable a_j^{slack} prend la valeur de la quantité de métal qui est nécessaire pour satisfaire la demande de four lorsque la quantité de métal qui sort de l'électrolyse n'est pas suffisante.

$$- \sum_{j \in \mathbf{D}} \sigma^a a_j^{slack} \quad (3.62)$$

Le huitième objectif qui est représenté par l'équation (3.63) est similaire au septième objectif. Cependant, il est présent pour les transports.

$$- \sum_{l \in \mathbf{P}} \sigma^c c_l^{slack} \quad (3.63)$$

3.2 NON-RÉALISABILITÉ DES INSTANCES

Dans cette section, on discute des méthodes pour éviter que certaines instances du problème soient non-réalisables. Lorsque la capacité de coulée n'est pas assez grande pour l'offre de métal, l'instance du modèle peut devenir non-réalisable et une décision doit être prise. En d'autres mots, la quantité de métal qui sort du centre d'électrolyse est supérieure à la quantité de métal qui peut être coulée. Avant de lancer l'optimisation, le problème est résolu sans la fonction multiobjectif pour vérifier si l'instance est réalisable. Si l'instance du problème est non-réalisable, une salle de cuve est mise à l'arrêt pendant une période de temps. Autrement dit, les temps de siphonnage prédit $s_i^t, \forall i \in \mathbf{R}$ pour la salle de cuve choisie sont retardés d'une certaine durée. Le problème est résolu à nouveau sans la fonction multiobjectif. Si cette fois, le problème est réalisable, l'algorithme se termine et renvoie l'instance du problème avec les données modifiées. Si le problème n'est toujours pas réalisable, une autre salle de cuve est mise à l'arrêt et le processus continu jusqu'à ce que le problème devienne réalisable ou que les trois salles de cuve soient à l'arrêt. L'algorithme 3.1 est détaillé ci-dessous.

Données : tous les paramètres du modèle d'optimisation, d : Durée à ajouter

Résultat : s_i^t

```
1 tant que Reste une salle de cuve à mettre à l'arrêt faire
2   Résoudre le problème avec tous les éq. de (3.1) à (3.55) sans la fonction
      multi-objectif;
3   si le problème est réalisable alors
4     stop;
5   sinon
6     pour  $i \in \mathbf{R}$  faire
7        $s_i^t = s_i^t + d;$ 
8     fin
9   fin
10 fin
```

Algorithme 3.1 : Algorithme pour traiter la non réalisabilité du problème d'optimisation

3.2.1 VALIDER LES CONTRAINTES DE TEMPS POUR LES DEMANDES DE FOUR ET DE TRANSPORT

Un algorithme pour vérifier les contraintes de temps des demandes est établi. En début de quart, il se peut que l'utilisateur ne donne pas assez de temps pour remplir une demande. Juste avant de lancer l'optimisation, une vérification est faite pour s'assurer que la période de temps est suffisante pour remplir la quantité de métal requise. La procédure commence par classer les tournées de siphonnage de métal en ordre de temps de sortie prédict. Ensuite, une moyenne de poids sur l'ensemble des tournées de siphonnage est calculée. Cette moyenne est utilisée pour calculer un nombre approximatif de tournées pour remplir chacune des demandes

de four. Ensuite, pour chaque demande de four, une itération sur les tournées de siphonnage en ordre est faite et, lorsque le temps de sortie de la tournée est supérieur ou égal au début de la période de la demande, un compteur est incrémenté. Ceci signifie que la tournée peut être assignée à la demande, si seulement les contraintes de temps sont prises en considération. Une variable est créée pour représenter la nouvelle période de fin de la demande s'il est nécessaire de la modifier. Ensuite, cette variable qui représente la période de fin de la demande est modifiée si le temps de sortie additionné au temps pour apporter la tournée au centre de coulée est supérieur à la période de fin de la demande. Le détail est montré dans l'algorithme 3.2.

Données : $s_i \forall i \in \mathbf{R}$, $w_i \forall i \in \mathbf{R}$, $s_j^{d_start} j \in \mathbf{D}$, $s_j^{d_end} \in \mathbf{D} j \in \mathbf{D}$, $w_j^{d_min} \in \mathbf{D} j \in \mathbf{D}$, $w_j^{d_max} \in \mathbf{D} j \in \mathbf{D}$, ϕ^d , ψ

Résultat : $s_j^{d_start} j \in \mathbf{D}$, $s_j^{d_end} j \in \mathbf{D}$

```

1  $m \leftarrow$  Calculer la moyenne des poids des tournées de siphonnage;
2 Trier les tournées de siphonnage par ordre croissant de période de sortie;
3 Trier les demandes de four par ordre croissant de période de début et de fin;
4  $k \leftarrow 0$ ;
5 pour  $j \in \mathbf{D}$  faire
6    $p \leftarrow \lceil \frac{w_j^{d\_min}}{m} \rceil$ ;
7    $q_{end}, i \leftarrow -1, 0$ ;
8   pour  $i \in \mathbf{R}$  faire
9     si  $s_i \geq s_j^{d\_start}$  &  $s_j^{d\_end} < s_i + \psi + \phi^d$  alors
10       $q_{end} \leftarrow s_i + \psi + \phi^d$ ;
11      fin
12      si  $a_i^d \geq s_j^{d\_start}$  alors
13         $i \leftarrow i + 1$ ;
14      fin
15       $k \leftarrow k + 1$ ;
16      si  $i \geq p$  alors
17         $stop$ ;
18      fin
19    fin
20    si  $q_{end} \neq -1$  &  $q_{end} > s_j^{d\_end}$  alors
21       $s_j^{d\_end} \leftarrow q_{end}$ ;
22    fin
23 fin

```

Algorithme 3.2 : Non-réalisabilité due aux contraintes de temps sur les demandes

CHAPITRE IV

MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre présente d'abord comment les données ont été collectées pour la section sur les résultats présentés au chapitre 5. Ensuite, cette section présente comment le système de décision en temps réel est développé.

4.1 COLLECTE DES DONNÉES

Les données sont collectées pendant 7 jours à différents moments de la journée. Les données peuvent être collectées tant en début de quart de travail qu'en plein milieu du quart de travail. Ceci permet de voir comment le modèle d'optimisation réagit avec des données différentes de celles en début de quart de travail. De plus, ceci permet de voir la performance du modèle d'optimisation dans ces différentes situations.

4.2 SYSTÈME TEMPS RÉEL

Un système de prise de décision est construit autour du modèle d'optimisation. Étant donné les nombreuses incertitudes dans les données et les variations possibles de l'offre et de la demande au cours de la période d'optimisation, un système de décision en temps réel a été développé pour permettre de lancer de nouvelles optimisations au cours du quart de travail. Ce système intègre les modifications des données en temps réel. Par exemple, le moment de sortie des tournées de siphonnage peut évoluer durant le quart. Si, au début du quart, les opérateurs responsables du siphonnage ne parviennent pas à respecter la planification préétablie, un

algorithme est conçu pour recalculer et réorganiser les horaires des tournées de siphonnage.

Un autre exemple de modification des données en temps réel concerne les fournées, qui peuvent voir leur période de chargement, la quantité de métal à recevoir ou leurs contraintes chimiques modifiées. Une situation similaire peut également survenir avec les demandes de transport. Dans ces cas, une nouvelle optimisation doit être recalculée en cours de quart de travail. Lorsque cela se produit, les tournées de siphonnage déjà assignées à une demande de four, de transport ou au carrousel doivent être prises en compte. Les quantités minimales et maximales, ainsi que les taux de fer et de silicium, doivent être recalculées en fonction des assignations déjà effectuées dans le passé.

De plus, si plusieurs creusets sont déjà affectés au carrousel au moment où l'optimisation est lancée, le temps d'attente au carrousel avant de pouvoir assigner des tournées de siphonnage doit être pris en compte dans le modèle d'optimisation. Par exemple, si trois tournées de siphonnage sont assignées au carrousel et que chaque tournée nécessite environ 30 minutes pour être vidée, la prochaine affectation au carrousel ne peut pas être effectuée avant 1h30.

4.2.1 CALCUL DES CHIMIES RÉSULTANTES

La chimie de chaque demande doit être recalculée en fonction des tournées qui y sont déjà assignées. Les formules théoriques (4.1) et (4.2) sont développées pour calculer la concentration maximale d'une demande de four. Dans les deux équations théoriques, \mathbf{R}_j représente toutes les tournées qui sont assignées à la demande de four spécifique $j \in \mathbf{D}$. De plus, le terme $\forall k \in \mathbf{E}$ indique que cette formule est calculée pour tous les éléments pris en compte dans le modèle d'optimisation.

$$\sum_{i \in \mathbf{R}_j} e_{i,k} \left(\frac{w_i}{w_j^{d_min}} \right) + x \left(\frac{w_j^{d_min} - \sum_{i \in \mathbf{R}_j} w_i}{w_j^{d_min}} \right) = e_{j,k}^{d_max}, \forall j \in \mathbf{D}, \forall k \in \mathbf{E} \quad (4.1)$$

$$x = \left(\frac{w_j^{d_min}}{w_j^{d_min} - \sum_{i \in \mathbf{R}_j} w_i} \right) \left(e_{j,k}^{d_max} - \sum_{i \in \mathbf{R}_j} e_{i,k} \left(\frac{w_i}{w_j^{d_min}} \right) \right), \forall j \in \mathbf{D}, \forall k \in \mathbf{E} \quad (4.2)$$

Un exemple est montré pour illustrer le calcul. Supposons que les tournées montrées dans le tableau 4.1 sont assignées à la demande de four représenté dans le tableau 4.2. La formule (4.3) permet de calculer la concentration maximale en fer résultante que la demande de four peut accepter.

$$0,0795 \left(\frac{12370}{65000} \right) + 0,0806 \left(\frac{12180}{65000} \right) + 0,0574 \left(\frac{13042}{65000} \right) + x \left(\frac{27408}{65000} \right) = 0,08 \quad (4.3)$$

En isolant le x dans la formule (4.3), la concentration maximale en fer que le reste de la fournée peut accepter est obtenue. En d'autres mots, la quantité restante de 27 408 kg doit avoir une concentration maximale de 0,0907% en fer. Les calculs sont montrés dans l'équation (4.4). Le même calcul doit être fait pour le silicium et la concentration maximale est de 0,0701%.

$$x = \left(\frac{65000}{27408} \right) \left[0,08 - 0,0795 \left(\frac{12370}{65000} \right) - 0,0806 \left(\frac{12180}{65000} \right) - 0,0574 \left(\frac{13042}{65000} \right) \right] = 0,0907 \quad (4.4)$$

TABLEAU 4.1 : Tournées de siphonnage déjà assigné à la demande de four

No. Tournée	Heure de siphonnage	Poids à siphonner (kg)	Fe (%)	Si (%)	Profit
1	7h00	12 370	0,0795	0,0399	30
2	7h30	12 180	0,0806	0,0403	30
3	8h00	13 042	0,0574	0,0263	50

TABLEAU 4.2 : Planification des demandes de four

No. Four	Heure début	Heure fin	Quantité min.	Quantité max.	Fe (%)	Si (%)
1	8h00	10h00	65 000	75 000	0,0800	0,0500

Ce calcul est fait pour chaque demande de four et de transport avant chaque optimisation.

Dans la section sur les résultats, les concentrations chimiques des demandes sont recalculées en fonction des tournées qui sont déjà assignées à la demande. C'est pour cette raison que parfois des demandes ont des quantités minimales et maximales qui varient grandement tant au niveau des quantités de métal que des concentrations maximales de chaque élément.

4.2.2 CALCUL DU PARAMÈTRE Γ

Pour calculer la période à laquelle des tournées de siphonnage de métal peuvent commencer à être assignées au carrousel, le calcul suivant est fait. Le nombre de tournées déjà assigné au carrousel est obtenu à partir d'un système source. Ensuite, ce nombre est multiplié par le nombre de périodes nécessaires pour verser une tournée de siphonnage au carrousel.

CHAPITRE V

RÉSULTATS

Dans cette section, les résultats des instances de problèmes à différents moments dans le temps sont présentés. Tout d'abord, sept instances complètes sont présentées pour bien illustrer la complexité du problème et toutes les contraintes que le problème peut contenir. Dans les sept instances du problème, les alliages liés aux profits sont constants et sont présentés dans le tableau 5.1.

TABLEAU 5.1 : Profit tournée de siphonnage

Alliage	Fe (%)	Si (%)	Profit
P0404	0,0440	0,0440	100
P0406	0,0640	0,0440	50
P0606	0,0640	0,0640	40
P0610	0,1000	0,0640	30
P1020	0,2000	0,1000	10

Toutes les instances d'optimisation sont exécutées avec les paramètres présentées dans le tableau 5.2. Ces paramètres sont déterminés par des experts du domaine qui ont une bonne compréhension des opérations de l'usine.

Les paramètres dans le tableau 5.3 qui représentent des poids dans la fonction multiob-jectif sont déterminés empiriquement. La combinaison de valeurs des paramètres qui donne le meilleur résultat d'un point vu opérationnel est retenue.

TABLEAU 5.2 : Valeurs des paramètres fixes du modèle d'optimisation

Paramètre	Valeur	Unité
τ	2	périodes
ω^d	2 500	kg
ω^p	2 500	kg
ω^c	2 500	kg
ψ	1	périodes
ϕ^d	0	périodes
ϕ^c	1	périodes
ϕ^p	1	périodes
θ	2	assignations
β	12	creusets
Θ	2	périodes
Φ	1	assignations/période
γ	4	périodes

TABLEAU 5.3 : Valeurs des poids pour la fonction multiobjectif

Paramètre	Valeur
η	15
ε^{zx}	200
ε^{xy}	150
ε^{zy}	100
ρ	0,01
μ	10
σ^a	100
σ^c	100

5.1 PREMIÈRE INSTANCE

5.1.1 DONNÉES DU PROBLÈME

La planification de siphonnage est présentée dans les tableaux A.1, A.2 et A.3. Les tournées sont classées par ordre de sortie et comportent différents taux de fer et de silicium. Les heures de sortie des tournées de siphonnage ainsi que les périodes de demande de métal sont affichées dans le diagramme de Gantt 5.1. Les tâches en rouge représentent les tournées de siphonnage dans chacune des salles de cuves. Le profit associé à chaque tournée varie en fonction de leur composition chimique. La ligne en bleu des graphiques 5.2 et 5.3 montre la concentration en ppm des tournées de siphonnage. Au total, 48 tournées doivent être assignées à différentes périodes de la journée. Le profit des tournées de siphonnage lorsqu'elles sont assignées au carrousel est calculé selon la fonction présentée dans le tableau 5.1. Concernant les demandes de métal, les trois fournées sont détaillées dans le tableau A.4. Chaque demande de fournée inclut une période de temps disponible pour son exécution, une quantité minimale et maximale de métal à respecter ainsi qu'une composition chimique maximale à ne pas dépasser pour le fer et le silicium. Les tâches en vertes représentent les périodes de demande de four dans le diagramme de Gantt 5.1. Les quantités maximales de fer et de silicium sont également représentées dans les graphiques 5.2 et 5.3. La fournée numéro 1 avait déjà des tournées de siphonnage assignées avant le lancement de l'optimisation. Par conséquent, sa capacité minimale et maximale est nettement inférieure à celle des autres fournées, et ses taux de fer et de silicium ont été ajustés en fonction des tournées reçues précédemment. Les demandes de transport sont répertoriées dans le tableau A.5. Chaque demande comporte une période de chargement, une quantité de métal minimale et maximale, ainsi qu'une composition

chimique maximale à ne pas dépasser pour le fer et le silicium. Les tâches en bleu dans le diagramme de Gantt 5.1 représentent les périodes de demande de transport. Enfin, le carrousel est disponible sur toute la période d'optimisation après la première période. Autrement dit, le paramètre Γ est égal à un. Les lettres B, G et T dans le diagramme de Gantt représentent les groupes de cuves. Cette section conclut la présentation des données fournies au modèle d'optimisation.

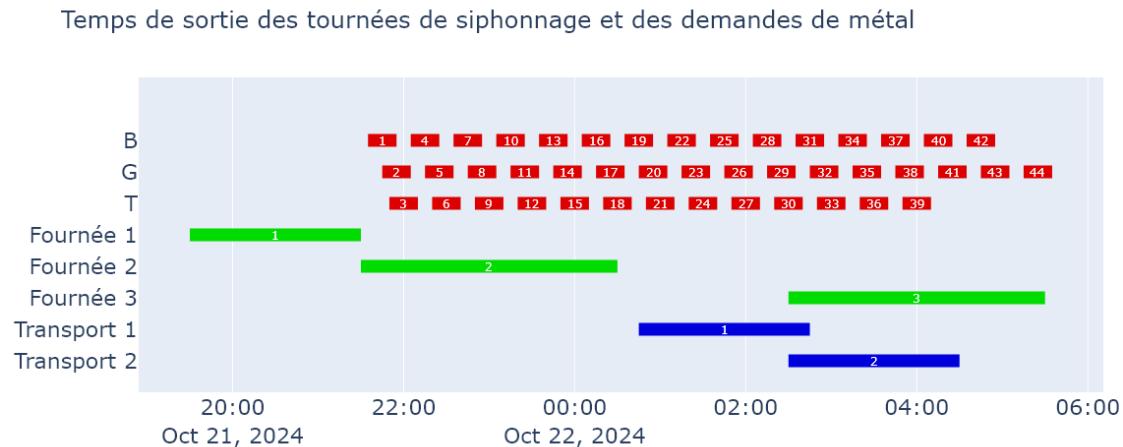


FIGURE 5.1 : Temps de sortie des tournées de siphonnage et des demandes de métal (1^{ière} instance)

5.1.2 RÉSULTATS DE L'OPTIMISATION

Dans cette sous-section, les résultats de la première instance sont présentés. Les tableaux A.6 à A.8 représentent les assignations aux demandes de four résultant du modèle d'optimisation. Le diagramme de Gantt 5.4 montre les assignations des tournées de siphonnage aux demandes de métal et au carrousel dans le temps. La tournée numéro 1 est assignée à

Composition chimique en fer en fonction du temps



FIGURE 5.2 : Composition chimique en fer en fonction du temps (1^{ière} instance)

Composition chimique en silicium en fonction du temps

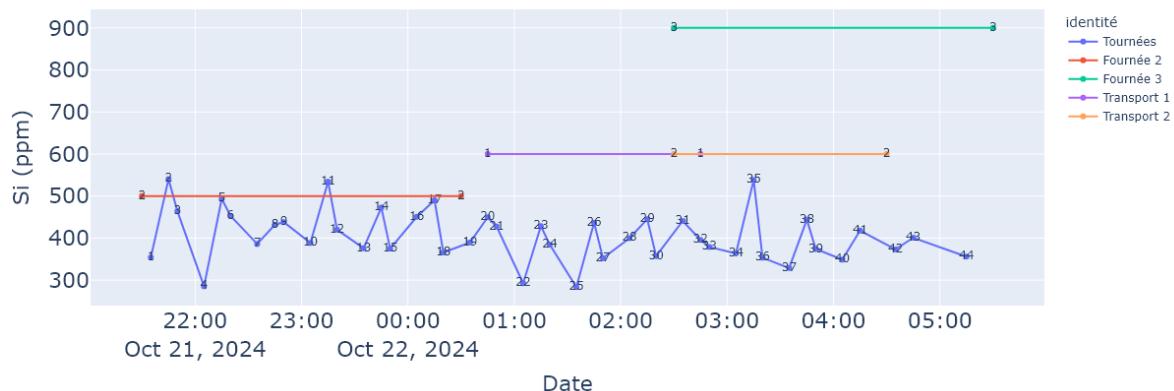


FIGURE 5.3 : Composition chimique en silicium en fonction du temps (1^{ière} instance)

la première demande de four cependant, elle est en dehors de la période d'assignation. Ceci est dû au fait que l'heure de sortie de la première tournée est supérieure à l'heure de début de la première fournée. La période de la première demande de four est donc ajustée avec l'algorithme 3.2. De plus, le métal de la première tournée n'est pas entièrement assigné à cette demande, puisqu'elle comporte seulement une quantité minimale et maximale de 3 680 kg. Le reste du métal de la tournée est assigné au carrousel. Pour la deuxième demande de four, la quantité totale de métal est quasi respectée avec un poids total de 104 590 kg. De plus, les contraintes chimiques pour le fer et le silicium sont respectées avec des valeurs de 0,0778% et 0,0444% respectivement. Aussi, les heures d'assignation respectent la période de la demande, comme montré sur le diagramme de Gantt 5.4. Pour la troisième demande de four, huit tournées sont assignées à la demande de four pour un poids total de 99 860 kg. La quantité de métal est presque respectée parfaitement qui demande un poids minimal et maximal de 99 866 kg. De même, les contraintes chimiques sont également respectées avec un pourcentage de 0,0785 % pour le fer et un pourcentage de 0.0408 % pour le silicium. Les heures d'assignation sont également respectées comme montré sur le diagramme de Gantt 5.4. Les tableaux A.9 et A.10 représentent les assignations aux transports. Pour la première demande de transport, la quantité totale assignée est de 23 960 kg. Les concentrations pour le fer et le silicium sont de 0,0761% et 0,0414% respectivement. Pour la seconde demande de transport, la quantité de métal assignée est de 25 920 kg et les concentrations de fer et silicium sont de 0,0637% et 0,0364% respectivement. Finalement, les assignations au carrousel sont présentées dans le tableau A.11. Au total, 19 tournées sont assignées au carrousel. La fonction objectif globale à une valeur de -280 637,10. Les détails de la fonction objectif sont présentés dans le tableau A.12, et le programme de résolution a terminé avec un écart relatif de 47,81 %

par rapport à la meilleure borne de la relaxation linéaire du problème après 45 secondes de calcul.

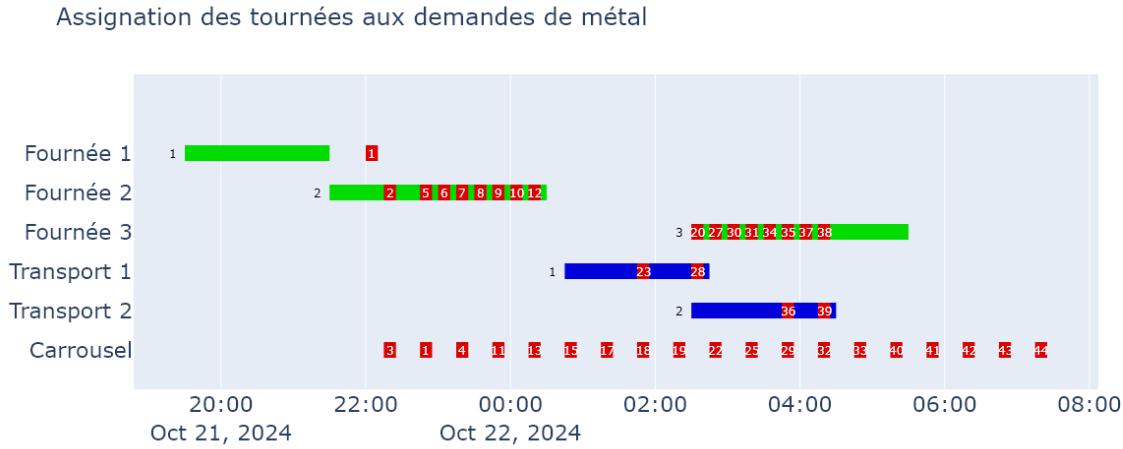


FIGURE 5.4 : Assignation des tournées aux demandes de métal (1^{ière} instance)

5.2 DEUXIÈME INSTANCE

5.2.1 DONNÉES DU PROBLÈME

La planification de siphonnage est présentée dans les tableaux B.1 à B.3. En tout, 55 tournées de siphonnage de métal sont planifiées. Le temps de sortie des tournées de siphonnage ainsi que les périodes des demandes de métal sont représentées dans le diagramme de Gantt 5.5. Les demandes de four et de transport sont répertoriées dans les tableaux B.5 et B.6 respectivement. La première demande de four contient déjà du métal en conséquence de cela, elle a une plus petite quantité minimale et maximale. Aussi, les concentrations maximales de fer et de silicium sont ajustées en fonction du métal déjà versé dans le four. Les graphiques 5.6 et 5.7 montrent la concentration en fer et en silicium des tournées de siphonnage et les

concentrations maximales des demandes de métal. Dans cette instance, plusieurs tournées de siphonnage se trouvent en excès de fer par rapport à la concentration maximale de fer des demandes de four et de transport. À l'inverse, presque aucune tournée n'est en excès de silicium. Pour cette instance, le paramètre Γ est égal à un.

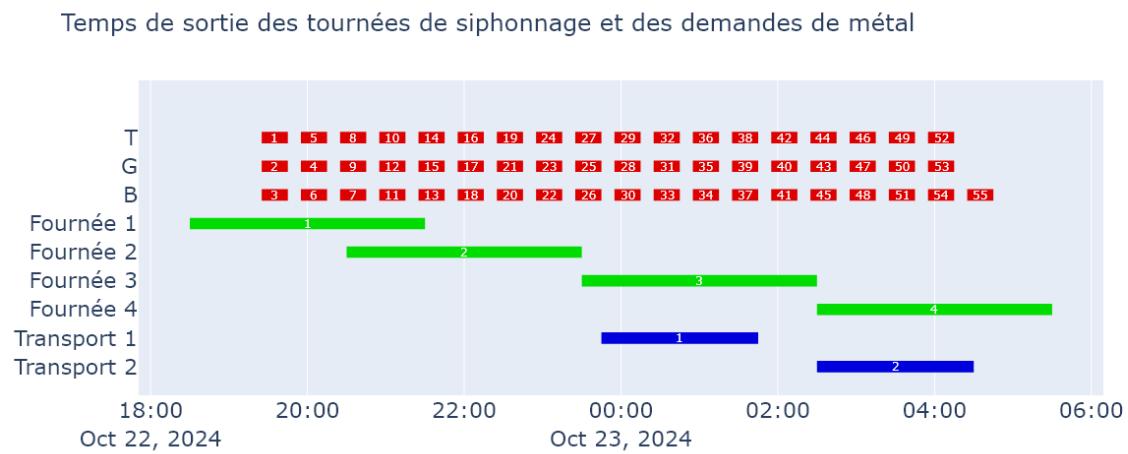


FIGURE 5.5 : Temps de sortie des tournées de siphonnage et des demandes de métal (2^{ième} instance)

5.2.2 RÉSULTATS DE L'OPTIMISATION

Dans cette sous-section, les résultats du modèle d'optimisation sont présentés pour la deuxième instance du problème. Le diagramme de Gantt 5.8 affiche les assignations dans le temps aux demandes de métal ainsi qu'au carrousel. Les tableaux B.7 à B.10 montrent en détail les assignations aux demandes de four. La première et la deuxième demande manquent respectivement 4 957 kg et 15 784 kg de métal. Les quantités manquantes dans les deux

Composition chimique en fer en fonction du temps

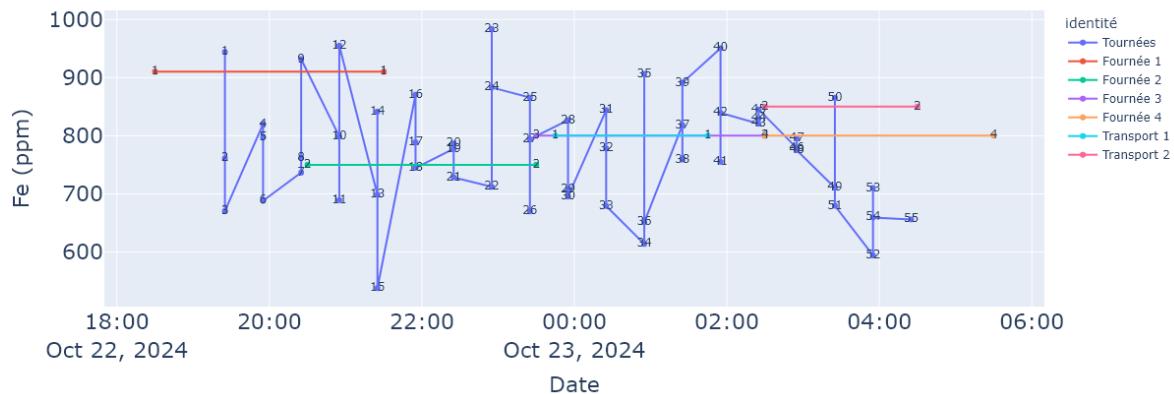


FIGURE 5.6 : Composition chimique en fer en fonction du temps (2^{ième} instance)

Composition chimique en silicium en fonction du temps

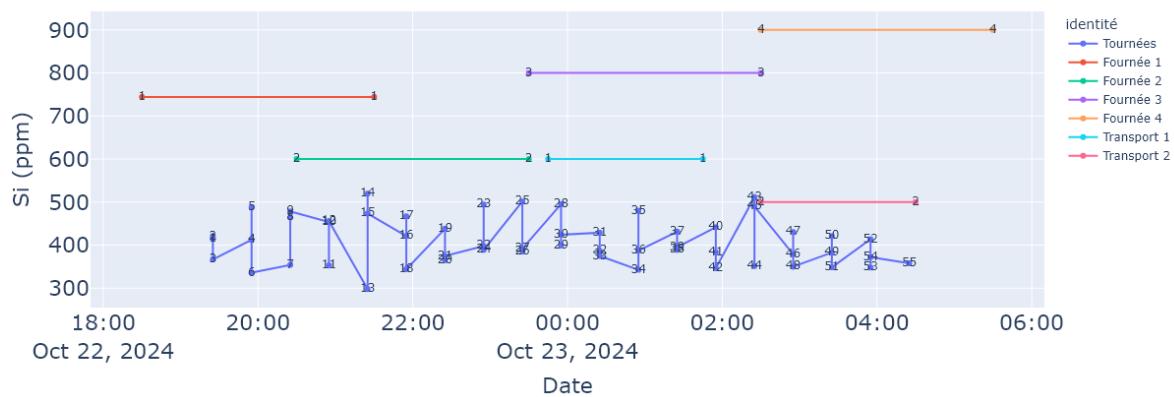


FIGURE 5.7 : Composition chimique en silicium en fonction du temps (2^{ième} instance)

autres demandes de four sont négligeables. Chaque demande de four respecte la concentration maximale de fer et de silicium. Le diagramme de Gantt 5.8 montre également que toutes les assignations aux demandes de four sont faites dans la bonne période de temps. Les tableaux B.11 et B.12 montrent en détail les assignations aux demandes de transport. La première demande de transport est proche de respecter la quantité minimale et maximale de métal avec une quantité totale de 17 694 kg alors que la demande est de 19 750 kg. La deuxième demande de transport a un plus important manque de métal. Ce manque s'élève à 8 020 kg. Les deux demandes de transport respectent les contraintes de chimie. En tout, 21 tournées de siphonnage sont assignées au carrousel. Les détails de la fonction objectif sont présentés dans le tableau B.15 et le programme de résolution a terminé avec un écart relatif de 83,48% par rapport à la meilleure borne de la relaxation linéaire du problème après 45 secondes de calcul.

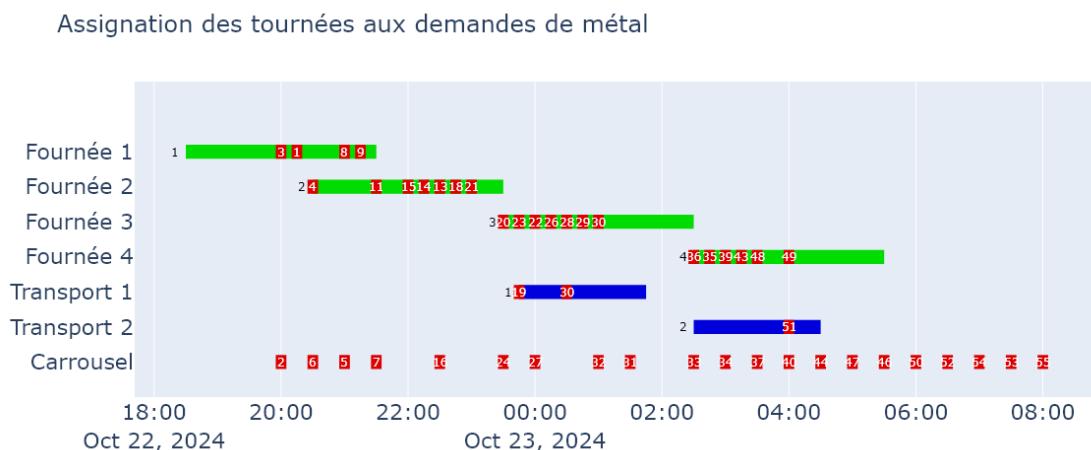


FIGURE 5.8 : Assигнation des tournées aux demandes de métal (2^{ième} instance)

5.3 TROISIÈME INSTANCE

5.3.1 DONNÉES DU PROBLÈME

La planification de siphonnage est présentée dans les tableaux C.1 à C.4. En tout, 53 tournées de siphonnage de métal doivent être assignées. Le temps de siphonnage des tournées ainsi que les périodes de demande de métal sont présentés dans le diagramme de Gantt 5.9. Le détail des demandes de four et de transport sont montrés dans les tableaux C.5 et C.6. Les graphiques 5.10 et 5.11 présente la concentration en fer et en silicium des différentes tournées de siphonnage ainsi que les concentrations maximales des demandes de métal. Quelques tournées de siphonnage dépassent la concentration maximale en fer des demandes de métal. Cependant, la majorité des tournées de siphonnage a une concentration inférieure en fer aux demandes de métal. Pour le silicium, aucune tournée ne se trouve au-dessus de la concentration maximale. Dans cette instance, la concentration des tournées de siphonnage en fer est élevée par rapport aux instances du problème. Pour le silicium, seulement une tournée a une très grande valeur. Pour cette instance, le paramètre Γ est égal à deux.

5.3.2 RÉSULTATS DE L'OPTIMISATION

Cette sous-section présente les résultats de la troisième instance du problème d'optimisation. Le diagramme de Gantt 5.12 montre les assignations aux différentes demandes de métal et au carrousel. Les tableaux C.7 à C.9 présentent en détail les assignations aux demandes de four. Toutes les demandes de four sont pratiquement remplies à leur capacité

Temps de sortie des tournées de siphonnage et des demandes de métal

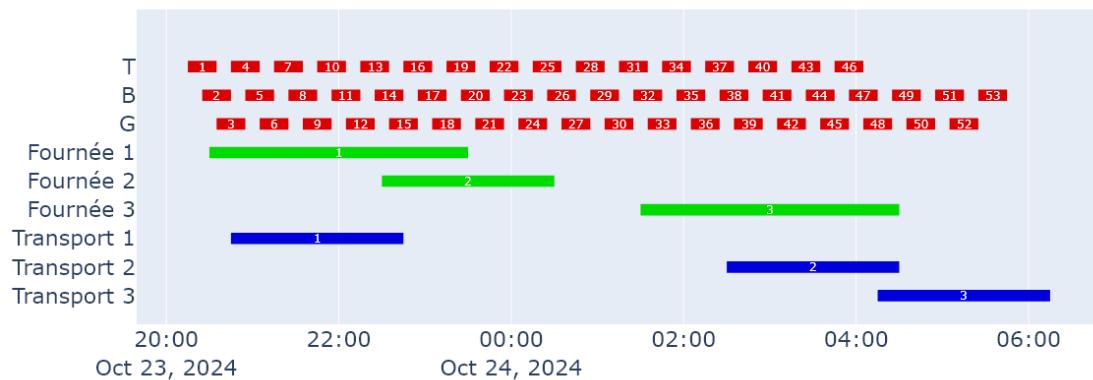


FIGURE 5.9 : Temps de sortie des tournées de siphonnage et des demandes de métal (3^{ième} instance)

Composition chimique en fer en fonction du temps

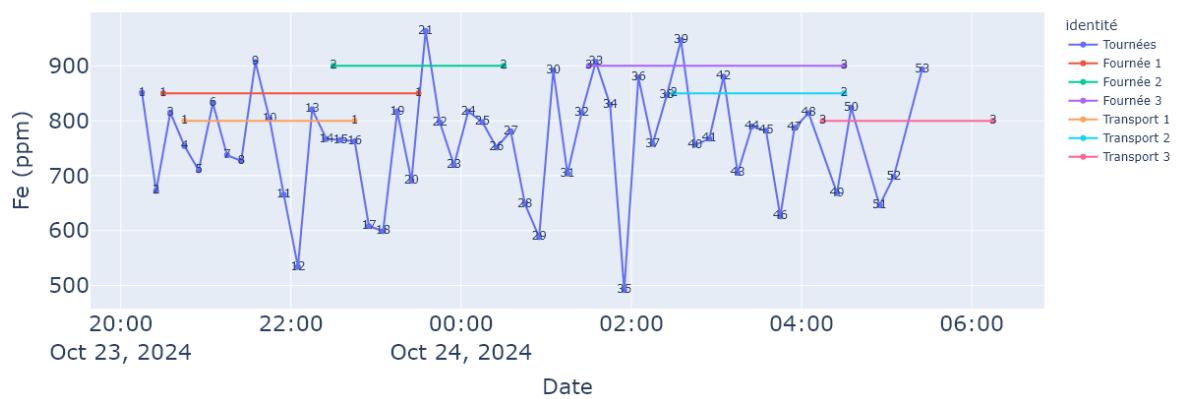


FIGURE 5.10 : Composition chimique en fer en fonction du temps (3^{ième} instance)

Composition chimique en silicium en fonction du temps

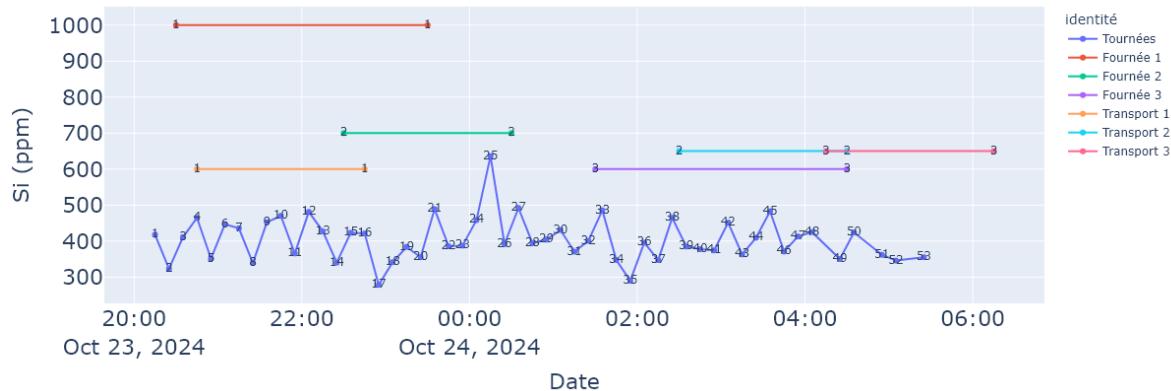


FIGURE 5.11 : Composition chimique en silicium en fonction du temps (3^{ème} instance)

demandée. Elles ont respectivement des manques de métal de 5 562 kg, 6 102 kg et 3 968 kg.

De plus, les contraintes de concentrations maximales de fer et de silicium ont été respectées.

De plus, les assignations sont faites dans la bonne période de temps comme montré sur le diagramme de Gantt 5.12. D'un autre côté, les tableaux C.10 à C.12 montrent les assignations en détail des demandes de transport. Toutes les demandes de transport ont environ la bonne quantité de métal assignée. De plus, le métal de la tournée numéro 38 est divisé en deux sur les deuxième et troisième demandes de transport. Ceci est possible, car les deux demandes sont suffisamment proches. Cet exemple montre bien la mise en application des contraintes 3.3 et 3.4. En tout, 23 tournées de siphonnage sont assignées au carrousel. Ces tournées sont réparties sur l'ensemble de la durée du quart de travail, comme montré dans le diagramme de Gantt 5.12. Les détails de la fonction objectif sont présentés dans le tableau C.15 et le programme de résolution a terminé avec un écart relatif de 98,45% par rapport à la meilleure borne de la relaxation linéaire du problème après 45 secondes de calcul.

Assignation des tournées aux demandes de métal

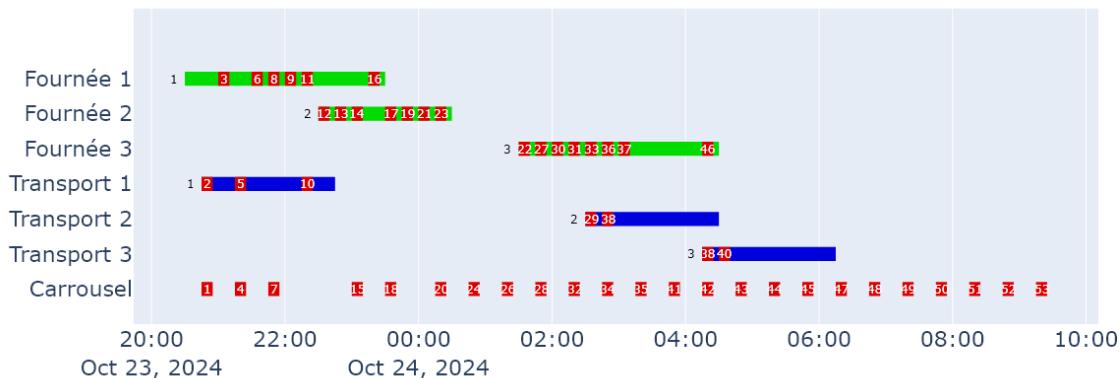


FIGURE 5.12 : Assignation des tournées aux demandes de métal (3^{ième} instance)

5.4 QUATRIÈME INSTANCE

5.4.1 DONNÉES DU PROBLÈME

La planification de siphonnage est présentée dans les tableaux D.1 à D.4. En tout, 51 tournées doivent être assignées au centre de coulée. Les temps de siphonnage ainsi que les périodes de demandes de métal sont présentés dans le diagramme de Gantt 5.13. Les détails des demandes de four et de transport sont montrés dans les tableaux D.5 et D.6. Les graphiques 5.14 et 5.15 présentent la concentration en fer et en silicium des différentes tournées de siphonnage ainsi que les concentrations maximales des demandes de métal. Beaucoup de tournées de siphonnage dépassent la concentration en fer des demandes de four. Pour le silicium, toutes les tournées de siphonnage ont une concentration en silicium inférieure aux demandes de métal à l'exception d'une seule qui est grandement élevé avec 1000 ppm. Le paramètre Γ est égal à zéro pour cette instance. En d'autres mots, des affectations au carrousel peuvent être effectuées dès la première période.

Temps de sortie des tournées de siphonnage et des demandes de métal

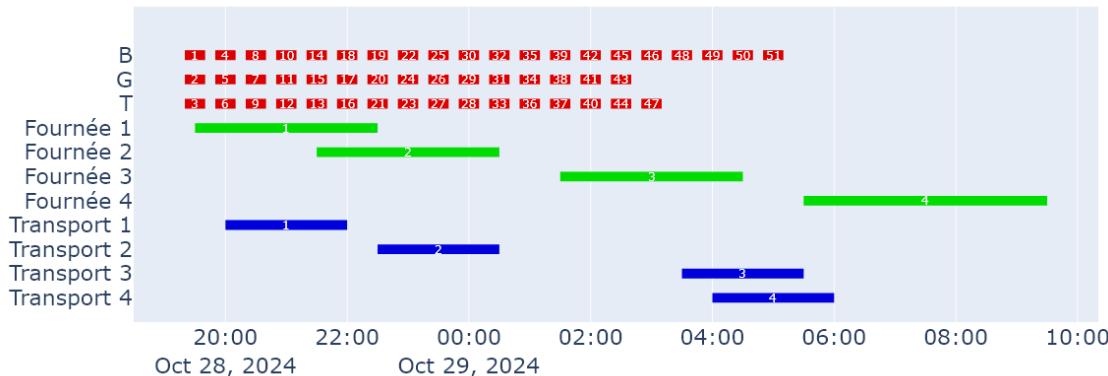


FIGURE 5.13 : Temps de sortie des tournées de siphonnage et des demandes de métal (4^{ième} instance)

5.4.2 RÉSULTATS DE L'OPTIMISATION

Cette sous-section présente les résultats de la quatrième instance du problème d'optimisation. Le diagramme de Gantt 5.16 montre les assignations aux demandes de métal ainsi qu'au carrousel. Les tableaux D.7 à D.9 présentent en détail les assignations aux demandes de four. La quantité ainsi que les concentrations en fer et silicium sont respectées pour la demande de four 1 et 2. Aucune tournée n'a été assignée à la demande de four 3, même si elle avait une demande de 4 645 kg. La dernière demande de four est remplie seulement à la moitié. Comme la demande est en fin de quart de travail, les tournées en fin de quart ne sont pas suffisantes pour la remplir entièrement. D'un autre côté, les assignations aux demandes de transport sont présentées dans les tableaux D.10 à D.13. Toutes les demandes de transport contiennent environ la bonne quantité de métal. Le métal de la tournée 43 est également divisé

Composition chimique en fer en fonction du temps

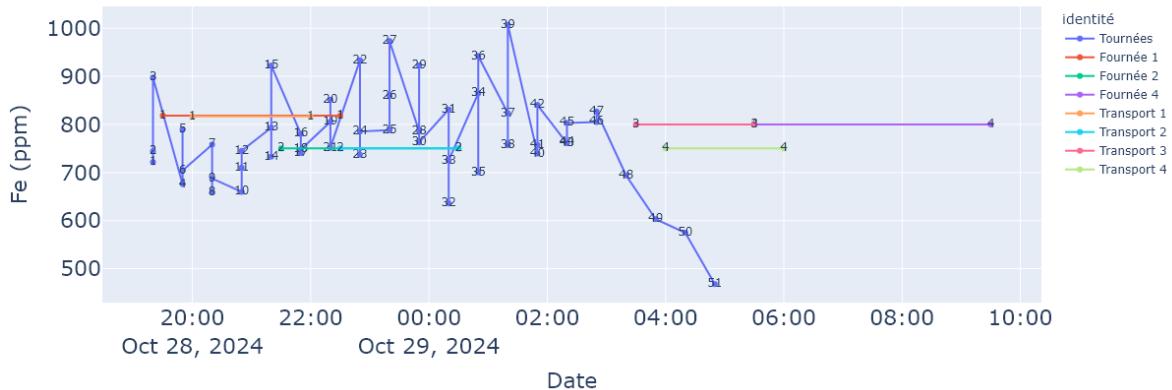


FIGURE 5.14 : Composition chimique en fer en fonction du temps (4^{ième} instance)

Composition chimique en silicium en fonction du temps

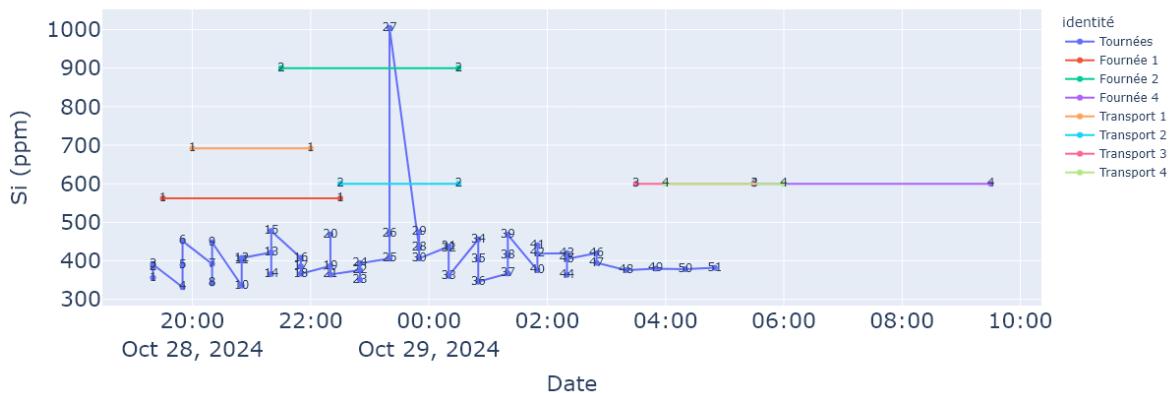


FIGURE 5.15 : Composition chimique en silicium en fonction du temps (4^{ième} instance)

en deux sur les demandes de transport 3 et 4, puisqu'elles sont rapprochées. Finalement, 23 tournées sont assignées au carrousel. Les détails de la fonction objectif sont présentés dans le tableau D.16 et le programme de résolution a terminé avec un écart relatif de 14,78% par rapport à la meilleure borne de la relaxation linéaire du problème après 45 secondes de calcul.

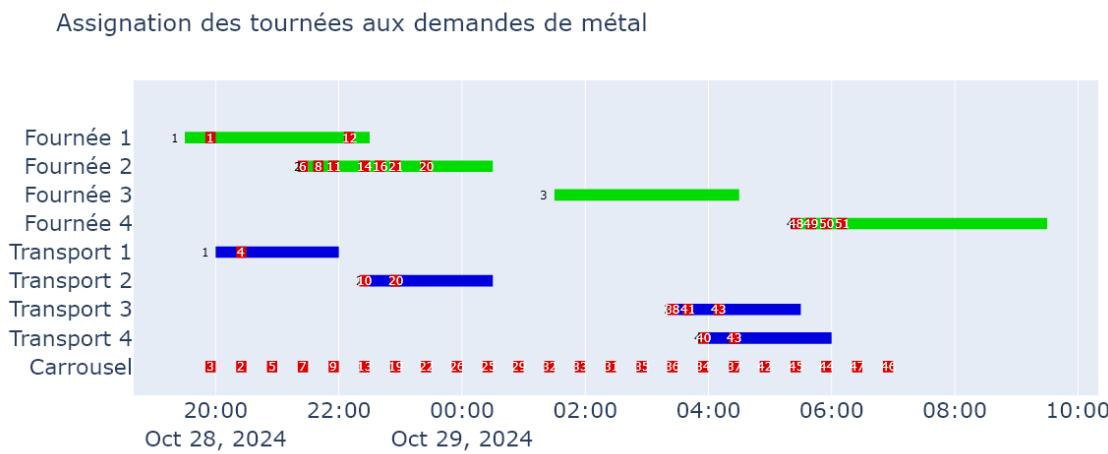


FIGURE 5.16 : Assignation des tournées aux demandes de métal (4^{ième} instance)

5.5 CINQUIÈME INSTANCE

5.5.1 DONNÉES DU PROBLÈME

La planification de siphonnage est présentée dans les tableaux E.1 à E.4. En tout, 52 tournées doivent être assignées au centre de coulée. Les temps de siphonnage ainsi que les périodes de demandes de métal sont présentés dans le diagramme de Gantt 5.17. Les détails des demandes de four et de transport sont montrés dans les tableaux E.5 et E.6. Les graphiques 5.18 et 5.19 présentent les concentrations en fer et en silicium des différentes tournées de siphonnage ainsi que les concentrations maximales des demandes de métal. En général, les

concentrations en fer des tournées de siphonnage sont dans la moyenne des concentrations de fer des demandes de métal. Pour le silicium, toutes les tournées de siphonnage ont une concentration en silicium inférieure aux demandes de métal à l'exception d'une seule qui est grandement élevé avec 900 ppm. Le paramètre Γ est égal à zéro pour cette instance. En d'autres mots, des affectations au carrousel peuvent être faites dès la première période.

Temps de sortie des tournées de siphonnage et des demandes de métal

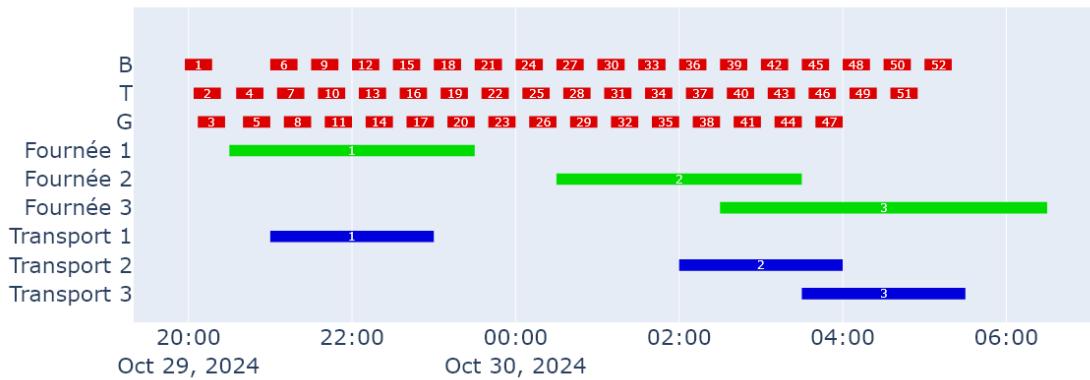


FIGURE 5.17 : Temps de sortie des tournées de siphonnage et des demandes de métal (5^{ième} instance)

5.5.2 RÉSULTATS DE L'OPTIMISATION

Cette sous-section présente les résultats de la cinquième instance du problème d'optimisation. Le diagramme de Gantt 5.20 montre les assignations aux demandes de métal ainsi qu'au carrousel. Les tableaux E.7 à E.9 présentent en détail les assignations aux demandes de four. La quantité ainsi que les concentrations en fer et silice sont respectées pour toutes les

Composition chimique en fer en fonction du temps

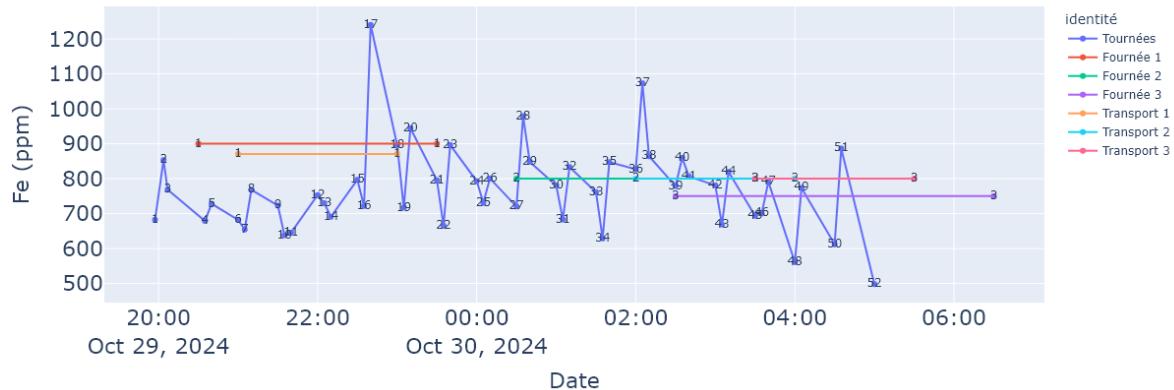


FIGURE 5.18 : Composition chimique en fer en fonction du temps (5^{ième} instance)

Composition chimique en silicium en fonction du temps

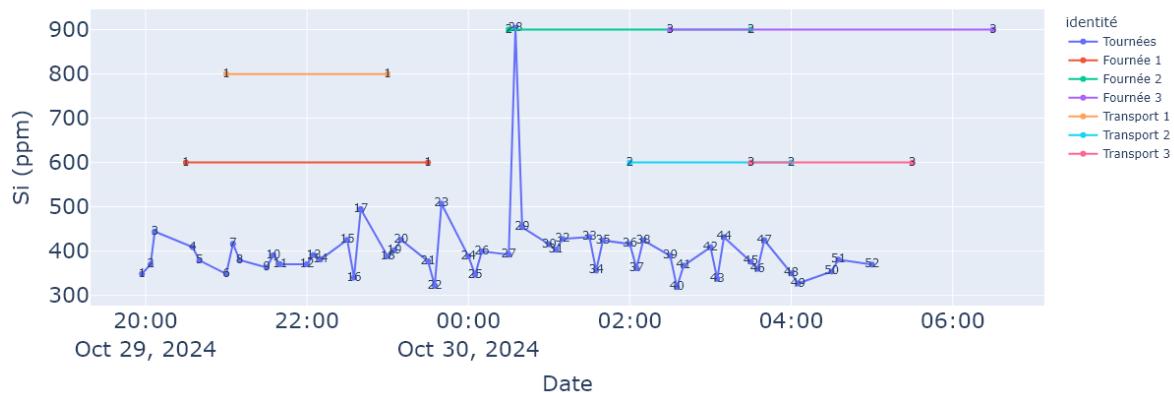


FIGURE 5.19 : Composition chimique en silicium en fonction du temps (5^{ième} instance)

demandes de four. D'un autre côté, les assignations aux demandes de transport sont présentées dans les tableaux E.10 à E.12. Toutes les demandes de transport contiennent environ la bonne quantité de métal. Finalement, 20 tournées sont assignées au carrousel. Les détails de la fonction objectif sont présentés dans le tableau E.15 et le programme de résolution a terminé avec un écart relatif de 100,0% par rapport à la meilleure borne de la relaxation linéaire du problème après 45 secondes de calcul.

Assignation des tournées aux demandes de métal

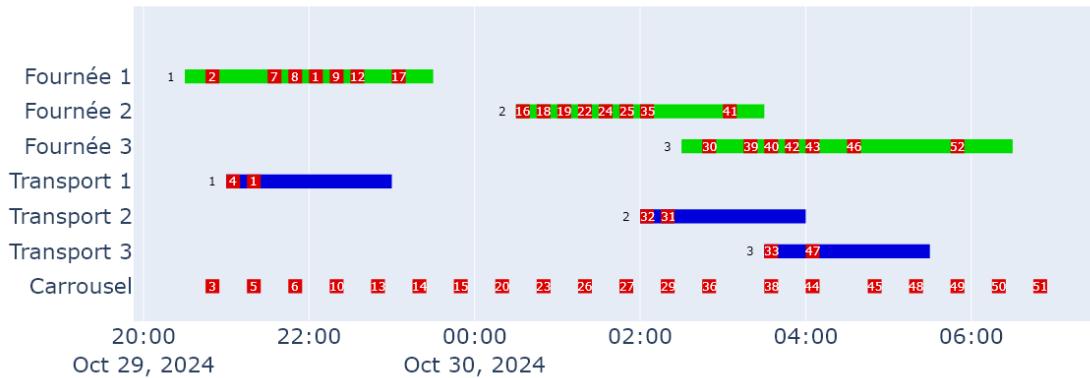


FIGURE 5.20 : Assignation des tournées aux demandes de métal (5^{ième} instance)

5.6 SIXIÈME INSTANCE

5.6.1 DONNÉES DU PROBLÈME

La planification de siphonnage est présentée dans les tableaux F.1 à F.4. En tout, 56 tournées doivent être assignées au centre de coulée. Les temps de siphonnage ainsi que les périodes de demandes de métal sont présentés dans le diagramme de Gantt 5.21. Les

détails des demandes de four et de transport sont montrés dans les tableaux F.5 et F.6. Les graphiques 5.22 et 5.23 présentent les concentrations en fer et en silicium des différentes tournées de siphonnage ainsi que les concentrations maximales des demandes de métal. En général, la plupart des concentrations en fer des tournées de siphonnage sont inférieures aux concentrations des demandes de métal. Pour le silicium, toutes les tournées de siphonnage ont une concentration en silicium inférieure aux demandes de métal, à l'exception de la tournée 32, qui a une concentration de 672 ppm. Le paramètre Γ est égal à 2 pour cette instance. En d'autres mots, des affectations au carrousel peuvent être faites dès la troisième période.

Temps de sortie des tournées de siphonnage et des demandes de métal

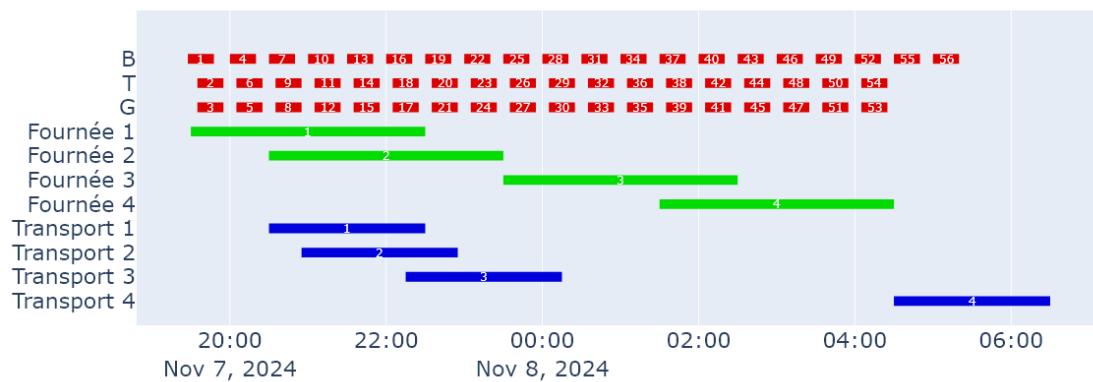


FIGURE 5.21 : Temps de sortie des tournées de siphonnage et des demandes de métal (6^{ième} instance)

Composition chimique en fer en fonction du temps

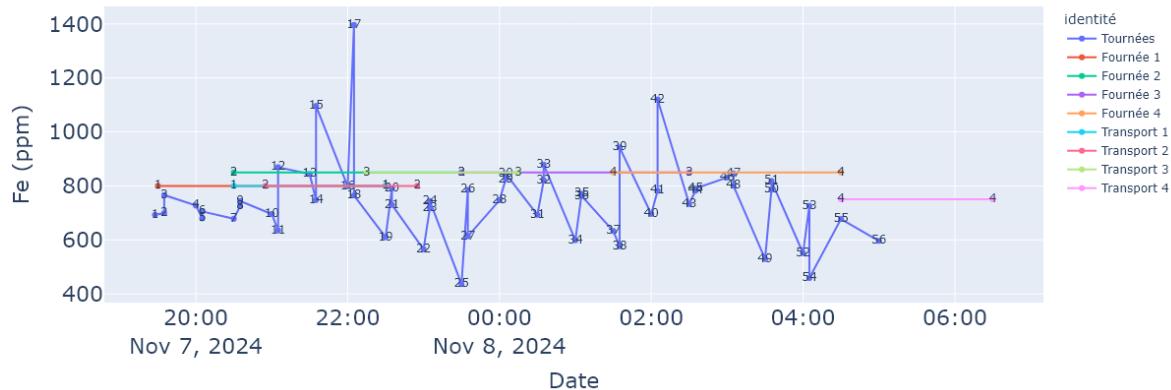


FIGURE 5.22 : Composition chimique en fer en fonction du temps (6^{ième} instance)

Composition chimique en silicium en fonction du temps

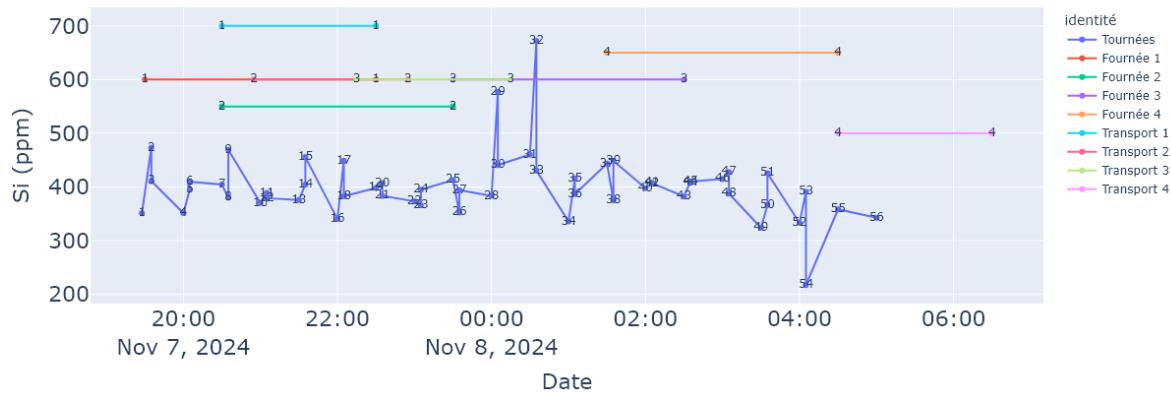


FIGURE 5.23 : Composition chimique en silicium en fonction du temps (6^{ième} instance)

5.6.2 RÉSULTAT DE L'OPTIMISATION

Cette sous-section présente les résultats de la sixième instance du problème d'optimisation. Le diagramme de Gantt 5.24 montre les assignations aux demandes de métal ainsi qu'au carrousel. Les tableaux F.7 à F.10 présentent en détail les assignations aux demandes de four. Dans cette solution, les quantités des fournées 1 et 2 manquent respectivement 12 156 kg et 24 637 kg, car la demande de métal est très grande dans les premières périodes du modèle d'optimisation. Les concentrations en fer et silicium sont respectées pour toutes les demandes de four. D'un autre côté, les assignations aux demandes de transport sont présentées dans les tableaux F.11 à F.14. Toutes les demandes de transport contiennent environ la bonne quantité de métal. Finalement, 20 tournées sont assignées au carrousel. Les détails de la fonction objectif sont présentés dans le tableau F.17 et le programme de résolution a terminé avec un écart relatif de 26,81% par rapport à la meilleure borne de la relaxation linéaire du problème après 45 secondes de calcul.

5.7 SEPTIÈME INSTANCE

5.7.1 DONNÉES DU PROBLÈME

La planification de siphonnage est présentée dans les tableaux G.1 à G.4. En tout, 50 tournées doivent être assignées au centre de coulée. Les temps de siphonnage ainsi que les périodes de demandes de métal sont présentés dans le diagramme de Gantt 5.25. Les détails des demandes de four et de transport sont montrés dans les tableaux G.5 et G.6. Les graphiques 5.26 et 5.27 présentent les concentrations en fer et en silicium des différentes

Assignation des tournées aux demandes de métal

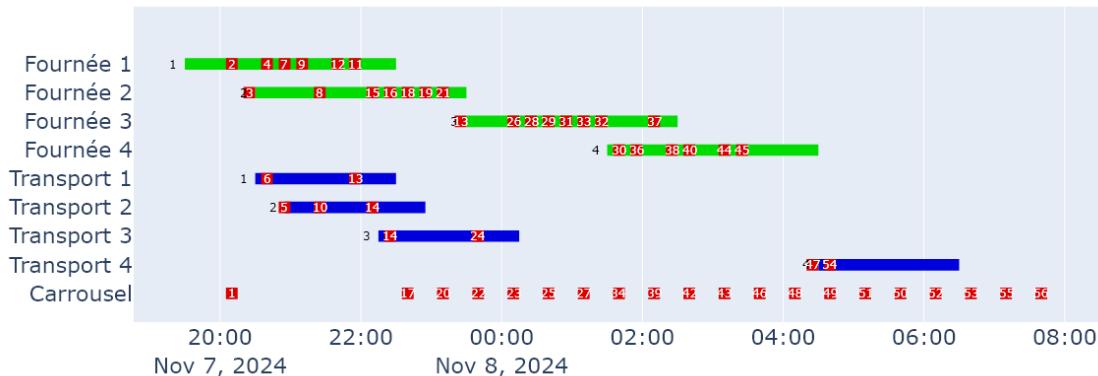


FIGURE 5.24 : Assignation des tournées aux demandes de métal (6^{ième} instance)

tournées de siphonnage ainsi que les concentrations maximales des demandes de métal. En général, la plupart des concentrations en fer des tournées de siphonnage sont inférieures aux concentrations des demandes de métal. Pour le silicium, toutes les tournées de siphonnage ont une concentration en silicium inférieure aux demandes de métal. Le paramètre Γ est égal à 2 pour cette instance. En d'autres mots, des affectations au carrousel peuvent être faites dès la troisième période.

5.7.2 RÉSULTAT DE L'OPTIMISATION

Cette sous-section présente les résultats de la septième instance du problème d'optimisation. Le diagramme de Gantt 5.28 montre les assignations aux demandes de métal ainsi qu'au carrousel. Les tableaux G.7 à G.10 présentent en détail les assignations aux demandes de four. Dans cette solution, les quantités de métal ainsi que les concentrations en fer et

Temps de sortie des tournées de siphonnage et des demandes de métal

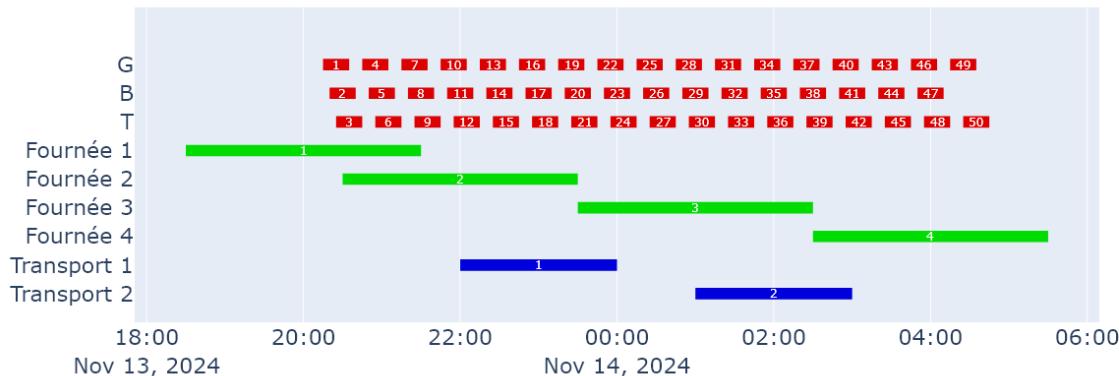


FIGURE 5.25 : Temps de sortie des tournées de siphonnage et des demandes de métal (7^{ième} instance)

Composition chimique en fer en fonction du temps

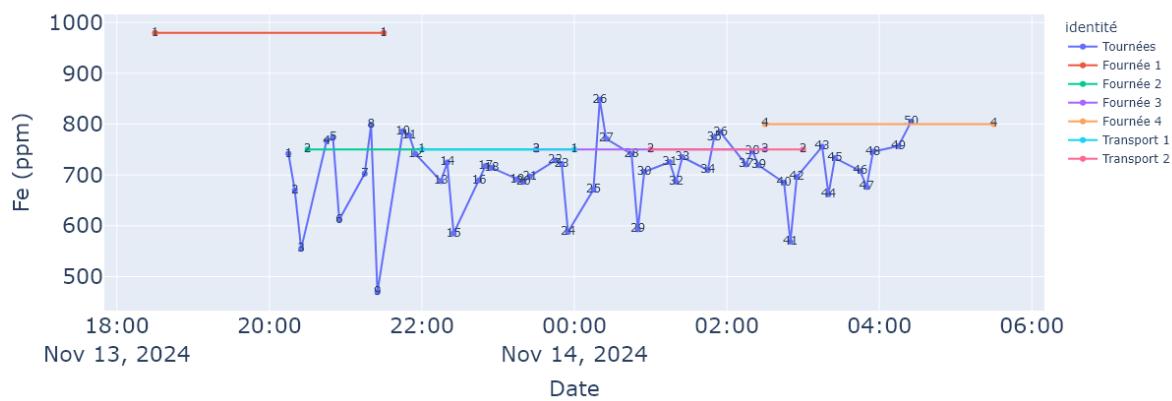


FIGURE 5.26 : Composition chimique en fer en fonction du temps (7^{ième} instance)

Composition chimique en silicium en fonction du temps

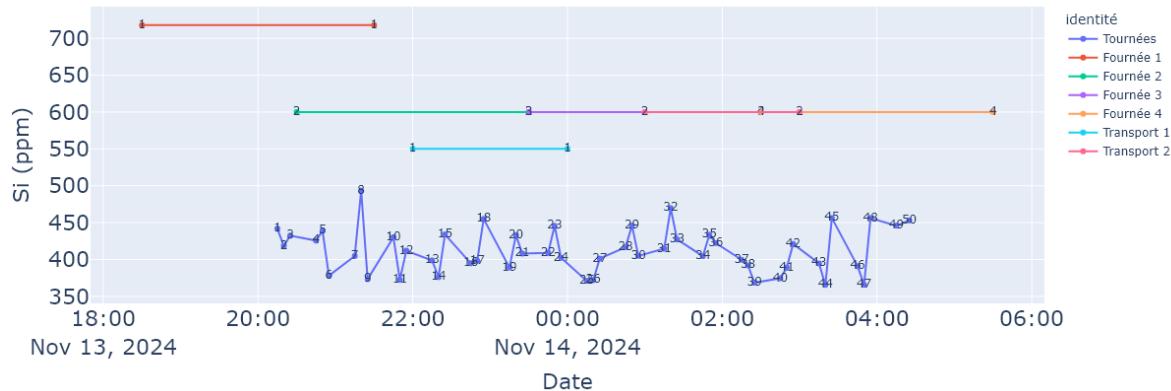


FIGURE 5.27 : Composition chimique en silicium en fonction du temps (7^{ième} instance)

silicium sont respectées pour toutes les demandes de four. D'un autre côté, les assignations aux demandes de transport sont présentées dans les tableaux G.11 à G.12. Toutes les demandes de transport contiennent environ la bonne quantité de métal. Finalement, 15 tournées sont assignées au carrousel. Les détails de la fonction objectif sont présentés dans le tableau G.14 et le programme de résolution a terminé avec un écart relatif de 39,40% par rapport à la meilleure borne de la relaxation linéaire du problème après 45 secondes de calcul.

5.7.3 SOMMAIRE

Cette sous-section présente un aperçu synthétique des résultats obtenus. Le tableau 5.4 résume les principales caractéristiques de chaque instance, notamment le nombre de variables binaires, de variables continues et de contraintes, ce qui permet d'apprécier la complexité des problèmes traités.

Assignation des tournées aux demandes de métal

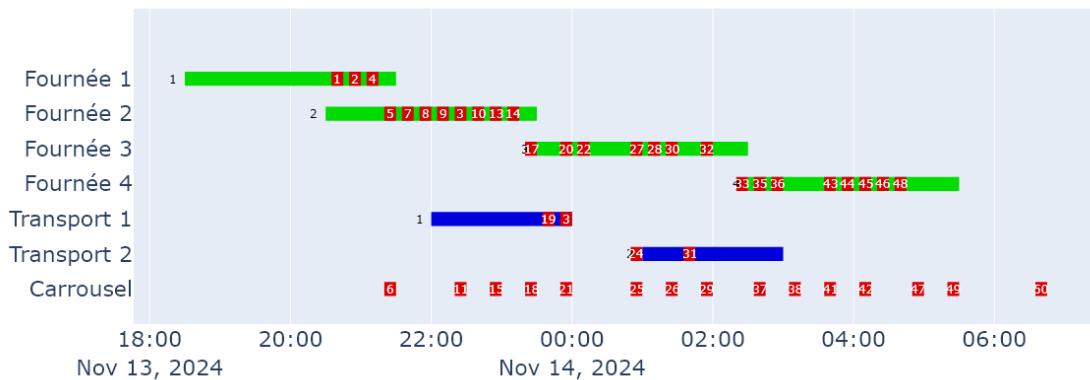


FIGURE 5.28 : Assignation des tournées aux demandes de métal (7^{ième} instance)

Le tableau indique également la valeur de la fonction objectif obtenue, ainsi que l'écart relatif par rapport à la meilleure borne de la relaxation linéaire du problème, fournissant ainsi une indication sur la qualité des solutions. Les colonnes suivantes présentent le nombre de tournées, de fournées et de transports utilisés dans chaque solution.

Enfin, les deux dernières colonnes indiquent si les algorithmes de détection de non-réalisabilité (3.1) et (3.2) ont été activés pour résoudre les problèmes spécifiques liés à chaque instance.

TABLEAU 5.4 : Tableau sommaire

No. in- stance	Nb. var. bi- naires	Nb. var. continues	Nb. contraintes	Fonct. Obj.	Écart relatif	Nb. Tour- nées	Nb Four- nées	Nb. Trans- ports	Algo (3.1)	Algo (3.2)
1	38 192	22 574	125 406	-280 637,10	47,81	44	3	2	non	oui
2	57 310	35 904	190 106	-2 832,10	452 832,10	83,48	55	4	2	non
3	53 530	33 539	177 540	-1 282,50	917 282,50	98,45	48	3	3	non
4	63 138	43 094	214 675	-6 398,07	121 398,07	14,78	51	4	4	non
5	52 572	32 960	167 564	-648 200,57	100,00 200,57	52	3	3	non	non
6	68 544	46 748	232 470	-3 026,40	195 026,40	26,81	56	4	4	non
7	50 500	31 646	167 660	-1 302,00	155 302,00	39,40	50	4	2	non

CONCLUSION

Dans le cadre de ce mémoire, un modèle d'optimisation a été développé pour l'as-signation des creusets au centre de coulée. Une description des opérations liées au centre d'électrolyse et au centre de coulée a été fournie, permettant de mieux comprendre les enjeux techniques de ces processus. Une revue de littérature sur les différents aspects abordés dans ce mémoire a été présentée, afin de situer l'étude dans son contexte scientifique et industriel.

La méthode de séparation et d'évaluation progressive utilisée pour résoudre le problème d'optimisation a été expliquée en détail. Par la suite, le modèle d'optimisation a été décrit, en mettant en avant les ensembles, les paramètres et les variables associés au problème. Les contraintes ainsi que les différentes expressions de la fonction objective ont été détaillées pour clarifier leur rôle dans la formulation du modèle.

Des algorithmes spécifiques ont été proposés pour remédier à la non-réalisabilité des instances d'optimisation, offrant ainsi des solutions robustes aux défis pratiques rencontrés. En outre, une présentation de l'adaptation des paramètres du modèle d'optimisation pour le rendre dynamique a été incluse, afin de répondre aux exigences d'un environnement en constante évolution.

Enfin, les résultats obtenus pour les instances traitées dans ce mémoire ont été présentés, mettant en lumière l'efficacité et la pertinence du modèle d'optimisation développé. Ces résultats ouvrent des perspectives pour de futures améliorations et applications dans le domaine de l'aluminium.

5.8 DISCUSSION DES RÉSULTATS

Le modèle d'optimisation comporte quelques lacunes. Premièrement, le problème est modélisé de façon à ne pas avoir d'infaisabilité. C'est pourquoi, après une certaine période, rien n'impose nécessairement l'assignation de toutes les tournées de siphonnage. Ce comportement est décrit par les équations 3.9 et 3.10. Ceci engendre un problème, car il se peut qu'une tournée ne soit pas assignée et qu'en réalité elle aurait pu être assignée. Une méthode pour contourner ce problème aurait été de résoudre le problème une première fois, en ne visant que la minimisation des variables binaires $xyz_i \in R$. Si la fonction objectif est de 0 c'est qu'il existe au moins une solution dont toutes les tournées sont assignées et le problème d'optimisation est résous par la suite sans les variables binaires $xyz_i \in R$.

Deuxièmement, il serait intéressant de modéliser le problème de façon stochastique, car les périodes de sortie, les concentrations chimiques et les quantités de métal des tournées de siphonnage sont sujettes à incertitude et ne peuvent être estimées qu'avec une précision limitée avant leur réalisation. Pour les périodes de sortie, la précision devient plus grande lorsque la tournée est proche d'être siphonnée. Cependant, si la tournée se fait siphonner dans plus de deux heures, la précision sur le temps de sortie est très médiocre. Les bris mécaniques liés aux équipements qui siphonnent le métal sont très courants et peuvent faire changer grandement la planification de siphonnage. D'un autre côté, les concentrations chimiques des tournées peuvent varier. Les analyses de métal ne sont pas effectuées chaque jour et, selon les opérations fait sur la cuve, les concentrations en fer et silicium peuvent grandement varier. Il serait donc intéressant de collecter des données pour en estimer la distribution et ensuite utiliser cette distribution pour générer différents scénarios et ainsi faire de l'optimisation stochastique.

Ensuite, les quantités de métal peuvent aussi varier lorsque la tournée est siphonnée. Il serait donc intéressant de recueillir également des données pour estimer la distribution de la répartition des poids des tournées et inclure aussi ces données dans l'optimisation stochastique.

Troisièmement, une étude aurait pu être réalisée sur l'impact des différents paramètres de la librairie Gurobi Optimization, LLC (2024). La librairie offre une grande variété de paramètres afin d'améliorer les temps de résolution des problèmes.

BIBLIOGRAPHIE

Askary, Milad, Makui, Ahmad et Tajik, Mahmoud (2024). A robust multi-objective mip model to optimize the supply chain of steel industry taking into account the sustainability approach. *RAIRO-Oper. Res.*, 58(2), 1059–1091. <http://dx.doi.org/10.1051/ro/2024004>. Récupéré de <https://doi.org/10.1051/ro/2024004>

Balinski, M. L. (1985). Signature methods for the assignment problem. *Operations Research*, 33(3), 527–536. Récupéré le 2025-03-03 de <http://www.jstor.org/stable/170555>

Balinski, M. L. et Gomory, R. E. (1964). A primal method for the assignment and transportation problems. *Management Science*, 10(3), 578–593. Récupéré le 2025-03-02 de <http://www.jstor.org/stable/2627433>

de Ladurantaye, D., Gendreau, M. et Potvin, J. Y. (2007). Scheduling a hot rolling mill. *The Journal of the Operational Research Society*, 58(3), 288–300. Récupéré le 2025-02-05 de <http://www.jstor.org/stable/4622696>

Duman, E., Yildirim, M. B. et and, A. F. A. (2008). Scheduling continuous aluminium casting lines. *International Journal of Production Research*, 46(20), 5701–5718. <http://dx.doi.org/10.1080/00207540701355212>. Récupéré de <https://doi.org/10.1080/00207540701355212>

Ferretti, I., Zanoni, S., Zavanella, L. et Diana, A. (2007). Greening the aluminium supply chain. *International Journal of Production Economics*, 108(1), 236–245. Principles and practices of managing inventories, <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2006.12.037>. Récupéré de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925527306003215>

FICO Xpress Solver (2025). Récupéré de <https://www.fico.com/en>

Gouvernement du Canada (2023). Aluminum facts. <https://natural-resources.canada.ca/our-natural-resources/minerals-mining/mining-data-statistics-and-analysis/minerals-metals-facts/aluminum-facts/20510> [Accessed : (2024-05-26)].

Gravel, M., Price, W. L. et Gagné, C. (2002). Scheduling continuous casting of aluminum using a multiple objective ant colony optimization metaheuristic. *European Journal*

of Operational Research, 143(1), 218–229. [http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(01\)00329-0](http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/S0377-2217(01)00329-0). Récupéré de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221701003290>

Guo, Q., Tang, L., Liu, J. et and, S. Z. (2021). Continuous-time formulation and differential evolution algorithm for an integrated batching and scheduling problem in aluminium industry. *International Journal of Production Research*, 59(10), 3169–3184. <http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2020.1747656>. Récupéré de <https://doi.org/10.1080/00207543.2020.1747656>

Gurobi Optimization, LLC (2024). Gurobi Optimizer Reference Manual. Récupéré de <https://www.gurobi.com>

Hillier, F. S. et Lieberman, G. J. (2001). *Introduction to Operations Research* (seventh éd.). New York, NY, USA : McGraw-Hill.

IBM CPLEX Solver (2025). Récupéré de <https://www.ibm.com/products/ilog-cplex-optimization-studio>

Jonker, R. et Volgenant, A. (1987). A shortest augmenting path algorithm for dense and sparse linear assignment problems. *Computing*, 38(4), 325–340. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1007/BF02278710>

Klotz, E. et Newman, A. M. (2013). Practical guidelines for solving difficult mixed integer linear programs. *Surveys in Operations Research and Management Science*, 18(1), 18–32. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.sorms.2012.12.001>. Récupéré de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876735413000020>

Marc Gravel, W. L. P. et Gagné, C. (2000). Scheduling jobs in an alcan aluminium foundry using a genetic algorithm. *International Journal of Production Research*, 38(13), 3031–3041. <http://dx.doi.org/10.1080/00207540050117422>. Récupéré de <https://doi.org/10.1080/00207540050117422>

Powell, W. B. (1986). A stochastic model of the dynamic vehicle allocation problem. *Transportation Science*, 20(2), 65–141. <http://dx.doi.org/10.1287/trsc.20.2.117>

Powell, W. B. (1996). A stochastic formulation of the dynamic assignment problem, with an application to truckload motor carriers. *Transportation Science*, 30(3), 179–272. <http://dx.doi.org/10.1287/trsc.30.3.195>

Ramteen Sioshansi, A. J. C. (2017). *Optimization in Engineering* (first éd.). Springer Cham.
<http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-56769-3>

Sarker, B. R., Wu, B. et Paudel, K. P. (2019). Modeling and optimization of a supply chain of renewable biomass and biogas : Processing plant location. *Applied Energy*, 239, 343–355. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.216>. Récupéré de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261919302363>

Schwindt, C. et Trautmann, N. (2003). Scheduling of rolling ingots production. Dans U. Leopold-Wildburger, F. Rendl, et G. Wäscher (dir.). *Operations Research Proceedings 2002*, 83–88., Berlin, Heidelberg. Springer Berlin Heidelberg.

Sharma, S. et Kumar, V. (2022). A comprehensive review on multi-objective optimization techniques : Past, present and future. *Arch Computat Methods Eng*, 29(3), 5605–5633. <http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1007/s11831-022-09778-9>

Steinrücke, M. (2011). An approach to integrate production-transportation planning and scheduling in an aluminium supply chain network. *International Journal of Production Research*, 49(21), 6559–6583. <http://dx.doi.org/10.1080/00207543.2010.528461>. Récupéré de <https://doi.org/10.1080/00207543.2010.528461>

Tang, L., Liu, J., Rong, A. et Yang, Z. (2000). A multiple traveling salesman problem model for hot rolling scheduling in shanghai baoshan iron steel complex. *European Journal of Operational Research*, 124(2), 267–282. [http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(99\)00380-X](http://dx.doi.org/https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00380-X). Récupéré de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037722179900380X>

Wikipedia (2023). Production de l'aluminium par électrolyse. https://fr.wikipedia.org/wiki/Production_de_l%27aluminium_par_%C3%A9lectrolyse [Accessed : (2024-05-26)].

Williams, H. P. (2013). *Model building in mathematical programming*. Hoboken, N.J. : Wiley. Récupéré de <https://ebookcentral.proquest.com/lib/uvic/detail.action?docID=1120846>

Özlen, M., . A. M. n. (2009). Multi-objective integer programming : A general approach for generating all non-dominated solutions. *European Journal of Operational Research*, 199(1). <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejor.2008.10.023>

APPENDICE A

PREMIÈRE ANNEXE

A.1 TABLEAUX DES RÉSULTATS DE LA PREMIÈRE INSTANCE

A.1.1 DONNÉES DU PROBLÈME

TABLEAU A.1 : Planification de siphonnage (1^{ière} instance)

No.	Tournée	Heure de siphonnage	Poids à siphonner (kg)	Fe (%)	Si (%)	Profit
1		21h35	12 690	0,0783	0,0354	30
2		21h45	12 900	0,0687	0,054	30
3		21h50	12 850	0,0812	0,0464	30
4		22h05	12 700	0,0598	0,0285	50
5		22h15	13 130	0,0784	0,0494	30
6		22h20	13 200	0,0853	0,0453	30
7		22h35	13 010	0,0765	0,0386	30
8		22h45	12 910	0,0719	0,0432	30
9		22h50	13 120	0,0803	0,0438	30
10		23h05	13 180	0,0753	0,0388	30
11		23h15	13 030	0,092	0,0534	30
12		23h20	13 140	0,0856	0,042	30
13		23h35	12 390	0,0635	0,0376	50
14		23h45	13 120	0,0871	0,0473	30
15		23h50	12 520	0,0822	0,0375	30
16		00h05	13 180	0,0926	0,0451	30

TABLEAU A.2 : Planification de siphonnage (1^{ière} instance)

No. Tournée	Heure de siphonnage	Poids à siphonner (kg)	Fe (%)	Si (%)	Profit
17	00h15	12 260	0,0845	0,049	30
18	00h20	12 860	0,0728	0,0366	30
19	00h35	13 160	0,0599	0,039	50
20	00h45	13 130	0,0858	0,045	30
21	00h50	13 010	0,0719	0,0428	30
22	01h05	13 150	0,0516	0,0293	50
23	01h15	12 210	0,0775	0,0428	30
24	01h20	13 160	0,0676	0,0384	30
25	01h35	12 910	0,0517	0,0283	50
26	01h45	12 000	0,0827	0,0436	30
27	01h50	13 130	0,0718	0,0352	30
28	02h05	11 750	0,0747	0,04	30
29	02h15	10 330	0,092	0,0445	30
30	02h20	13 140	0,0771	0,0357	30
31	02h35	10 370	0,0756	0,0441	30
32	02h45	11 180	0,095	0,0396	30

TABLEAU A.3 : Planification de siphonnage (1^{ière} instance)

No. Tournée	Heure de siphonnage	Poids à siphonner (kg)	Fe (%)	Si (%)	Profit
33	02h50	14 720	0,0744	0,0379	30
34	03h05	11 000	0,0785	0,0364	30
35	03h15	12 010	0,0886	0,0538	30
36	03h20	12 010	0,0675	0,0353	30
37	03h35	13 370	0,0682	0,0329	30
38	03h45	13 710	0,0831	0,0444	30
39	03h50	13 910	0,0604	0,0374	50
40	04h05	10 550	0,0638	0,0349	50
41	04h15	12 010	0,0806	0,0418	30
42	04h35	12 010	0,0817	0,0373	30
43	04h45	11 180	0,0749	0,0401	30
44	05h15	13 370	0,0679	0,0356	30

TABLEAU A.4 : Planification des demandes de four (1^{ière} instance)

No. Four	Heure début	Heure fin	Quantité min.	Quantité max.	Fe (%)	Si (%)
1	19h30	21h30	3 680	3 680	0,4961	0,5102
2	21h30	00h30	107 289	107 289	0,085	0,05
3	02h30	05h30	99 866	99 866	0,08	0,09

TABLEAU A.5 : Planification des demandes de transport (1^{ière} instance)

No. Transport	Heure début	Heure fin	Quantité min.	Quantité max.	Fe (%)	Si (%)
1	00h45	02h45	24 000	24 000	0,08	0,06
2	02h30	04h30	26 000	26 000	0,08	0,06

A.1.2 RÉSULTAT DE L'OPTIMISATION

TABLEAU A.6 : Assignation à la demande de four 1 (1^{ière} instance)

No. Tournée	Heure siphonné	Poids assigné	Heure d'assignation	Fe (%)	Si (%)
1	21h35	3 680	22h00	0,0783	0,0354
Total	-	3 680	-	0,0783	0,0354

TABLEAU A.7 : Assignation à la demande de four 2 (1^{ière} instance)

No. Tournée	Heure siphonné	Poids assigné	Heure d'assignation	Fe (%)	Si (%)
2	21h45	12 900	22h15	0,0687	0,054
5	22h15	13 130	22h45	0,0784	0,0494
6	22h20	13 200	23h00	0,0853	0,0453
7	22h35	13 010	23h15	0,0765	0,0386
8	22h45	12 910	23h30	0,0719	0,0432
9	22h50	13 120	23h45	0,0803	0,0438
10	23h05	13 180	00h00	0,0753	0,0388
12	23h20	13 140	00h15	0,0856	0,042
Total	-	104 590	-	0,0778	0,0444

TABLEAU A.8 : Assiguation à la demande de four 3 (1^{ière} instance)

No. Tournée	Heure siphonné	Poids assigné	Heure d'assiguation	Fe (%)	Si (%)
20	00h45	13 130	02h30	0,0858	0,045
27	01h50	13 130	02h45	0,0718	0,0352
30	02h20	13 140	03h00	0,0771	0,0357
31	02h35	10 370	03h15	0,0756	0,0441
34	03h05	11 000	03h30	0,0785	0,0364
35	03h15	12 010	03h45	0,0886	0,0538
37	03h35	13 370	04h00	0,0682	0,0329
38	03h45	13 710	04h15	0,0831	0,0444
Total	-	99 860	-	0,0785	0,0408

TABLEAU A.9 : Assiguation à la demande de transport 1 (1^{ière} instance)

No. Tournée	Heure siphonné	Poids assigné	Heure d'assiguation	Fe (%)	Si (%)
23	01h15	12 210	01h45	0,0775	0,0428
28	02h05	11 750	02h30	0,0747	0,04
Total	-	23 960	-	0,0761	0,0414

TABLEAU A.10 : Assiguation à la demande de transport 2 (1^{ière} instance)

No. Tournée	Heure siphonné	Poids assigné	Heure d'assiguation	Fe (%)	Si (%)
36	03h20	12 010	03h45	0,0675	0,0353
39	03h50	13 910	04h15	0,0604	0,0374
Total	-	25 920	-	0,0637	0,0364

TABLEAU A.11 : Assignation au carrousel (1^{ière} instance)

No.	Tournée	Heure siphonné	Poids assigné	Heure d'assignation	Fe (%)	Si (%)	Profit
	3	21h50	12 850	22h15	0,0812	0,0464	30
	1	21h35	9 010	22h45	0,0783	0,0354	30
	4	22h05	12 700	23h15	0,0598	0,0285	50
	11	23h15	13 030	23h45	0,092	0,0534	30
	13	23h35	12 390	00h15	0,0635	0,0376	50
	15	23h50	12 520	00h45	0,0822	0,0375	30
	17	00h15	12 260	01h15	0,0845	0,049	30
	18	00h20	12 860	01h45	0,0728	0,0366	30
	19	00h35	13 160	02h15	0,0599	0,039	50
	22	01h05	13 150	02h45	0,0516	0,0293	50
	25	01h35	12 910	03h15	0,0517	0,0283	50
	29	02h15	10 330	03h45	0,092	0,0445	30
	32	02h45	11 180	04h15	0,095	0,0396	30
	33	02h50	14 720	04h45	0,0744	0,0379	30
	40	04h05	10 550	05h15	0,0638	0,0349	50
	41	04h15	12 010	05h45	0,0806	0,0418	30
	42	04h35	12 010	06h15	0,0817	0,0373	30
	43	04h45	11 180	06h45	0,0749	0,0401	30
	44	05h15	13 370	07h15	0,0679	0,0356	30

TABLEAU A.12 : Détail de la fonction objectif (1^{ière} instance)

Obj. 1	Obj. 2	Obj. 3	Obj. 4	Obj. 5	Obj. 6	Obj. 7	Obj. 8
8 462,9	-1 590	-1 250	-150	0	-3 610	-270 500	-12 000

APPENDICE B

DEUXIÈME ANNEXE

B.1 TABLEAUX DES RÉSULTATS DE LA DEUXIÈME INSTANCE

B.1.1 DONNÉES DU PROBLÈME

TABLEAU B.1 : Planification de siphonnage ($2^{ième}$ instance)

No.	Tournée	Heure de siphonnage	Poids à siphonner (kg)	Fe (%)	Si (%)	Profit
1		19h25	13 130	0,0944	0,0415	30
2		19h25	12 860	0,0761	0,042	30
3		19h25	13 110	0,067	0,0367	30
4		19h55	13 110	0,082	0,0412	30
5		19h55	12 860	0,0798	0,0488	30
6		19h55	12 810	0,0688	0,0336	30
7		20h25	12 910	0,0737	0,0354	30
8		20h25	13 010	0,0762	0,0465	30
9		20h25	13 160	0,0932	0,0478	30
10		20h55	13 110	0,0799	0,0454	30
11		20h55	13 171	0,0689	0,0353	30
12		20h55	12 790	0,0955	0,0456	30
13		21h25	13 110	0,0699	0,0298	30
14		21h25	13 160	0,0842	0,052	30
15		21h25	12 860	0,0538	0,0474	40
16		21h55	12 770	0,087	0,0421	30

TABLEAU B.2 : Planification de siphonnage (2^{ième} instance)

No.	Tournée	Heure de siphonnage	Poids à siphonner (kg)	Fe (%)	Si (%)	Profit
17		21h55	12 600	0,0789	0,0467	30
18		21h55	13 200	0,0745	0,0344	30
19		22h25	13 200	0,0778	0,0438	30
20		22h25	13 140	0,0787	0,0365	30
21		22h25	13 200	0,0728	0,0375	30
22		22h55	13 110	0,0712	0,0398	30
23		22h55	13 130	0,0984	0,0494	30
24		22h55	12 960	0,0883	0,0389	30
25		23h25	12 320	0,0866	0,0501	30
26		23h25	13 190	0,067	0,0385	30
27		23h25	13 110	0,0794	0,0392	30
28		23h55	12 380	0,0827	0,0495	30
29		23h55	12 390	0,0708	0,0399	30
30		23h55	12 610	0,0695	0,0424	30
31		00h25	12 860	0,0844	0,0429	30
32		00h25	12 490	0,0778	0,0387	30

TABLEAU B.3 : Planification de siphonnage (2^{ième} instance)

No. Tournée	Heure de siphonnage	Poids à siphonner (kg)	Fe (%)	Si (%)	Profit
33	00h25	12 520	0,0679	0,0375	30
34	00h55	12 230	0,0614	0,0343	50
35	00h55	12 860	0,0906	0,048	30
36	00h55	13 180	0,0651	0,0387	30
37	01h25	13 160	0,0818	0,0432	30
38	01h25	12 340	0,0759	0,0389	30
39	01h25	13 110	0,0891	0,0395	30
40	01h55	12 610	0,0951	0,0442	30
41	01h55	13 070	0,0755	0,0384	30
42	01h55	13 130	0,0839	0,0347	30
43	02h25	13 150	0,0821	0,0512	30
44	02h25	12 390	0,083	0,0351	30
45	02h25	11 370	0,0845	0,049	30
46	02h55	13 170	0,0779	0,0379	30
47	02h55	13 190	0,0795	0,043	30
48	02h55	11 850	0,0775	0,035	30

TABLEAU B.4 : Planification de siphonnage (2^{ième} instance)

No. Tournée	Heure de siphonnage	Poids à siphonner (kg)	Fe (%)	Si (%)	Profit
49	03h25	13 370	0,0711	0,0383	30
50	03h25	12 310	0,0865	0,0421	30
51	03h25	12 230	0,068	0,0348	30
52	03h55	12 900	0,0594	0,0414	50
53	03h55	12 700	0,071	0,0348	30
54	03h55	10 370	0,0659	0,0372	30
55	04h25	10 330	0,0656	0,0358	30

TABLEAU B.5 : Planification des demandes de four (2^{ième} instance)

No. Four	Heure début	Heure fin	Quantité min.	Quantité max.	Fe (%)	Si (%)
1	18h30	21h30	57 367	57 367	0,091	0,0744
2	20h30	23h30	101 240	101 240	0,075	0,06
3	23h30	02h30	85 456	85 456	0,08	0,08
4	02h30	05h30	77 569	77 569	0,08	0,09

TABLEAU B.6 : Planification des demandes de transport (2^{ième} instance)

No. Transport	Heure début	Heure fin	Quantité min.	Quantité max.	Fe (%)	Si (%)
1	23h45	01h45	19 750	19 750	0,08	0,06
2	02h30	04h30	20 250	20 250	0,085	0,05

B.1.2 RÉSULTAT DE L'OPTIMISATION

TABLEAU B.7 : Assignation à la demande de four 1 (2^{ième} instance)

No. Tournée	Heure siphonné	Poids assigné	Heure d'assignation	Fe (%)	Si (%)
3	19h25	13 110	19h55	0,067	0,0367
1	19h25	13 130	20h10	0,0944	0,0415
8	20h25	13 010	20h55	0,0762	0,0465
9	20h25	13 160	21h10	0,0932	0,0478
Total	-	52 410	-	0,0827	0,0431

TABLEAU B.8 : Assignation à la demande de four 2 (2^{ième} instance)

No. Tournée	Heure siphonné	Poids assigné	Heure d'assignation	Fe (%)	Si (%)
4	19h55	13 110	20h25	0,082	0,0412
11	20h55	13 171	21h25	0,0689	0,0353
15	21h25	12 860	21h55	0,0538	0,0474
14	21h25	13 160	22h10	0,0842	0,052
13	21h25	13 110	22h25	0,0699	0,0298
18	21h55	13 200	22h40	0,0745	0,0344
21	22h25	13 200	22h55	0,0728	0,0375
Total	-	91 811	-	0,0723	0,0396

TABLEAU B.9 : Assiguation à la demande de four 3 (2^{ième} instance)

No. Tournée	Heure siphonné	Poids assigné	Heure d'assiguation	Fe (%)	Si (%)
20	22h25	13 140	23h25	0,0787	0,0365
23	22h55	13 130	23h40	0,0984	0,0494
22	22h55	13 110	23h55	0,0712	0,0398
26	23h25	13 190	00h10	0,067	0,0385
28	23h55	12 380	00h25	0,0827	0,0495
29	23h55	12 390	00h40	0,0708	0,0399
30	23h55	8 116	00h55	0,0695	0,0424
Total	-	85 456	-	0,0773	0,0422

TABLEAU B.10 : Assiguation à la demande de four 4 (2^{ième} instance)

No. Tournée	Heure siphonné	Poids assigné	Heure d'assiguation	Fe (%)	Si (%)
36	00h55	13 180	02h25	0,0651	0,0387
35	00h55	12 860	02h40	0,0906	0,048
39	01h25	13 110	02h55	0,0891	0,0395
43	02h25	13 150	03h10	0,0821	0,0512
48	02h55	11 850	03h25	0,0775	0,035
49	03h25	13 370	03h55	0,0711	0,0383
Total	-	77 520	-	0,0792	0,0419

TABLEAU B.11 : Assiguation à la demande de transport 1 (2^{ième} instance)

No. Tournée	Heure siphonné	Poids assigné	Heure d'assiguation	Fe (%)	Si (%)
19	22h25	13 200	23h40	0,0778	0,0438
30	23h55	4 494	00h25	0,0695	0,0424
Total	-	17 694	-	0,0757	0,0435

TABLEAU B.12 : Assignation à la demande de transport 2 (2^{ième} instance)

No. Tournée	Heure siphonné	Poids assigné	Heure d'assignation	Fe (%)	Si (%)
51	03h25	12 230	03h55	0,068	0,0348
Total	-	12 230	-	0,068	0,0348

TABLEAU B.13 : Assignation au carrousel (2^{ième} instance)

No. Tournée	Heure siphonné	Poids assigné	Heure d'assignation	Fe (%)	Si (%)	Profit
2	19h25	12 860	19h55	0,0761	0,042	30
6	19h55	12 810	20h25	0,0688	0,0336	30
5	19h55	12 860	20h55	0,0798	0,0488	30
7	20h25	12 910	21h25	0,0737	0,0354	30
16	21h55	12 770	22h25	0,087	0,0421	30
24	22h55	12 960	23h25	0,0883	0,0389	30
27	23h25	13 110	23h55	0,0794	0,0392	30
32	00h25	12 490	00h55	0,0778	0,0387	30
31	00h25	12 860	01h25	0,0844	0,0429	30
33	00h25	12 520	02h25	0,0679	0,0375	30
34	00h55	12 230	02h55	0,0614	0,0343	50
37	01h25	13 160	03h25	0,0818	0,0432	30

TABLEAU B.14 : Assignation au carrousel (2^{ième} instance)

No.	Tournée	Heure siphonné	Poids assigné	Heure d'assignation	Fe (%)	Si (%)	Profit
40		01h55	12 610	03h55	0,0951	0,0442	30
44		02h25	12 390	04h25	0,083	0,0351	30
47		02h55	13 190	04h55	0,0795	0,043	30
46		02h55	13 170	05h25	0,0779	0,0379	30
50		03h25	12 310	05h55	0,0865	0,0421	30
52		03h55	12 900	06h25	0,0594	0,0414	50
54		03h55	10 370	06h55	0,0659	0,0372	30
53		03h55	12 700	07h25	0,071	0,0348	30
55		04h25	10 330	07h55	0,0656	0,0358	30

TABLEAU B.15 : Détail de la fonction objectif (2^{ième} instance)

Obj. 1	Obj. 2	Obj. 3	Obj. 4	Obj. 5	Obj. 6	Obj. 7	Obj. 8
8 407,9	-2 130	-1 790	-200	0	-6 020	-1 443 500	-1 007 600

APPENDICE C

TROISIÈME ANNEXE

C.1 TABLEAUX DES RÉSULTATS DE LA TROISIÈME INSTANCE

C.1.1 DONNÉES DU PROBLÈME

TABLEAU C.1 : Planification de siphonnage ($3^{ième}$ instance)

No.	Tournée	Heure de siphonnage	Poids à siphonner (kg)	Fe (%)	Si (%)	Profit
1		20h15	12 650	0,0851	0,0418	30
2		20h25	13 130	0,0672	0,0323	30
3		20h35	13 080	0,0815	0,0411	30
4		20h45	12 380	0,0754	0,0465	30
5		20h55	12 880	0,071	0,0352	30
6		21h05	13 130	0,0832	0,0447	30
7		21h15	12 910	0,0737	0,0436	30
8		21h25	13 180	0,0727	0,0339	30
9		21h35	12 890	0,0907	0,0452	30
10		21h45	13 130	0,0803	0,047	30
11		21h55	13 101	0,0665	0,0366	30
12		22h05	13 150	0,0534	0,0481	40
13		22h15	13 110	0,0821	0,0427	30
14		22h25	13 200	0,0767	0,034	30
15		22h35	12 390	0,0765	0,0423	30
16		22h45	13 180	0,0763	0,0421	30

TABLEAU C.2 : Planification de siphonnage (3^{ième} instance)

No. Tournée	Heure de siphonnage	Poids à siphonner (kg)	Fe (%)	Si (%)	Profit
17	22h55	13 190	0,0608	0,0278	50
18	23h05	12 230	0,0599	0,0341	50
19	23h15	13 110	0,0817	0,0384	30
20	23h25	12 410	0,0691	0,0355	30
21	23h35	12 640	0,0964	0,0489	30
22	23h45	13 190	0,0797	0,0386	30
23	23h55	13 200	0,0719	0,0388	30
24	00h05	13 130	0,0817	0,0459	30
25	00h15	12 360	0,0798	0,0636	30
26	00h25	12 290	0,0751	0,0391	30
27	00h35	13 150	0,0781	0,0492	30
28	00h45	12 380	0,0649	0,0394	30
29	00h55	13 120	0,0588	0,0404	50
30	01h05	13 130	0,0892	0,0431	30
31	01h15	13 110	0,0704	0,0371	30
32	01h25	13 110	0,0815	0,0401	30

TABLEAU C.3 : Planification de siphonnage (3^{ième} instance)

No. Tournée	Heure de siphonnage	Poids à siphonner (kg)	Fe (%)	Si (%)	Profit
33	01h35	13 170	0,0907	0,0486	30
34	01h45	12 430	0,0829	0,0348	30
35	01h55	13 110	0,0492	0,029	50
36	02h05	13 160	0,0879	0,0396	30
37	02h15	13 200	0,0758	0,0347	30
38	02h25	13 130	0,0846	0,0465	30
39	02h35	12 810	0,0947	0,0385	30
40	02h45	13 030	0,0756	0,0378	30
41	02h55	12 860	0,0767	0,0374	30
42	03h05	12 610	0,088	0,0451	30
43	03h15	12 810	0,0705	0,0363	30
44	03h25	12 890	0,079	0,0409	30
45	03h35	12 700	0,0782	0,0483	30
46	03h45	14 160	0,0626	0,0371	50
47	03h55	12 640	0,0787	0,0413	30
48	04h05	13 180	0,0814	0,0425	30

TABLEAU C.4 : Planification de siphonnage (3^{ième} instance)

No. Tournée	Heure de siphonnage	Poids à siphonner (kg)	Fe (%)	Si (%)	Profit
49	04h25	12 530	0,0668	0,035	30
50	04h35	12 340	0,0824	0,0424	30
51	04h55	13 130	0,0646	0,0362	30
52	05h05	12 180	0,0698	0,0346	30
53	05h25	11 690	0,0894	0,0355	30

TABLEAU C.5 : Planification des demandes de four (3^{ième} instance)

No. Four	Heure début	Heure fin	Quantité min.	Quantité max.	Fe (%)	Si (%)
1	20h30	23h30	84 123	84 123	0,085	0,1
2	22h30	00h30	97 702	97 702	0,09	0,07
3	01h30	04h30	110 238	110 238	0,09	0,06

TABLEAU C.6 : Planification des demandes de transport (3^{ième} instance)

No. Transport	Heure début	Heure fin	Quantité min.	Quantité max.	Fe (%)	Si (%)
1	20h45	22h45	40 000	40 000	0,08	0,06
2	02h30	04h30	20 500	20 500	0,085	0,065
3	04h15	06h15	21 500	21 500	0,08	0,065

C.1.2 RÉSULTAT DE L'OPTIMISATION

TABLEAU C.7 : Assignation à la demande de four 1 (3^{ième} instance)

No. Tournée	Heure siphonné	Poids assigné	Heure d'assignation	Fe (%)	Si (%)
3	20h35	13 080	21h00	0,0815	0,0411
6	21h05	13 130	21h30	0,0832	0,0447
8	21h25	13 180	21h45	0,0727	0,0339
9	21h35	12 890	22h00	0,0907	0,0452
11	21h55	13 101	22h15	0,0665	0,0366
16	22h45	13 180	23h15	0,0763	0,0421
Total	-	78 561	-	0,0784	0,0406

TABLEAU C.8 : Assignation à la demande de four 2 (3^{ième} instance)

No. Tournée	Heure siphonné	Poids assigné	Heure d'assignation	Fe (%)	Si (%)
12	22h05	13 150	22h30	0,0534	0,0481
13	22h15	13 110	22h45	0,0821	0,0427
14	22h25	13 200	23h00	0,0767	0,034
17	22h55	13 190	23h30	0,0608	0,0278
19	23h15	13 110	23h45	0,0817	0,0384
21	23h35	12 640	00h00	0,0964	0,0489
23	23h55	13 200	00h15	0,0719	0,0388
Total	-	91 600	-	0,0746	0,0398

TABLEAU C.9 : Assignation à la demande de four 3 (3^{ième} instance)

No. Tournée	Heure siphonné	Poids assigné	Heure d'assignation	Fe (%)	Si (%)
22	23h45	13 190	01h30	0,0797	0,0386
27	00h35	13 150	01h45	0,0781	0,0492
30	01h05	13 130	02h00	0,0892	0,0431
31	01h15	13 110	02h15	0,0704	0,0371
33	01h35	13 170	02h30	0,0907	0,0486
36	02h05	13 160	02h45	0,0879	0,0396
37	02h15	13 200	03h00	0,0758	0,0347
46	03h45	14 160	04h15	0,0626	0,0371
Total	-	106 270	-	0,0791	0,0409

TABLEAU C.10 : Assignation à la demande de transport 1 (3^{ième} instance)

No. Tournée	Heure siphonné	Poids assigné	Heure d'assignation	Fe (%)	Si (%)
2	20h25	13 130	20h45	0,0672	0,0323
5	20h55	12 880	21h15	0,071	0,0352
10	21h45	13 130	22h15	0,0803	0,047
Total	-	39 140	-	0,0729	0,0382

TABLEAU C.11 : Assignation à la demande de transport 2 (3^{ième} instance)

No. Tournée	Heure siphonné	Poids assigné	Heure d'assignation	Fe (%)	Si (%)
29	00h55	13 120	02h30	0,0588	0,0404
38	02h25	7 380	02h45	0,0846	0,0465
Total	-	20 500	-	0,0681	0,0426

TABLEAU C.12 : Assignation à la demande de transport 3 (3^{ième} instance)

No.	Tournée	Heure siphonné	Poids assigné	Heure d'assignation	Fe (%)	Si (%)
38		02h25	5 750	04h15	0,0846	0,0465
40		02h45	13 030	04h30	0,0756	0,0378
Total		-	18 780	-	0,0784	0,0404

TABLEAU C.13 : Assignation au carrousel (3^{ième} instance)

No.	Tournée	Heure siphonné	Poids assigné	Heure d'assignation	Fe (%)	Si (%)	Profit
1		20h15	12 650	20h45	0,0851	0,0418	30
4		20h45	12 380	21h15	0,0754	0,0465	30
7		21h15	12 910	21h45	0,0737	0,0436	30
15		22h35	12 390	23h00	0,0765	0,0423	30
18		23h05	12 230	23h30	0,0599	0,0341	50
20		23h25	12 410	00h15	0,0691	0,0355	30
24		00h05	13 130	00h45	0,0817	0,0459	30
26		00h25	12 290	01h15	0,0751	0,0391	30
28		00h45	12 380	01h45	0,0649	0,0394	30
32		01h25	13 110	02h15	0,0815	0,0401	30
34		01h45	12 430	02h45	0,0829	0,0348	30
35		01h55	13 110	03h15	0,0492	0,029	50

TABLEAU C.14 : Assignation au carrousel (3^{ième} instance)

No. Tournée	Heure siphonné	Poids assigné	Heure d'assignation	Fe (%)	Si (%)	Profit
41	02h55	12 860	03h45	0,0767	0,0374	30
42	03h05	12 610	04h15	0,088	0,0451	30
43	03h15	12 810	04h45	0,0705	0,0363	30
44	03h25	12 890	05h15	0,079	0,0409	30
45	03h35	12 700	05h45	0,0782	0,0483	30
47	03h55	12 640	06h15	0,0787	0,0413	30
48	04h05	13 180	06h45	0,0814	0,0425	30
49	04h25	12 530	07h15	0,0668	0,035	30
50	04h35	12 340	07h45	0,0824	0,0424	30
51	04h55	13 130	08h15	0,0646	0,0362	30
52	05h05	12 180	08h45	0,0698	0,0346	30
53	05h25	11 690	09h15	0,0894	0,0355	30

TABLEAU C.15 : Détail de la fonction objectif (3^{ième} instance)

Obj. 1	Obj. 2	Obj. 3	Obj. 4	Obj. 5	Obj. 6	Obj. 7	Obj. 8
9 596,2	-2 430	-1 990	0	131,3	-1 390	-1 563 200	-358 000

APPENDICE D

QUATRIÈME ANNEXE

D.1 TABLEAUX DES RÉSULTATS DE LA QUATRIÈME INSTANCE

DONNÉES DU PROBLÈME

TABLEAU D.1 : Planification de siphonnage ($4^{ième}$ instance)

No.	Tournée	Heure de siphonnage	Poids à siphonner (kg)	Fe (%)	Si (%)	Profit
1		19h20	13 200	0,0722	0,0356	30
2		19h20	12 910	0,0744	0,0383	30
3		19h20	13 111	0,0897	0,0391	30
4		19h50	13 141	0,0676	0,0332	30
5		19h50	13 060	0,079	0,039	30
6		19h50	13 180	0,0704	0,0452	30
7		20h20	12 910	0,0758	0,0392	30
8		20h20	13 110	0,0659	0,0342	30
9		20h20	12 640	0,0687	0,0448	30
10		20h50	13 050	0,066	0,0336	30
11		20h50	13 130	0,071	0,04	30
12		20h50	12 380	0,0745	0,0407	30
13		21h20	13 110	0,0793	0,0422	30
14		21h20	13 150	0,0733	0,0366	30
15		21h20	12 590	0,0922	0,0477	30
16		21h50	12 910	0,078	0,0408	30

TABLEAU D.2 : Planification de siphonnage (4^{ième} instance)

No. Tournée	Heure de siphonnage	Poids à siphonner (kg)	Fe (%)	Si (%)	Profit
17	21h50	13 000	0,074	0,0386	30
18	21h50	13 120	0,0748	0,0367	30
19	22h20	12 510	0,0805	0,0387	30
20	22h20	13 110	0,0851	0,0468	30
21	22h20	13 180	0,0751	0,0365	30
22	22h50	12 900	0,0934	0,0376	30
23	22h50	12 370	0,0737	0,0351	30
24	22h50	12 810	0,0785	0,0394	30
25	23h20	12 850	0,0788	0,0406	30
26	23h20	12 650	0,0859	0,0471	30
27	23h20	13 171	0,0973	0,1004	30
28	23h50	12 740	0,0786	0,0434	30
29	23h50	13 150	0,0923	0,0475	30
30	23h50	13 150	0,0763	0,0406	30
31	00h20	12 490	0,0831	0,0437	30
32	00h20	13 190	0,0636	0,0433	50

TABLEAU D.3 : Planification de siphonnage (4^{ième} instance)

No. Tournée	Heure de siphonnage	Poids à siphonner (kg)	Fe (%)	Si (%)	Profit
33	00h20	12 380	0,0725	0,0361	30
34	00h50	12 750	0,0865	0,0456	30
35	00h50	13 140	0,07	0,0403	30
36	00h50	11 220	0,0942	0,0346	30
37	01h20	10 700	0,0823	0,0367	30
38	01h20	13 010	0,0757	0,0414	30
39	01h20	13 110	0,1007	0,0468	10
40	01h50	10 750	0,0739	0,0376	30
41	01h50	11 750	0,0757	0,0441	30
42	01h50	13 120	0,0841	0,0418	30
43	02h20	12 380	0,0761	0,042	30
44	02h20	13 010	0,0762	0,0364	30
45	02h20	13 110	0,0803	0,0405	30
46	02h50	13 200	0,0805	0,042	30
47	02h50	9 700	0,0827	0,0395	30
48	03h20	12 390	0,0694	0,0376	30

TABLEAU D.4 : Planification de siphonnage (4^{ième} instance)

No. Tournée	Heure de siphonnage	Poids à siphonner (kg)	Fe (%)	Si (%)	Profit
49	03h50	13 170	0,0603	0,038	50
50	04h20	13 060	0,0575	0,0378	50
51	04h50	11 180	0,0468	0,0382	50

TABLEAU D.5 : Planification des demandes de four (4^{ième} instance)

No. Four	Heure début	Heure fin	Quantité min.	Quantité max.	Fe (%)	Si (%)
1	19h30	22h30	25 775	25 775	0,0818	0,0562
2	21h30	00h30	86 165	86 165	0,075	0,09
3	01h30	04h30	4 645	4 645	0,1302	0,2635
4	05h30	09h30	101 236	101 236	0,08	0,06

TABLEAU D.6 : Planification des demandes de transport (4^{ième} instance)

No. Transport	Heure début	Heure fin	Quantité min.	Quantité max.	Fe (%)	Si (%)
1	20h00	22h00	13 595	13 595	0,0817	0,0692
2	22h30	00h30	21 000	21 000	0,075	0,06
3	03h30	05h30	30 000	30 000	0,08	0,06
4	04h00	06h00	20 000	20 000	0,075	0,06

D.1.1 RÉSULTAT DE L'OPTIMISATION

TABLEAU D.7 : Assiguation à la demande de four 1 (4^{ième} instance)

No. Tournée	Heure siphonné	Poids assigné	Heure d'assiguation	Fe (%)	Si (%)
1	19h20	13 200	19h50	0,0722	0,0356
12	20h50	12 380	22h05	0,0745	0,0407
Total	-	25 580	-	0,0733	0,0381

TABLEAU D.8 : Assiguation à la demande de four 2 (4^{ième} instance)

No. Tournée	Heure siphonné	Poids assigné	Heure d'assiguation	Fe (%)	Si (%)
6	19h50	13 180	21h20	0,0704	0,0452
8	20h20	13 110	21h35	0,0659	0,0342
11	20h50	13 130	21h50	0,071	0,04
14	21h20	13 150	22h20	0,0733	0,0366
16	21h50	12 910	22h35	0,078	0,0408
21	22h20	13 180	22h50	0,0751	0,0365
20	22h20	7 505	23h20	0,0851	0,0468
Total	-	86 165	-	0,0734	0,0396

TABLEAU D.9 : Assiguation à la demande de four 4 (4^{ième} instance)

No. Tournée	Heure siphonné	Poids assigné	Heure d'assiguation	Fe (%)	Si (%)
48	03h20	12 390	05h20	0,0694	0,0376
49	03h50	13 170	05h35	0,0603	0,038
50	04h20	13 060	05h50	0,0575	0,0378
51	04h50	11 180	06h05	0,0468	0,0382
Total	-	49 800	-	0,0588	0,0379

TABLEAU D.10 : Assignation à la demande de transport 1 (*4^{ième} instance*)

No.	Tournée	Heure siphonné	Poids assigné	Heure d'assignation	Fe (%)	Si (%)
4		19h50	13 141	20h20	0,0676	0,0332
Total		-	13 141	-	0,0676	0,0332

TABLEAU D.11 : Assignation à la demande de transport 2 (4^{ième} instance)

No. Tournée	Heure siphonné	Poids assigné	Heure d'assignation	Fe (%)	Si (%)
10	20h50	13 050	22h20	0,066	0,0336
20	22h20	5 605	22h50	0,0851	0,0468
Total	-	18 655	-	0,0717	0,0376

TABLEAU D.12 : Assignation à la demande de transport 3 (4^{ième} instance)

No. Tournée	Heure siphonné	Poids assigné	Heure d'assignation	Fe (%)	Si (%)
38	01h20	13 010	03h20	0,0757	0,0414
41	01h50	11 750	03h35	0,0757	0,0441
43	02h20	5 240	04h05	0,0761	0,042
Total	-	30 000	-	0,0758	0,0425

TABLEAU D.13 : Assignation à la demande de transport 4 (4^{ième} instance)

No. Tournée	Heure siphonné	Poids assigné	Heure d'assignation	Fe (%)	Si (%)
40	01h50	10 750	03h50	0,0739	0,0376
43	02h20	7 140	04h20	0,0761	0,042
Total	-	17 890	-	0,0748	0,0393

TABLEAU D.14 : Assiguation au carrousel (*4^{ième} instance*)

No. Tournée	Heure siphonné	Poids assigné	Heure d'assiguation	Fe (%)	Si (%)	Profit
3	19h20	13 111	19h50	0,0897	0,0391	30
2	19h20	12 910	20h20	0,0744	0,0383	30
5	19h50	13 060	20h50	0,079	0,039	30
7	20h20	12 910	21h20	0,0758	0,0392	30
9	20h20	12 640	21h50	0,0687	0,0448	30
13	21h20	13 110	22h20	0,0793	0,0422	30
19	22h20	12 510	22h50	0,0805	0,0387	30
22	22h50	12 900	23h20	0,0934	0,0376	30
26	23h20	12 650	23h50	0,0859	0,0471	30
25	23h20	12 850	00h20	0,0788	0,0406	30
29	23h50	13 150	00h50	0,0923	0,0475	30
32	00h20	13 190	01h20	0,0636	0,0433	50
33	00h20	12 380	01h50	0,0725	0,0361	30

TABLEAU D.15 : Assiguation au carrousel (*4^{ième} instance*)

No. Tournée	Heure siphonné	Poids assigné	Heure d'assiguation	Fe (%)	Si (%)	Profit
31	00h20	12 490	02h20	0,0831	0,0437	30
35	00h50	13 140	02h50	0,07	0,0403	30
36	00h50	11 220	03h20	0,0942	0,0346	30
34	00h50	12 750	03h50	0,0865	0,0456	30
37	01h20	10 700	04h20	0,0823	0,0367	30
42	01h50	13 120	04h50	0,0841	0,0418	30
45	02h20	13 110	05h20	0,0803	0,0405	30
44	02h20	13 010	05h50	0,0762	0,0364	30
47	02h50	9 700	06h20	0,0827	0,0395	30
46	02h50	13 200	06h50	0,0805	0,042	30

TABLEAU D.16 : Détail de la fonction objectif

Obj. 1	Obj. 2	Obj. 3	Obj. 4	Obj. 5	Obj. 6	Obj. 7	Obj. 8
8 958,13	-2 490	-2 240	-200	123,8	-7 050	-5 627 600	-490 900

APPENDICE E

CINQUIÈME ANNEXE

E.1 TABLEAUX DES RÉSULTATS DE LA CINQUIÈME INSTANCE

E.1.1 DONNÉES DU PROBLÈME

TABLEAU E.1 : Planification de siphonnage ($5^{ième}$ instance)

No.	Tournée	Heure de siphonnage	Poids à siphonner (kg)	Fe (%)	Si (%)	Profit
1		19h57	13 110	0,0683	0,0349	30
2		20h03	12 641	0,0854	0,037	30
3		20h06	12 800	0,0769	0,0444	30
4		20h35	12 640	0,0679	0,0409	30
5		20h40	13 130	0,0728	0,0379	30
6		21h00	13 160	0,0682	0,0349	30
7		21h05	12 860	0,0655	0,0417	30
8		21h10	13 160	0,0768	0,038	30
9		21h30	13 180	0,0723	0,0363	30
10		21h35	13 010	0,0638	0,0391	50
11		21h40	13 110	0,0646	0,0371	30
12		22h00	13 200	0,0753	0,0371	30
13		22h05	12 900	0,073	0,0391	30
14		22h10	13 190	0,0691	0,0381	30
15		22h30	13 131	0,0797	0,0425	30
16		22h35	13 110	0,0722	0,034	30

TABLEAU E.2 : Planification de siphonnage (5^{ième} instance)

No. Tournée	Heure de siphonnage	Poids à siphonner (kg)	Fe (%)	Si (%)	Profit
17	22h40	13 190	0,124	0,0495	10
18	23h00	12 240	0,0896	0,0388	30
19	23h05	12 810	0,0717	0,0402	30
20	23h10	13 110	0,0945	0,0426	30
21	23h30	13 010	0,0796	0,0377	30
22	23h35	13 180	0,0665	0,0322	30
23	23h40	13 160	0,0896	0,0507	30
24	00h00	13 170	0,0793	0,0389	30
25	00h05	13 160	0,0731	0,0347	30
26	00h10	13 190	0,0801	0,04	30
27	00h30	13 070	0,0721	0,0392	30
28	00h35	13 160	0,0979	0,0904	10
29	00h40	13 140	0,0848	0,0454	30
30	01h00	13 180	0,0781	0,0415	30
31	01h05	13 180	0,0683	0,0403	30
32	01h10	13 180	0,0834	0,0427	30

TABLEAU E.3 : Planification de siphonnage (5^{ième} instance)

No. Tournée	Heure de siphonnage	Poids à siphonner (kg)	Fe (%)	Si (%)	Profit
33	01h30	13 110	0,0761	0,0432	30
34	01h35	13 110	0,0629	0,0356	50
35	01h40	12 220	0,0847	0,0424	30
36	02h00	12 760	0,0827	0,0416	30
37	02h05	12 360	0,1073	0,0361	10
38	02h10	12 860	0,0864	0,0425	30
39	02h30	13 130	0,0779	0,039	30
40	02h35	12 890	0,086	0,0319	30
41	02h40	12 380	0,0807	0,0367	30
42	03h00	13 190	0,0781	0,0409	30
43	03h05	12 860	0,0669	0,0337	30
44	03h10	12 630	0,0819	0,0432	30
45	03h30	11 990	0,0694	0,0376	30
46	03h35	12 230	0,07	0,036	30
47	03h40	13 180	0,0792	0,0425	30
48	04h00	9 480	0,0561	0,035	50

TABLEAU E.4 : Planification de siphonnage (5^{ième} instance)

No. Tournée	Heure de siphonnage	Poids à siphonner (kg)	Fe (%)	Si (%)	Profit
49	04h05	11 180	0,0774	0,0327	30
50	04h30	11 850	0,0612	0,0354	50
51	04h35	11 180	0,0886	0,0381	30
52	05h00	12 000	0,0498	0,037	50

TABLEAU E.5 : Planification des demandes de four (5^{ième} instance)

No. Four	Heure début	Heure fin	Quantité min.	Quantité max.	Fe (%)	Si (%)
1	20h30	23h30	88 768	88 768	0,09	0,06
2	00h30	03h30	102 295	102 295	0,08	0,09
3	02h30	06h30	90 451	90 451	0,075	0,09

TABLEAU E.6 : Planification des demandes de transport (5^{ième} instance)

No. Transport	Heure début	Heure fin	Quantité min.	Quantité max.	Fe (%)	Si (%)
1	21h00	23h00	15 360	15 360	0,0871	0,08
2	02h00	04h00	28 000	28 000	0,08	0,06
3	03h30	05h30	30 000	30 000	0,08	0,06

RÉSULTAT DE L'OPTIMISATION

TABLEAU E.7 : Assignation à la demande de four 1 (5^{ième} instance)

No. Tournée	Heure siphonné	Poids assigné	Heure d'assignation	Fe (%)	Si (%)
2	20h03	12 641	20h45	0,0854	0,037
7	21h05	12 860	21h30	0,0655	0,0417
8	21h10	13 160	21h45	0,0768	0,038
1	19h57	10 390	22h00	0,0683	0,0349
9	21h30	13 180	22h15	0,0723	0,0363
12	22h00	13 200	22h30	0,0753	0,0371
17	22h40	13 190	23h00	0,124	0,0495
Total	-	88 621	-	0,0815	0,0393

TABLEAU E.8 : Assignation à la demande de four 2 (5^{ième} instance)

No. Tournée	Heure siphonné	Poids assigné	Heure d'assignation	Fe (%)	Si (%)
16	22h35	13 110	00h30	0,0722	0,034
18	23h00	12 240	00h45	0,0896	0,0388
19	23h05	12 810	01h00	0,0717	0,0402
22	23h35	13 180	01h15	0,0665	0,0322
24	00h00	13 170	01h30	0,0793	0,0389
25	00h05	13 160	01h45	0,0731	0,0347
35	01h40	12 220	02h00	0,0847	0,0424
41	02h40	12 380	03h00	0,0807	0,0367
Total	-	102 270	-	0,077	0,0372

TABLEAU E.9 : Assignation à la demande de four 3 (5^{ième} instance)

No. Tournée	Heure siphonné	Poids assigné	Heure d'assignation	Fe (%)	Si (%)
30	01h00	13 180	02h45	0,0781	0,0415
39	02h30	13 130	03h15	0,0779	0,039
40	02h35	12 890	03h30	0,086	0,0319
42	03h00	13 190	03h45	0,0781	0,0409
43	03h05	12 860	04h00	0,0669	0,0337
46	03h35	12 230	04h30	0,07	0,036
52	05h00	12 000	05h45	0,0498	0,037
Total	-	89 480	-	0,0727	0,0372

TABLEAU E.10 : Assignation à la demande de transport 1 (5^{ième} instance)

No. Tournée	Heure siphonné	Poids assigné	Heure d'assignation	Fe (%)	Si (%)
4	20h35	12 640	21h00	0,0679	0,0409
1	19h57	2 720	21h15	0,0683	0,0349
Total	-	15 360	-	0,068	0,0398

TABLEAU E.11 : Assignation à la demande de transport 2 (5^{ième} instance)

No. Tournée	Heure siphonné	Poids assigné	Heure d'assignation	Fe (%)	Si (%)
32	01h10	13 180	02h00	0,0834	0,0427
31	01h05	13 180	02h15	0,0683	0,0403
Total	-	26 360	-	0,0758	0,0415

TABLEAU E.12 : Assiguation à la demande de transport 3 (5^{ième} instance)

No. Tournée	Heure siphonné	Poids assigné	Heure d'assiguation	Fe (%)	Si (%)
33	01h30	13 110	03h30	0,0761	0,0432
47	03h40	13 180	04h00	0,0792	0,0425
Total	-	26 290	-	0,0777	0,0428

TABLEAU E.13 : Assiguation au carrousel (5^{ième} instance)

No. Tournée	Heure siphonné	Poids assigné	Heure d'assiguation	Fe (%)	Si (%)	Profit
3	20h06	12 800	20h45	0,0769	0,0444	30
5	20h40	13 130	21h15	0,0728	0,0379	30
6	21h00	13 160	21h45	0,0682	0,0349	30
10	21h35	13 010	22h15	0,0638	0,0391	50
13	22h05	12 900	22h45	0,073	0,0391	30
14	22h10	13 190	23h15	0,0691	0,0381	30
15	22h30	13 131	23h45	0,0797	0,0425	30
20	23h10	13 110	00h15	0,0945	0,0426	30
23	23h40	13 160	00h45	0,0896	0,0507	30
26	00h10	13 190	01h15	0,0801	0,04	30

TABLEAU E.14 : Assignation au carrousel (5^{ième} instance)

No. Tournée	Heure siphonné	Poids assigné	Heure d'assignation	Fe (%)	Si (%)	Profit
27	00h30	13 070	01h45	0,0721	0,0392	30
29	00h40	13 140	02h15	0,0848	0,0454	30
36	02h00	12 760	02h45	0,0827	0,0416	30
38	02h10	12 860	03h30	0,0864	0,0425	30
44	03h10	12 630	04h00	0,0819	0,0432	30
45	03h30	11 990	04h45	0,0694	0,0376	30
48	04h00	9 480	05h15	0,0561	0,035	50
49	04h05	11 180	05h45	0,0774	0,0327	30
50	04h30	11 850	06h15	0,0612	0,0354	50
51	04h35	11 180	06h45	0,0886	0,0381	30

TABLEAU E.15 : Détail de la fonction objectif (5^{ième} instance)

Obj. 1	Obj. 2	Obj. 3	Obj. 4	Obj. 5	Obj. 6	Obj. 7	Obj. 8
8 214,43	-1 455	-1 750	-200	0	-3 710	-114 300	-535 000

APPENDICE F

SIXIÈME ANNEXE

F.1 TABLEAUX DES RÉSULTATS DE LA SIXIÈME INSTANCE

F.1.1 DONNÉES DU PROBLÈME

TABLEAU F.1 : Planification de siphonnage (*6^{ième} instance*)

No.	Tournée	Heure de siphonnage	Poids à siphonner (kg)	Fe (%)	Si (%)	Profit
1		19h27	12 640	0,0693	0,0351	30
2		19h35	13 180	0,0699	0,0473	30
3		19h35	12 860	0,0766	0,0411	30
4		20h00	13 130	0,0727	0,0351	30
5		20h05	12 640	0,068	0,0395	30
6		20h05	12 540	0,0705	0,041	30
7		20h30	13 061	0,0678	0,0404	30
8		20h35	13 160	0,0725	0,038	30
9		20h35	12 860	0,0744	0,0469	30
10		21h00	12 710	0,0696	0,037	30
11		21h05	12 860	0,0635	0,0389	50
12		21h05	13 010	0,0869	0,0379	30
13		21h30	12 520	0,0844	0,0376	30
14		21h35	12 490	0,0748	0,0404	30
15		21h35	13 150	0,1096	0,0456	10
16		22h00	13 200	0,0798	0,034	30

TABLEAU F.2 : Planification de siphonnage (6^{ième} instance)

No.	Tournée	Heure de siphonnage	Poids à siphonner (kg)	Fe (%)	Si (%)	Profit
17		22h05	12 500	0,1397	0,0449	10
18		22h05	12 740	0,0764	0,0383	30
19		22h30	13 200	0,061	0,0398	50
20		22h35	13 010	0,0791	0,0407	30
21		22h35	13 130	0,073	0,0383	30
22		23h00	13 110	0,0565	0,0373	50
23		23h05	12 490	0,0718	0,0366	30
24		23h05	13 110	0,0744	0,0395	30
25		23h30	12 440	0,0436	0,0413	100
26		23h35	13 130	0,0785	0,0352	30
27		23h35	12 910	0,0614	0,0394	50
28		00h00	13 131	0,0747	0,0383	30
29		00h05	13 190	0,0825	0,0577	30
30		00h05	13 110	0,0845	0,0441	30
31		00h30	13 190	0,0693	0,046	30
32		00h35	12 525	0,082	0,0672	10

TABLEAU F.3 : Planification de siphonnage (6^{ième} instance)

No. Tournée	Heure de siphonnage	Poids à siphonner (kg)	Fe (%)	Si (%)	Profit
33	00h35	13 030	0,0878	0,0431	30
34	01h00	12 880	0,0599	0,0336	50
35	01h05	12 230	0,0771	0,0416	30
36	01h05	13 110	0,0762	0,0387	30
37	01h30	13 130	0,0633	0,0443	40
38	01h35	13 060	0,0576	0,0375	50
39	01h35	12 280	0,0943	0,0449	30
40	02h00	13 130	0,0696	0,0398	30
41	02h05	12 860	0,0781	0,0408	30
42	02h05	12 810	0,112	0,0407	10
43	02h30	12 210	0,0733	0,0382	30
44	02h35	13 130	0,0782	0,0408	30
45	02h35	13 010	0,079	0,041	30
46	03h00	12 850	0,0831	0,0415	30
47	03h05	10 330	0,0846	0,0428	30
48	03h05	12 360	0,08	0,0388	30

TABLEAU F.4 : Planification de siphonnage (6^{ième} instance)

No. Tournée	Heure de siphonnage	Poids à siphonner (kg)	Fe (%)	Si (%)	Profit
49	03h30	12 850	0,0529	0,0324	50
50	03h35	13 110	0,0786	0,0366	30
51	03h35	12 010	0,0818	0,0426	30
52	04h00	10 330	0,0551	0,0333	50
53	04h05	7 170	0,0726	0,0391	30
54	04h05	11 490	0,0458	0,0217	50
55	04h30	12 640	0,0677	0,0358	30
56	05h00	4 790	0,0596	0,0343	50

TABLEAU F.5 : Planification des demandes de four (6^{ième} instance)

No. Four	Heure début	Heure fin	Quantité min.	Quantité max.	Fe (%)	Si (%)
1	19h30	22h30	90 257	90 257	0,08	0,06
2	20h30	23h30	102 738	102 738	0,085	0,055
3	23h30	02h30	96 810	96 810	0,085	0,06
4	01h30	04h30	84 437	84 437	0,085	0,065

TABLEAU F.6 : Planification des demandes de transport (6^{ième} instance)

No. Transport	Heure début	Heure fin	Quantité min.	Quantité max.	Fe (%)	Si (%)
1	20h30	22h30	21 000	21 000	0,08	0,07
2	20h55	22h55	30 000	30 000	0,08	0,06
3	22h15	00h15	22 000	22 000	0,085	0,06
4	04h30	06h30	22 000	22 000	0,075	0,05

RÉSULTAT DE L'OPTIMISATION

TABLEAU F.7 : Assignation à la demande de four 1 (6^{ième} instance)

No. Tournée	Heure siphonné	Poids assigné	Heure d'assignation	Fe (%)	Si (%)
2	19h35	13 180	20h05	0,0699	0,0473
4	20h00	13 130	20h35	0,0727	0,0351
7	20h30	13 061	20h50	0,0678	0,0404
9	20h35	12 860	21h05	0,0744	0,0469
12	21h05	13 010	21h35	0,0869	0,0379
11	21h05	12 860	21h50	0,0635	0,0389
Total	-	78 101	-	0,0725	0,0411

TABLEAU F.8 : Assignation à la demande de four 2 (6^{ième} instance)

No. Tournée	Heure siphonné	Poids assigné	Heure d'assignation	Fe (%)	Si (%)
3	19h35	12 860	20h20	0,0766	0,0411
8	20h35	13 160	21h20	0,0725	0,038
15	21h35	13 150	22h05	0,1096	0,0456
16	22h00	13 200	22h20	0,0798	0,034
18	22h05	12 740	22h35	0,0764	0,0383
19	22h30	13 200	22h50	0,061	0,0398
21	22h35	13 130	23h05	0,073	0,0383
Total	-	91 440	-	0,0784	0,0393

TABLEAU F.9 : Assiguation à la demande de four 3 (6^{ième} instance)

No. Tournée	Heure siphonné	Poids assigné	Heure d'assiguation	Fe (%)	Si (%)
13	21h30	4 060	23h20	0,0844	0,0376
26	23h35	13 130	00h05	0,0785	0,0352
28	00h00	13 131	00h20	0,0747	0,0383
29	00h05	13 190	00h35	0,0825	0,0577
31	00h30	13 190	00h50	0,0693	0,046
33	00h35	13 030	01h05	0,0878	0,0431
32	00h35	12 525	01h20	0,082	0,0672
37	01h30	13 130	02h05	0,0633	0,0443
Total	-	95 386	-	0,0771	0,0469

TABLEAU F.10 : Assiguation à la demande de four 4 (6^{ième} instance)

No. Tournée	Heure siphonné	Poids assigné	Heure d'assiguation	Fe (%)	Si (%)
30	00h05	13 110	01h35	0,0845	0,0441
36	01h05	13 110	01h50	0,0762	0,0387
38	01h35	13 060	02h20	0,0576	0,0375
40	02h00	13 130	02h35	0,0696	0,0398
44	02h35	13 130	03h05	0,0782	0,0408
45	02h35	13 010	03h20	0,079	0,041
Total	-	78 550	-	0,0742	0,0403

TABLEAU F.11 : Assiguation à la demande de transport 1 (6^{ième} instance)

No. Tournée	Heure siphonné	Poids assigné	Heure d'assiguation	Fe (%)	Si (%)
6	20h05	12 540	20h35	0,0705	0,041
13	21h30	8 460	21h50	0,0844	0,0376
Total	-	21 000	-	0,0761	0,0396

TABLEAU F.12 : Assiguation à la demande de transport 2 (6^{ième} instance)

No. Tournée	Heure siphonné	Poids assigné	Heure d'assiguation	Fe (%)	Si (%)
5	20h05	12 640	20h50	0,068	0,0395
10	21h00	12 710	21h20	0,0696	0,037
14	21h35	4 650	22h05	0,0748	0,0404
Total	-	30 000	-	0,0697	0,0386

TABLEAU F.13 : Assiguation à la demande de transport 3 (6^{ième} instance)

No. Tournée	Heure siphonné	Poids assigné	Heure d'assiguation	Fe (%)	Si (%)
14	21h35	7 840	22h20	0,0748	0,0404
24	23h05	13 110	23h35	0,0744	0,0395
Total	-	20 950	-	0,0745	0,0398

TABLEAU F.14 : Assiguation à la demande de transport 4 (6^{ième} instance)

No. Tournée	Heure siphonné	Poids assigné	Heure d'assiguation	Fe (%)	Si (%)
47	03h05	10 330	04h20	0,0846	0,0428
54	04h05	11 490	04h35	0,0458	0,0217
Total	-	21 820	-	0,0642	0,0317

TABLEAU F.15 : Assiguation au carrousel (6^{ième} instance)

No.	Tournée	Heure siphonné	Poids assigné	Heure d'assiguation	Fe (%)	Si (%)	Profit
1		19h27	12 640	20h05	0,0693	0,0351	30
17		22h05	12 500	22h35	0,1397	0,0449	10
20		22h35	13 010	23h05	0,0791	0,0407	30
22		23h00	13 110	23h35	0,0565	0,0373	50
23		23h05	12 490	00h05	0,0718	0,0366	30
25		23h30	12 440	00h35	0,0436	0,0413	100
27		23h35	12 910	01h05	0,0614	0,0394	50
34		01h00	12 880	01h35	0,0599	0,0336	50
39		01h35	12 280	02h05	0,0943	0,0449	30
42		02h05	12 810	02h35	0,112	0,0407	10

TABLEAU F.16 : Assiguation au carrousel (6^{ième} instance)

No.	Tournée	Heure siphonné	Poids assigné	Heure d'assiguation	Fe (%)	Si (%)	Profit
43		02h30	12 210	03h05	0,0733	0,0382	30
46		03h00	12 850	03h35	0,0831	0,0415	30
48		03h05	12 360	04h05	0,08	0,0388	30
49		03h30	12 850	04h35	0,0529	0,0324	50
51		03h35	12 010	05h05	0,0818	0,0426	30
50		03h35	13 110	05h35	0,0786	0,0366	30
52		04h00	10 330	06h05	0,0551	0,0333	50
53		04h05	7 170	06h35	0,0726	0,0391	30
55		04h30	12 640	07h05	0,0677	0,0358	30
56		05h00	4 790	07h35	0,0596	0,0343	50

TABLEAU F.17 : Détail de la fonction objectif (6^{ième} instance)

Obj. 1	Obj. 2	Obj. 3	Obj. 4	Obj. 5	Obj. 6	Obj. 7	Obj. 8
8 823,7	-1 515	-1 400	-200	124,9	-1 360	-3 076 500	-123 000

APPENDICE G

SEPTIÈME ANNEXE

G.1 TABLEAUX DES RÉSULTATS DE LA SEPTIÈME INSTANCE

G.1.1 DONNÉES DU PROBLÈME

TABLEAU G.1 : Planification de siphonnage (*7^{ième} instance*)

No.	Tournée	Heure de siphonnage	Poids à siphonner (kg)	Fe (%)	Si (%)	Profit
1		20h15	13 160	0,0742	0,0442	30
2		20h20	12 870	0,0669	0,0418	30
3		20h25	12 330	0,0555	0,0432	50
4		20h45	12 740	0,0767	0,0426	30
5		20h50	13 010	0,0774	0,0439	30
6		20h55	12 490	0,0612	0,0378	50
7		21h15	13 150	0,0703	0,0405	30
8		21h20	13 130	0,0799	0,0493	30
9		21h25	12 380	0,047	0,0373	50
10		21h45	12 770	0,0786	0,043	30
11		21h50	12 260	0,0778	0,0372	30
12		21h55	11 960	0,0741	0,0412	30
13		22h15	13 170	0,0688	0,0399	30
14		22h20	13 010	0,0725	0,0376	30
15		22h25	12 010	0,0585	0,0434	50
16		22h45	12 360	0,0689	0,0395	30

TABLEAU G.2 : Planification de siphonnage (7^{ième} instance)

No.	Tournée	Heure de siphonnage	Poids à siphonner (kg)	Fe (%)	Si (%)	Profit
17		22h50	12 380	0,0717	0,0398	30
18		22h55	12 230	0,0714	0,0455	30
19		23h15	12 530	0,0691	0,0389	30
20		23h20	13 010	0,0686	0,0433	30
21		23h25	9 070	0,0697	0,0408	30
22		23h45	13 200	0,0729	0,0409	30
23		23h50	12 280	0,0722	0,0446	30
24		23h55	11 000	0,0588	0,0402	50
25		00h15	7 830	0,0671	0,0371	30
26		00h20	12 600	0,0848	0,0372	30
27		00h25	12 860	0,0771	0,0401	30
28		00h45	13 190	0,0741	0,0417	30
29		00h50	12 280	0,0593	0,0446	40
30		00h55	12 870	0,0706	0,0405	30
31		01h15	13 130	0,0725	0,0415	30
32		01h20	13 200	0,0686	0,047	30

TABLEAU G.3 : Planification de siphonnage (*7^{ième} instance*)

No. Tournée	Heure de siphonnage	Poids à siphonner (kg)	Fe (%)	Si (%)	Profit
33	01h25	13 190	0,0735	0,0427	30
34	01h45	12 280	0,0709	0,0404	30
35	01h50	12 970	0,0774	0,0433	30
36	01h55	13 150	0,0784	0,0422	30
37	02h15	12 860	0,0721	0,04	30
38	02h20	12 380	0,0747	0,0392	30
39	02h25	12 640	0,0719	0,0369	30
40	02h45	12 380	0,0685	0,0375	30
41	02h50	12 860	0,0569	0,0389	50
42	02h55	12 710	0,0696	0,0421	30
43	03h15	13 090	0,0756	0,0395	30
44	03h20	13 190	0,0662	0,0366	30
45	03h25	13 060	0,0733	0,0456	30
46	03h45	13 110	0,0708	0,0391	30
47	03h50	10 930	0,0676	0,0366	30
48	03h55	13 130	0,0746	0,0456	30

TABLEAU G.4 : Planification de siphonnage (*7^{ième} instance*)

No. Tournée	Heure de siphonnage	Poids à siphonner (kg)	Fe (%)	Si (%)	Profit
49	04h15	12 860	0,0757	0,0446	30
50	04h25	12 230	0,0805	0,0453	30

TABLEAU G.5 : Planification des demandes de four (7^{ième} instance)

No. Four	Heure début	Heure fin	Quantité min.	Quantité max.	Fe (%)	Si (%)
1	18h30	21h30	45 837	45 837	0,0979	0,0718
2	20h30	23h30	95 489	95 489	0,075	0,06
3	23h30	02h30	90 822	90 822	0,075	0,06
4	02h30	05h30	107 385	107 385	0,08	0,06

TABLEAU G.6 : Planification des demandes de transport (7^{ième} instance)

No. Transport	Heure début	Heure fin	Quantité min.	Quantité max.	Fe (%)	Si (%)
1	22h00	00h00	21 000	21 000	0,075	0,055
2	01h00	03h00	25 000	25 000	0,075	0,06

RÉSULTAT DE L'OPTIMISATION

TABLEAU G.7 : Assignation à la demande de four 1 (7^{ième} instance)

No. Tournée	Heure siphonné	Poids assigné	Heure d'assignation	Fe (%)	Si (%)
1	20h15	13 160	20h35	0,0742	0,0442
2	20h20	12 870	20h50	0,0669	0,0418
4	20h45	12 740	21h05	0,0767	0,0426
Total	-	38 770	-	0,0726	0,0429

TABLEAU G.8 : Assignation à la demande de four 2 (7^{ième} instance)

No. Tournée	Heure siphonné	Poids assigné	Heure d'assignation	Fe (%)	Si (%)
5	20h50	13 010	21h20	0,0774	0,0439
7	21h15	13 150	21h35	0,0703	0,0405
8	21h20	13 130	21h50	0,0799	0,0493
9	21h25	12 380	22h05	0,047	0,0373
3	20h25	3 860	22h20	0,0555	0,0432
10	21h45	12 770	22h35	0,0786	0,043
13	22h15	13 170	22h50	0,0688	0,0399
14	22h20	13 010	23h05	0,0725	0,0376
Total	-	94 480	-	0,0701	0,0417

TABLEAU G.9 : Assignation à la demande de four 3 (7^{ième} instance)

No. Tournée	Heure siphonné	Poids assigné	Heure d'assignation	Fe (%)	Si (%)
17	22h50	12 380	23h20	0,0717	0,0398
20	23h20	13 010	23h50	0,0686	0,0433
22	23h45	13 200	00h05	0,0729	0,0409
27	00h25	12 860	00h50	0,0771	0,0401
28	00h45	13 190	01h05	0,0741	0,0417
30	00h55	12 870	01h20	0,0706	0,0405
32	01h20	13 200	01h50	0,0686	0,047
Total	-	90 710	-	0,072	0,0419

TABLEAU G.10 : Assignation à la demande de four 4 (7^{ième} instance)

No. Tournée	Heure siphonné	Poids assigné	Heure d'assignation	Fe (%)	Si (%)
33	01h25	13 190	02h20	0,0735	0,0427
35	01h50	12 970	02h35	0,0774	0,0433
36	01h55	13 150	02h50	0,0784	0,0422
43	03h15	13 090	03h35	0,0756	0,0395
44	03h20	13 190	03h50	0,0662	0,0366
45	03h25	13 060	04h05	0,0733	0,0456
46	03h45	13 110	04h20	0,0708	0,0391
48	03h55	13 130	04h35	0,0746	0,0456
Total	-	104 890	-	0,0737	0,0418

TABLEAU G.11 : Assignation à la demande de transport 1 (7^{ième} instance)

No. Tournée	Heure siphonné	Poids assigné	Heure d'assignation	Fe (%)	Si (%)
19	23h15	12 530	23h35	0,0691	0,0389
3	20h25	8 470	23h50	0,0555	0,0432
Total	-	21 000	-	0,0636	0,0407

TABLEAU G.12 : Assignation à la demande de transport 2 (*7^{ième} instance*)

No. Tournée	Heure siphonné	Poids assigné	Heure d'assignation	Fe (%)	Si (%)
24	23h55	11 000	00h50	0,0588	0,0402
31	01h15	13 130	01h35	0,0725	0,0415
Total	-	24 130	-	0,0663	0,0409

TABLEAU G.13 : Assignation au carrousel (*7^{ième} instance*)

No. Tournée	Heure siphonné	Poids assigné	Heure d'assignation	Fe (%)	Si (%)	Profit
6	20h55	12 490	21h20	0,0612	0,0378	50
11	21h50	12 260	22h20	0,0778	0,0372	30
15	22h25	12 010	22h50	0,0585	0,0434	50
18	22h55	12 230	23h20	0,0714	0,0455	30
21	23h25	9 070	23h50	0,0697	0,0408	30
25	00h15	7 830	00h50	0,0671	0,0371	30
26	00h20	12 600	01h20	0,0848	0,0372	30
29	00h50	12 280	01h50	0,0593	0,0446	40
37	02h15	12 860	02h35	0,0721	0,04	30
38	02h20	12 380	03h05	0,0747	0,0392	30
41	02h50	12 860	03h35	0,0569	0,0389	50
42	02h55	12 710	04h05	0,0696	0,0421	30
47	03h50	10 930	04h50	0,0676	0,0366	30
49	04h15	12 860	05h20	0,0757	0,0446	30
50	04h25	12 230	06h35	0,0805	0,0453	30

TABLEAU G.14 : Détail de la fonction objectif (*7^{ième} instance*)

Obj. 1	Obj. 2	Obj. 3	Obj. 4	Obj. 5	Obj. 6	Obj. 7	Obj. 8
6 198	-780	-870	-200	0	-4 350	-1 068 300	-87 000