



**ESTIMATION DE L'ACCUMULATION DE MÉTAL DANS UN FOUR À ARC
ÉLECTRIQUE**

PAR PIERRE-YVES GLIDDEN

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

QUÉBEC, CANADA

© PIERRE-YVES GLIDDEN, 2022

DÉDICACE

À la science et aux avancées technologiques.

REMERCIEMENTS

J'aimerais d'abord remercier ma directrice de recherche, Sara Séguin, qui m'a guidé à l'aide de son savoir et de son expertise dans le domaine informatique et dans la rédaction de texte scientifique. Elle m'a aidé tout au long de ma maîtrise autant au plan académique et scientifique qu'au plan personnel en m'encourageant à persévéérer dans mon travail. Son appui a permis l'accomplissement de ce mémoire.

J'aimerais ensuite remercier le personnel d'Elkem Métal Canada, plus particulièrement Pascal Nadeau ainsi que Samuel Lemieux qui m'ont aidé dans ce projet du côté informatique, métallurgique et industriel. Leur collaboration a été un élément clé à l'élaboration de ce mémoire.

Un énorme merci à l'Université du Québec à Chicoutimi et au département d'informatique et de mathématique de m'avoir permis de me rendre aussi loin dans mes études. Merci à l'association des étudiants en mathématique et informatique et des membres des différents comités exécutifs d'associations étudiantes, vous m'avez donné envie de me dépasser par mes implications tout en me donnant des temps d'arrêt d'études des plus divertissants.

Finalement une attention particulière à ma famille, mes amis et à ma conjointe, Sophie Châteauneuf qui m'ont encouragé à chaque étape de ma vie.

RÉSUMÉ

Plusieurs composants se trouvant dans les véhicules automobiles ont besoin d'un alliage antioxydant, cet alliage est le ferrosilicium (FeSi). Le FeSi est produit à l'aide d'un four à arc électrique possédant trois anodes lui permettant d'atteindre des températures s'élevant à plus de 2000 degrés Celsius. La compagnie Elkem Métal Canada produit plusieurs types de ferrosilicium tel que le FeSi régulier, le FeSi inoculant et le ferrosilicomagnésium. Selon les clients, différentes teneurs de FeSi comme 50% de Si, 65% de Si et 75% de Si sont voulues. Les principales matières premières utilisées dans la fabrication du ferrosilicium sont le quartz, les copeaux de bois, le charbon et la ferraille. Pour arriver à transformer les matières premières en alliage, la production utilise des principes d'électrométallurgie, de pyrométhallurgie ainsi que de carboréduction. Une fois la matière transformée, le FeSi est écoulé par un trou situé dans le bas du four dans des cuves sur rail. Durant une longue période de production de ferrosilicium, il est possible qu'un surplus de métal se forme dans le four. En effet, durant le transfert de métal dans les cuves, il peut arriver que le métal ne coule pas et reste dans le four. Les quantités de métal ayant demeuré dans l'enceinte du four ont un impact sur la qualité et la chimie de l'alliage et peuvent rendre une production inutilisable si le taux actuel des éléments s'éloigne trop du taux attendu. Il est impossible de mesurer la quantité de métal accumulé à cause de la chaleur extrême, de l'inégalité des matières premières ajoutées et de la variation constante des recettes de production.

Bien que certaines formules existent pour estimer cette quantité, plusieurs paramètres importants sont laissés de côté en calculant uniquement le taux de silicium entré durant l'heure précédent une coulée et en y soustrayant le taux de silicium sorti durant la coulée. Ce qui fait en sorte que la quantité de métal accumulé n'est pas approximée correctement. Ce mémoire propose une nouvelle formulation du calcul de l'accumulation de métal en intégrant le taux de fer au taux de silicium. Il propose aussi l'utilisation du temps de réaction chimique de la matière première selon la teneur en Si du produit voulu afin de connaître la période totale de matière première à ajouter en entrée au calcul. Ce mémoire montre les différentes étapes afin de calculer le temps de latence de la matière première dans un environnement industriel et de production de FeSi. Il relève les différents problèmes contenus dans l'ancien calcul d'accumulation de métal chez Elkem Métal Canada ainsi que les solutions pour améliorer son estimation tout en les mettant en œuvre.

Certaines journées où la production a rencontré de l'accumulations de métal ont été ciblées par les métallurgistes d'Elkem. À partir de ces journées, l'ancien calcul d'accumulation de métal et le nouveau calcul ont été comparés. Les résultats du nouveau calcul d'accumulation de métal ont montré une amélioration du calcul en affichant au graphique d'accumulation de métal se trouvant dans le système d'aide à l'opérateur une quantité de métal accumulée égale au surplus de métal sortie la journée suivante. Les résultats ont aussi démontré qu'une absence de surplus de métal durant les jours de production standard est affichée le dit graphique contrairement aux résultats de l'ancien calcul affichant faussement du métal accumulé.

RÉSUMÉ

Several components found in motor vehicles need an antioxidant alloy, this alloy is ferrosilicon (FeSi). FeSi is produced using an electric arc furnace with three anodes allowing it to reach temperatures of over 2000 degrees Celsius. Elkem Metal Canada produces several types of ferrosilicon such as regular FeSi, inoculant FeSi and ferrosiliconmagnesium. According to customers, different FeSi grades like 50% Si, 65% Si and 75% Si are wanted. The main raw materials used in the manufacture of ferrosilicon are quartz, wood chips, coal and scrap metal. To succeed in transforming the raw materials into an alloy, the production uses the principles of electrometallurgy, pyrometallurgy and carboreduction. Once the material has been transformed, the FeSi is drained through a hole located at the bottom of the furnace into tanks on rails. During a long period of ferrosilicon production, it is possible that a surplus of metal will form in the furnace. Indeed, during the transfer of metal in the tanks, it may happen that the metal does not flow and remains in the furnace. The quantities of metal remaining in the furnace enclosure have an impact on the quality and the chemistry of the alloy and can render a production unusable if the current rate of the elements deviates too much from the expected rate. It is impossible to measure the amount of accumulated metal due to the extreme heat, the unevenness of raw materials added, and the constant variation in production recipes.

Although certain formulas exist to estimate this quantity, several important parameters are left out by calculating only the rate of silicon entered during the hour preceding a pour and subtracting from it the rate of silicon exited during the pour. This means that the amount of accumulated metal is not correctly approximated. This master's thesis proposes a new formulation for the calculation of metal accumulation by integrating the rate of iron with the rate of silicon. It also proposes the use of the chemical reaction time of the raw material according to the Si content of the desired product in order to know the total period of raw material to be added as input to the calculation. This master's thesis shows the different steps to calculate the latency time of the raw material in an industrial environment and FeSi production by identifying the various problems contained in the old metal accumulation calculation at Elkem Metal Canada as well as the solutions to improve his estimate while implementing them.

Days when production encountered certain metal accumulations were targeted by Elkem metalworkers. From these days, the old metal accumulation calculation and the new calculation were compared. The results of the new metal accumulation calculation showed an improvement in the calculation by displaying on the graph an accumulated amount of metal equal to the excess metal released the following day. The results also showed that an absence of excess metal during standard production days is displayed on the graph, unlike the results of the old calculation, which falsely displayed accumulated metal.

TABLE DES MATIÈRES

| | |
|---|------|
| DÉDICACE | ii |
| REMERCIEMENTS | iii |
| RÉSUMÉ | iv |
| RÉSUMÉ | v |
| LISTE DES TABLEAUX | viii |
| LISTE DES FIGURES | x |
| CHAPITRE I – INTRODUCTION | 1 |
| 1.1 PROBLÉMATIQUE ET SOLUTIONS | 3 |
| 1.2 ORGANISATION DU MÉMOIRE | 5 |
| CHAPITRE II – REVUE DE LITTÉRATURE | 6 |
| 2.1 LES PRINCIPES DE PRODUCTION MÉTALLURGIQUE | 6 |
| 2.1.1 LES TYPES DE PRODUITS LIÉS AU FERROSILICIUM | 7 |
| 2.1.2 FOUR À ARC | 8 |
| 2.1.3 MATIÈRES PREMIÈRES, ALIMENTATION ET TISONNAGE | 9 |
| 2.1.4 PYROMÉTALLURGIE, ÉLECTROMÉTALLURGIE, CARBORÉDUCTION | 10 |
| 2.1.5 DÉLAIS DE PROCÉDÉS CHIMIQUES | 11 |
| 2.1.6 COULÉE DE FERROSILICIUM | 12 |
| 2.1.7 AFFINAGE ET ALLIAGE | 13 |
| 2.1.8 COULÉE DANS LES MOULES | 13 |
| 2.1.9 L'ACCUMULATION DE MÉTAL | 15 |
| 2.2 LES PRINCIPES INFORMATIQUES | 16 |
| 2.2.1 LES DONNÉES MASSIVES | 16 |
| 2.2.2 LA MOYENNE MOBILE | 16 |
| 2.2.3 LES SYSTÈMES EXPERTS | 17 |

| | |
|---|-----|
| CHAPITRE III – MÉTHODOLOGIE | 18 |
| 3.1 ENVIRONNEMENT DE PROJET | 18 |
| 3.1.1 ELKEM MÉTAL CANADA | 19 |
| 3.1.2 ANCIEN CALCUL D'ACCUMULATION DE MÉTAL | 19 |
| 3.2 MODIFICATIONS AU SYSTÈME EN PLACE | 23 |
| 3.2.1 NOUVEAU CALCUL D'ACCUMULATION DE MÉTAL | 25 |
| 3.3 CALCUL DU TEMPS DE LATENCE | 27 |
| CHAPITRE IV – RÉSULTATS | 39 |
| 4.1 STATISTIQUES DE PRODUCTION | 40 |
| 4.2 ACCUMULATIONS DÉTECTÉES | 41 |
| 4.2.1 ACCUMULATION CERTAINE : 4 DÉCEMBRE 2020 | 42 |
| 4.2.2 ACCUMULATION CERTAINE : 9 FÉVRIER 2021 | 52 |
| 4.2.3 ACCUMULATION CERTAINE : 1 JUIN 2021 | 62 |
| 4.3 PRODUCTION STANDARD SANS ACCUMULATION | 70 |
| 4.3.1 PRODUCTION STANDARD : 12 JANVIER 2020 | 70 |
| 4.3.2 PRODUCTION STANDARD : 15 MARS 2020 | 79 |
| 4.3.3 PRODUCTION STANDARD : 22 JANVIER 2021 | 87 |
| 4.4 RÉSUMÉ | 95 |
| CHAPITRE V – CONCLUSION | 98 |
| 5.1 REVUE DES CONTRIBUTIONS | 98 |
| 5.2 RECOMMANDATIONS ET TRAVAUX FUTURS | 99 |
| BIBLIOGRAPHIE | 101 |
| APPENDICE A – INTERFACES LOGICIEL | 106 |

LISTE DES TABLEAUX

| | |
|---|----|
| TABLEAU 3.1 : DÉTECTION D'UN CHANGEMENT DE MATIÈRE PREMIÈRE | 29 |
| TABLEAU 3.2 : DÉTECTION D'UN CHANGEMENT DE CHIMIE | 30 |
| TABLEAU 3.3 : PREMIERS RÉSULTATS DES DÉTECTIONS DU TEMPS DE LATENCE | 31 |
| TABLEAU 3.4 : NOMBRE DE CHANGEMENT DE TYPE | 35 |
| TABLEAU 3.5 : MÉDIANES DU TEMPS DE LATENCE | 36 |
| TABLEAU 4.1 : TABLEAU DES RÉSULTATS RETENUS | 39 |
| TABLEAU 4.2 : POIDS DE PRODUCTION POUR L'ANNÉE 2020 | 40 |
| TABLEAU 4.3 : DONNÉES DE PRODUCTION DU 3 DÉCEMBRE 2020 | 44 |
| TABLEAU 4.4 : COMPARAISON DU 3 DÉCEMBRE 2020 | 45 |
| TABLEAU 4.5 : DONNÉES DE PRODUCTION DU 4 DÉCEMBRE 2020 | 47 |
| TABLEAU 4.6 : COMPARAISON DU 4 DÉCEMBRE 2020 | 47 |
| TABLEAU 4.7 : DONNÉES DE PRODUCTION DU 5 DÉCEMBRE 2020 | 50 |
| TABLEAU 4.8 : COMPARAISON DU 5 DÉCEMBRE 2020 | 50 |
| TABLEAU 4.9 : DONNÉES DE PRODUCTION DU 8 FÉVRIER 2021 | 54 |
| TABLEAU 4.10 : COMPARAISON DU 8 FÉVRIER 2021 | 54 |
| TABLEAU 4.11 : DONNÉES DE PRODUCTION DU 9 FÉVRIER 2021 | 57 |
| TABLEAU 4.12 : COMPARAISON DU 9 FÉVRIER 2021 | 57 |
| TABLEAU 4.13 : DONNÉES DE PRODUCTION DU 10 FÉVRIER 2021 | 59 |
| TABLEAU 4.14 : COMPARAISON DU 10 FÉVRIER 2021 | 60 |
| TABLEAU 4.15 : DONNÉES DE PRODUCTION DU 31 MAI 2021 | 63 |
| TABLEAU 4.16 : COMPARAISON DU 31 MAI 2021 | 63 |

| | |
|---|----|
| TABLEAU 4.17 : DONNÉES DE PRODUCTION DU 1 JUIN 2021 | 65 |
| TABLEAU 4.18 : COMPARAISON DU 1 JUIN 2021 | 66 |
| TABLEAU 4.19 : DONNÉES DE PRODUCTION DU 2 JUIN 2021 | 68 |
| TABLEAU 4.20 : COMPARAISON DU 2 JUIN 2021 | 68 |
| TABLEAU 4.21 : DONNÉES DE PRODUCTION DU 11 JANVIER 2020 | 72 |
| TABLEAU 4.22 : COMPARAISON DU 11 JANVIER 2020 | 72 |
| TABLEAU 4.23 : DONNÉES DE PRODUCTION DU 12 JANVIER 2020 | 74 |
| TABLEAU 4.24 : COMPARAISON DU 12 JANVIER 2020 | 75 |
| TABLEAU 4.25 : DONNÉES DE PRODUCTION DU 13 JANVIER 2020 | 77 |
| TABLEAU 4.26 : COMPARAISON DU 13 JANVIER 2020 | 78 |
| TABLEAU 4.27 : DONNÉES DE PRODUCTION DU 14 MARS 2020 | 81 |
| TABLEAU 4.28 : COMPARAISON DU 14 MARS 2020 | 81 |
| TABLEAU 4.29 : DONNÉES DE PRODUCTION DU 15 MARS 2020 | 83 |
| TABLEAU 4.30 : COMPARAISON DU 15 MARS 2020 | 84 |
| TABLEAU 4.31 : DONNÉES DE PRODUCTION DU 16 MARS 2020 | 86 |
| TABLEAU 4.32 : COMPARAISON DU 16 MARS 2020 | 87 |
| TABLEAU 4.33 : DONNÉES DE PRODUCTION DU 21 JANVIER 2021 | 89 |
| TABLEAU 4.34 : COMPARAISON DU 21 JANVIER 2021 | 89 |
| TABLEAU 4.35 : DONNÉES DE PRODUCTION DU 22 JANVIER 2021 | 91 |
| TABLEAU 4.36 : COMPARAISON DU 22 JANVIER 2021 | 91 |
| TABLEAU 4.37 : DONNÉES DE PRODUCTION DU 23 JANVIER 2021 | 94 |
| TABLEAU 4.38 : COMPARAISON DU 23 JANVIER 2021 | 94 |

LISTE DES FIGURES

| | |
|--|----|
| FIGURE 2.1 – FOUR À ARC | 9 |
| FIGURE 2.2 – TEMPS DE RÉACTION | 12 |
| FIGURE 3.1 – GRAPHIQUE D'ACCUMULATION DE MÉTAL TIRÉ DU SAO | 20 |
| FIGURE 3.2 – MWH DU TEMPS DE LATENCE | 33 |
| FIGURE 3.3 – TEMPS DE LATENCE | 34 |
| FIGURE 3.4 – MWH DU TEMPS DE LATENCE > 31 MHW | 37 |
| FIGURE 3.5 – TEMPS DE LATENCE > 31 MWH | 38 |
| FIGURE 4.1 – ACCUMULATION DE MÉTAL DU 3 DÉCEMBRE 2020 | 43 |
| FIGURE 4.2 – ACCUMULATION DE MÉTAL DU 4 DÉCEMBRE 2020 | 46 |
| FIGURE 4.3 – ACCUMULATION DE MÉTAL DU 5 DÉCEMBRE 2020 | 49 |
| FIGURE 4.4 – ACCUMULATION DE MÉTAL DU 8 FÉVRIER 2021 | 53 |
| FIGURE 4.5 – ACCUMULATION DE MÉTAL DU 9 FÉVRIER 2021 | 56 |
| FIGURE 4.6 – ACCUMULATION DE MÉTAL DU 10 FÉVRIER 2021 | 59 |
| FIGURE 4.7 – ACCUMULATION DE MÉTAL DU 31 MAI 2021 | 62 |
| FIGURE 4.8 – ACCUMULATION DE MÉTAL DU 1 JUIN 2021 | 65 |
| FIGURE 4.9 – ACCUMULATION DE MÉTAL DU 2 JUIN 2021 | 67 |
| FIGURE 4.10 – ACCUMULATION DE MÉTAL DU 11 JANVIER 2020 | 71 |
| FIGURE 4.11 – ACCUMULATION DE MÉTAL DU 12 JANVIER 2020 | 74 |
| FIGURE 4.12 – ACCUMULATION DE MÉTAL DU 13 JANVIER 2020 | 77 |
| FIGURE 4.13 – ACCUMULATION DE MÉTAL DU 14 MARS 2020 | 80 |
| FIGURE 4.14 – ACCUMULATION DE MÉTAL DU 15 MARS 2020 | 83 |
| FIGURE 4.15 – ACCUMULATION DE MÉTAL DU 16 MARS 2020 | 86 |

| | |
|--|-----|
| FIGURE 4.16 – ACCUMULATION DE MÉTAL DU 21 JANVIER 2021 | 88 |
| FIGURE 4.17 – ACCUMULATION DE MÉTAL DU 22 JANVIER 2021 | 90 |
| FIGURE 4.18 – ACCUMULATION DE MÉTAL DU 23 JANVIER 2021 | 93 |
| FIGURE A.1 – ANCIENNE PAGE DE L'ACCUMULATION DE MÉTAL | 106 |
| FIGURE A.2 – NOUVELLE PAGE DE L'ACCUMULATION DE MÉTAL | 107 |

CHAPITRE I

INTRODUCTION

Le ferrosilicium (FeSi) est un ferroalliage antioxydant qui est largement utilisé dans la production de pièces pour les voitures, les ponts et bien d'autres produits. Cet alliage permet d'améliorer les propriétés du métal avec lequel il est mélangé. La production du ferrosilicium demeure cependant complexe. Les principales matières premières nécessaires à la production du ferrosilicium sont le quartz, le charbon, les copeaux de bois et la ferraille. L'utilisation d'un four à arc électrique est nécessaire pour effectuer la transformation de ces matières premières. Les fours à arc sont constitués de trois anodes de Soderberg [1] et utilisent une composition de principes électrométallurgiques, de principes pyrométallurgiques et de principes de carboréduction afin d'atteindre la température nécessaire à la transformation des matériaux. Les productions de ferrosilicium peuvent avoir une concentration différente en silicium de 50%, 65% et 75% selon la demande du client. Parmi ces différentes concentrations existent des recettes variées. Les recettes se trouvent à ajouter des éléments supplémentaires à la production de base du FeSi de manière à atteindre des propriétés différentes d'un lot de FeSi à un autre. Un exemple de recette consisterait à effectuer l'ajout de magnésium afin d'améliorer la composition du mélange entre un métal et le FeSi.

Une fois la matière première transformée, le ferrosilicium est extrait de l'enceinte du four par un trou se situant dans le bas du four. Le FeSi est coulé dans une grande cuve pouvant recueillir plusieurs tonnes d'alliage. Le processus est appelé « une coulée ». Bien

que le FeSi soit extrait toutes les heures, il peut arriver qu'une partie, ou même la totalité, du ferrosilicium en production ne coule pas et reste à l'intérieur du four. Les quantités de ferrosilicium présentes à l'intérieur d'un four à arc électrique ont un impact sur les processus de production ainsi que la chimie des produits qui en découlent. Trop de ferrosilicium peut augmenter ou diminuer les taux de silicium des prochaines coulées de métal rendant donc le produit inutilisable. Par conséquent, il est important de connaître les quantités présentes dans le four afin de prévoir la matière première à ajouter pour la prochaine coulée. Il est cependant impossible de mesurer avec exactitude ces quantités. La chaleur rend impossible l'installation de capteurs, les quantités de matières premières ajoutées ne sont jamais les mêmes et leur disposition est inégale dans le four. Pour ces raisons, un calcul effectuant la différence entre les entrées et les sorties s'impose. L'application d'un calcul estimant la quantité de métal accumulé doit être utilisée. Cependant, un calcul n'employant pas un ensemble de paramètres valide peut aussi être un problème, puisque l'opérateur n'ajoutera pas les bonnes quantités. Au début de ce projet, la compagnie Elkem Métal Canada utilisait un calcul d'accumulation de métal ne prenant pas en compte certains paramètres importants, comme le temps de réaction chimique entre les éléments ajoutés au four et les quantités des matières premières en entrées autre que le silicium. Ce mémoire décrit les différentes étapes et résultats d'un projet servant à affiner ce calcul.

1.1 PROBLÉMATIQUE ET SOLUTIONS

La fabrication du ferrosilicium est un procédé très complexe puisque les matières premières sont déposées à certains endroits et sont réparties inégalement dans le four. La température est inégale, les anodes ne se consument pas à la même vitesse, le contrôle du four est basé principalement sur l'expérience des ingénieurs et des opérateurs. Il y a beaucoup de paramètres qui sont mesurés et analysés, par contre leur impact sur le procédé n'est pas quantifié. Le ferrosilicium sortant du four n'a jamais une chimie constante. Les matières premières peuvent avoir des impuretés, elles peuvent aussi avoir un taux d'humidité variant d'un lot à l'autre. De plus, Elkem métal Canada effectue une alternance de différentes recettes comparativement à d'autres usines n'ayant qu'une seule recette. Ceci ajoute une autre difficulté autant à la constance de la chimie du métal qu'aux différents procédés qui se doivent d'être dynamiques selon la recette en cours de production. Un autre défi est qu'il peut arriver qu'aucun métal ne sorte du trou de coulé et qu'une accumulation de métal dans le four se forme. L'accumulation de métal formée dans le four change la production, puisque les quantités de matières premières ne seront plus les mêmes. Afin de conserver une chimie exacte du FeSi désiré, il est possible de devoir ajouter plus d'une matière spécifique et de couper entièrement l'ajout d'une autre matière. Il est par conséquent important de pouvoir quantifier ou d'approximer cette accumulation. Ceci s'ajoute une fois de plus à la complexité de déterminer la chimie exacte du métal dans le four afin de calculer les ressources nécessaires pour la prochaine coulée. Bien qu'un calcul de l'accumulation de métal soit présent dans le système d'aide à l'opérateur, le calcul ne prend pas en compte certains facteurs importants des

procédés de production et l'estimation qui en résulte demeure loin de la réalité.

Ce mémoire propose une méthodologie pour améliorer le calcul d'accumulation déjà en place en affinant les paramètres de l'équation. Bien que le ferrosilicium soit constitué d'autres éléments en plus du silicium, le calcul utilisé dans le Système d'Aide à l'Opérateur (SAO) est uniquement basé sur le taux de silicium. Par conséquent, le nouveau calcul ajoute les teneurs en fer en plus du silicium, ce qui permet au calcul de couvrir près de 98% des quantités d'éléments inclus dans le FeSi. L'ancien calcul additionne les matières premières de la dernière heure comme quantité en entrée, cependant selon le type de production et selon la consommation énergétique du four, les matières premières ayant été ajoutées il y a plus d'une heure peuvent impacter la chimie et les quantités de métal sortant. La modification apportée à ce problème consiste à effectuer un deuxième calcul permettant de connaître les temps de réaction chimique de la matière première du moment de l'ajout au four au moment de la coulée. Ce calcul permet de connaître la période de temps total considérée pour effectuer la somme des quantités de matières premières en entrée. Pour trouver ce temps de latence, il suffit de récolter les moments où un changement de quantités de matière première a été effectué et calculer le temps entre ce changement et l'impact sur l'analyse chimique du FeSi en sortie. Ainsi, le nouveau calcul considère la totalité des matières premières ajouter entre cette période et la coulée, plutôt que l'heure précédent la coulée. L'ancien calcul prend directement les données de la base de données sans les ordonner selon l'heure de l'ajout, par conséquent il arrive parfois que des quantités se retrouvent dans une période n'appartenant pas à l'heure dont ils ont été ajoutés. Il faut donc s'assurer d'ordonner les données correctement selon la date,

l'heure, les minutes et les secondes exactes. L'ancien calcul arrondit toutes les informations aux heures suivant la coulée plutôt qu'au moment exact de la coulée, soit 1 h, 2 h, 3 h, 4 h, 5 h. Le nouveau calcul donne le taux d'accumulation de métal au moment précis de chaque coulée et ce peu importe les heures, les minutes ou les secondes de l'enregistrement de la coulée. Dans le cadre de ce projet, un nouveau calcul d'accumulation de métal est proposé selon la solution décrite. Le résultat de ce nouveau calcul a pour but d'améliorer l'approximation des quantités de métal accumulé dans un four à arc en utilisant les mathématiques et l'informatique.

1.2 ORGANISATION DU MÉMOIRE

Le chapitre 1 effectue une introduction et présente les problématiques ainsi que les solutions envisagées et proposées. Le chapitre 2, la revue de littérature, renferme les différents documents, articles et ouvrages permettant de comprendre les aspects liés au problème et à ses solutions. Le chapitre 3 explique la méthodologie employée afin de mettre à terme le projet. Le chapitre 4 donne les résultats des calculs de différentes situations rencontrées hebdomadairement par les opérateurs. Finalement, le chapitre 5 renferme la conclusion de ce mémoire tout en effectuant une revue des contributions de même que différents conseils sur les travaux futurs pouvant être menés à la suite de ce projet.

CHAPITRE II

REVUE DE LITTÉRATURE

L'estimation de l'accumulation de métal dans un four à arc électrique est un sujet très peu exploité dans les ouvrages sur la production d'alliage. Malgré tout, les fours à arc électrique [2], le ferrosilicium, la production d'alliage [3] et l'utilisation d'outils informatiques pour ces processus [4] sont des sujets bien populaires. Ce chapitre fait l'objet des travaux antérieurs ainsi que des principes à connaître dans l'élaboration de ce projet notamment en faisant le lien entre les différentes théories métallurgiques et informatiques. Le chapitre est divisé en deux catégories : les principes de productions métallurgiques ainsi que les principes informatiques.

2.1 LES PRINCIPES DE PRODUCTION MÉTALLURGIQUE

Cette section décrit les différents aspects métallurgiques à maîtriser dans le but d'améliorer l'estimation de l'accumulation de métal dans un four à arc. Il est question des types de produits liés au ferrosilicium, puis des fours à arcs électriques, de leurs compositions matérielles et de leur fonctionnement. Les procédés de production du FeSi sont ensuite décrits. Il s'agit d'une description de la matière première utilisée, des procédés de pyrométallurgie, d'électrométallurgie et de carboréduction. Puis, il est décrit en quoi consiste une coulée de métal et l'affinage du ferroalliage. Finalement, l'accumulation de métal dans un four à arc lors de la production de ferrosilicium est décrite.

2.1.1 LES TYPES DE PRODUITS LIÉS AU FERROSILICIUM

Le ferrosilicium est principalement utilisé dans le domaine de l'automobile [5], mais se retrouve aussi dans certains produits comme les éoliennes. Il agit principalement comme désoxydant [6] et aide à améliorer certaines propriétés des métaux avec lesquels il est mélangé [7]. Il existe trois types de produits liés au ferrosilicium, le ferrosilicium régulier [8], le ferrosilicomagnésium [9] et le ferrosilicium inoculant [10]. Le silicium appartient à la famille des cristallogènes et ne se retrouve pas à l'état libre dans la nature, mais bien sous forme de composé de silice ou autres silicates. Sous la forme solide, nous pouvons la retrouver en multitude, soit le quartz [11].

Le ferrosilicium est un ferroalliage composé de fer et de silicium. Il est produit à l'aide de fours à arc dont la température s'approche des 2000 degrés Celsius [12].

Le ferrosilicomagnésium est simplement du ferrosilicium auquel du magnésium est ajouté. Le magnésium sert à modifier la structure de la croissance du graphite lors de la solidification [9]. Plutôt que de former des aiguilles ou feuillards, le magnésium attire le carbone qui grandit sous forme de spirale ou de cône dans tous les sens. Le carbone crée donc des « nodules ». Plutôt que d'avoir de la fonte grise, on obtient de la fonte nodulaire. [13]

Le ferrosilicium inoculant permet une meilleure distribution du carbone. Lors de la solidification, le carbone a un maximum de dilution et plus la température diminue moins la quantité est importante ce qui fait que les parties minces possèdent moins de carbone que les parties épaisses. Le ferrosilicium inoculant sert de crochet et permet la formation

de regroupement de carbone en place, peu importe l'épaisseur. Ceci assure une meilleure distribution, donc des propriétés plus uniformes. [14]

2.1.2 FOUR À ARC

Les fours à arc sont des fours électriques utilisés dans la métallurgie pour la production de métaux [15]. Ils utilisent l'énergie fournie par l'arc électrique créé entre les électrodes et le métal afin d'atteindre la température nécessaire pour obtenir la fusion du métal. Les matières premières sont ajoutées dans le four, elles sont chauffées à près de 2000 degrés Celsius par l'arc électrique [16] formé entre les électrodes et le métal qui permet la fusion de la matière première pour former un bassin de fusion dans le fond du four. Les fours à arcs sont un excellent choix pour les industries puisqu'ils peuvent être utilisés avec des matériaux recyclés [17]. Ainsi les installations requises à son utilisation peuvent se trouver à proximité des villes plutôt que de devoir être près d'une mine. Ces fours sont la plupart du temps composés de trois éléments. Un transformateur permet l'alimentation de l'énergie électrique au four et des brûleurs aident au réchauffement des parties plus froides du four. Finalement, trois électrodes sont utilisées pour alimenter le four. Un four à arc est visible à la Figure 2.1

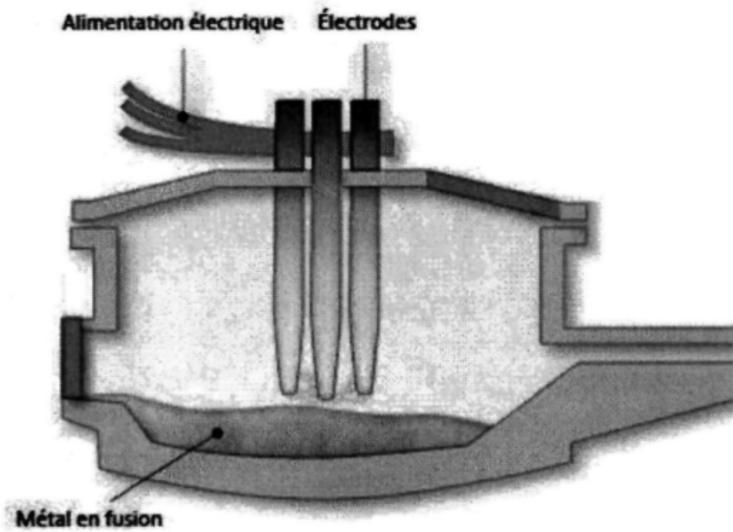


FIGURE 2.1 : Four à arc [18]
Image Creative Commons.

2.1.3 MATIÈRES PREMIÈRES, ALIMENTATION ET TISONNAGE

Les matières premières sont acheminées par camions et parfois par trains. Le ferrosilicium est constitué des matières premières suivantes : quartz, ferraille, copeaux de bois et charbon [19]. Un des points importants à prendre en considération avec la matière première est le comportement de la matière en interaction avec les autres. C'est ceci qui fournit une bonne production, une bonne efficacité. On parle ici de la granulométrie, la composition de l'élément recherché dans la matière, la structure cristalline et la réactivité de fragmentation en haute température. Un autre point important est la qualité chimique. Plus la quantité de contaminants est basse et plus le ferrosilicium sortant sera pur. Ces contaminants sont différents pour chaque matière première.

La charge des matières premières est automatiquement calculée par une balance se

situant avant l'arrivée du mélange de matières premières dans les points de chute au-dessus du four. Ces points de chute répartissent les matériaux uniformément dans le four. Le tisonnage consiste à répartir uniformément la matière première de sorte à favoriser le bon fonctionnement des procédés de production comme la pyromé tallurgie. La matière première est tisonnée à l'intérieur du four à l'aide d'un véhicule résistant à la chaleur ayant un bras métallique suffisamment long pour répartir les matériaux.

2.1.4 PYROMÉTALLURGIE, ÉLECTROMÉTALLURGIE, CARBORÉDUCTION

La production du ferrosilicium utilise une combinaison de trois principes de métallurgie fondamentale, soit la pyromé tallurgie [20], l'électromé tallurgie [21] et la carboréduction [22]. Ces procédés sont les principales réactions au cœur de la fabrication. La pyromé tallurgie consiste à effectuer l'extraction de métaux en utilisant des températures élevées ainsi que les fondements de la fusion pour réduire les minérais et séparer les métaux des autres éléments.

L'électromé tallurgie consiste à la production de métaux à l'aide d'énergie électrique comme point essentiel afin d'atteindre les températures désirées. L'énergie électrique est convertie en énergie chimique ce qui permet la séparation d'éléments, la synthèse chimique et rend possible les réactions carbothermiques et la carboréduction. Les électrodes ainsi que les réactions sur la matière première sont les principales sources d'énergie fournies au four [23]. Le métal en fusion se trouve à être plus dense que le minerai et se retrouvera donc dans le fond du four pour former un bassin de fusion.

La carboréduction est une réaction chimique qui produit une réduction par le carbone. Une réduction est une réaction chimique dans laquelle les atomes d'oxygène sont séparés de l'élément chimique. C'est une réaction qui se déroule lorsque la température atteint plusieurs centaines de degrés Celsius, dans le cas de la silice plus de 2000 degrés Celsius. Le SiO_2 du quartz va donc se faire séparer par le carbone ajouté, le Si restera dans le mélange alors que le CO va s'échapper pour brûler en surface et former du CO_2 . Les minéraux peuvent contenir des traces d'autres éléments en faible quantité qui sont tolérés dans la chimie.

2.1.5 DÉLAIS DE PROCÉDÉS CHIMIQUES

Une réaction chimique se produit par la transformation de produits appelés des réactifs [24]. Ces réactions chimiques ont une durée de réaction, certaines peuvent être instantanées comme une explosion, d'autres peuvent être extrêmement lentes comme la formation de rouille sur le fer. La durée de cette réaction correspond au temps écoulé entre le moment où les réactifs sont mis en contact et le moment où il n'y a plus d'évolution de la réaction, que le produit final est atteint. La Figure 2.2 présente l'évolution d'une réaction chimique à travers le temps.

Graphique du temps de réaction chimique

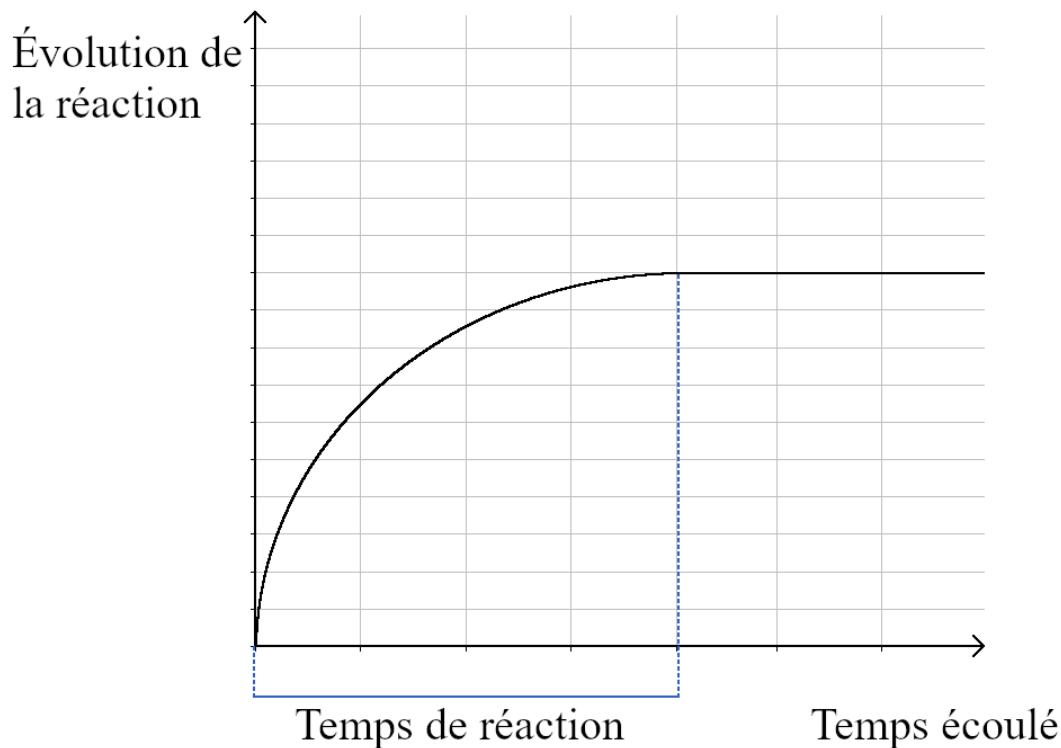


FIGURE 2.2 : Temps de réaction

© Pierre-Yves Glidden, 2022.

Dans le cas du ferrosilicium, la matière première doit d'abord atteindre la température de fusion en vue d'avoir la réaction chimique entre les différents éléments [25]. Ceci engendre un autre délai supplémentaire.

2.1.6 COULÉE DE FERROSILICIUM

Le ferrosilicium sortant du four n'a jamais une chimie constante. Un autre défi est qu'il peut arriver qu'aucun métal ne sorte du trou de coulée et qu'une accumulation de métal dans

le four se forme. Il est donc, une fois de plus, compliqué de déterminer la chimie exacte du métal dans le four afin de calculer les ressources nécessaires pour la prochaine coulée. Une fois le métal coulé on effectue une prise d'échantillon qui sera analysé au laboratoire situé dans les installations.

2.1.7 AFFINAGE ET ALLIAGE

Afin d'atteindre la bonne combinaison chimique du produit final, des additifs doivent être ajoutés. C'est ici que le magnésium est ajouté lors de la fabrication du ferrosilicomagnésium. Le système informatique ainsi qu'une charte établie par l'expérience des ingénieurs métallurgistes déterminent les quantités requises d'additifs à ajouter. Les quantités sont basées sur l'analyse chimique de la coulée précédente. À la fin de la recette, l'alliage est homogénéisé en étant brassé durant une courte période de temps. La position de la tête d'agitation, la durée et l'efficacité du brassage sont des facteurs importants. Enfin, un autre échantillon est recueilli afin de connaître la chimie finale du produit.

2.1.8 COULÉE DANS LES MOULES

Une fois l'affinage terminé, le métal est coulé dans de gros moules ou en couches minces sur un chemin de coulée fabriqué de réfractaire. Du côté des couches minces, le chemin de coulée conduit aux petits moules et un jet de particules fines appelé *fins* est projeté dans le filon de métal liquide. Les *fins* sont de même composition que le métal et servent à augmenter le tonnage tout en abaissant la température. Ceci à pour effet de diminuer la dégradation

des moules. Une fois sur les moules, une séquence de jets d'eau refroidit le métal. Selon les directives, certains jets peuvent être actifs ou non. Les jets d'eau servent à contrôler le refroidissement du produit considérant la capacité d'absorption thermique du moule et la vitesse de diffusion de la chaleur selon le produit. Si le produit sort trop froid au bout du tunnel, il sera friable, on parle donc de gaspille d'eau ou encore la formation d'une couche d'eau sur le produit empêchant le transfert de chaleur. À l'opposé, pas assez de jets d'eau et un produit trop chaud peut briser l'équipement, peut fusionner sur lui-même ou peut entraîner la réaction de certains éléments avec l'oxygène [26].

Du côté des gros moules, le métal liquide est vidé dans des moules ayant une capacité de transfert thermique. Ils sont protégés d'un agent de potage, donc le métal n'est pas directement en contact avec le moule. Un coussin de *fins* est ajouté au moule afin d'accueillir le métal qui tombe de la poche vers le moule. Ceci a pour but d'empêcher l'érosion du moule où le métal est coulé. Une fois coulé, le ferrosilicium est refroidi par la captation de la chaleur de la fonte qui est ensuite transmise à l'air ambiant. Le moule ne peut pas accueillir deux coulées consécutives, il doit refroidir entre chaque réception de métal pour conserver cette capacité de refroidissement.

Un concasseur à mâchoire permet un concassage primaire du métal refroidi provenant des gros moules. Les blocs de métal sont brisés en morceaux de 1 à 5 pouces de grosseurs puis entreposés dans des baies individuelles.

2.1.9 L'ACCUMULATION DE MÉTAL

L'accumulation de métal est une situation qui se produit lorsque la somme de la quantité de métal coulée et de la quantité de poussière générée est inférieure à la quantité de matières premières ajoutées. La quantité de métal accumulé est donnée par :

$$MetalAccumule(kg) = SiMatieresPremieres - SiPoussieres - SiCoulees. \quad (2.1)$$

Où SiMatieresPremieres est la quantité de Si dans les matières premières en kg, SiPoussieres est la quantité de Si dans la poussière en kg et SiCoulees est la quantité de Si dans les coulées de FeSi en kg.

Lorsque ce phénomène se produit, une certaine quantité de métal n'est pas sortie par le trou de coulée et est donc encore à l'intérieur du four. Les causes sont liées à une mauvaise réduction de la matière première, des conditions difficiles à la coulée, un four à basse charge faisant en sorte qu'une partie de l'énergie est distribuée différemment et influence le métal généré, un changement des matières premières affectant l'efficacité du four sans que les opérateurs connaissent l'impact. Les opérateurs peuvent être habitués à une valeur standard de métal à sortir et ne s'ajustent pas. La quantité d'accumulation de métal dans le four n'est pas précise et aura un impact direct sur la chimie d'une recette d'alliage. En effet, une quantité plus importante de métal dans la recette peut engendrer une diminution du pourcentage de

silicium et autres éléments. Il est donc important de connaître cette quantité afin de réussir une recette avec les bons paramètres chimiques.

2.2 LES PRINCIPES INFORMATIQUES

Cette section décrit les différentes conceptions informatiques du projet. En premier lieu, une définition des données massives et de ce que représente un bon ensemble de données est décrite. En deuxième lieu, la moyenne mobile et les systèmes d'aide à l'opérateur sont brièvement expliqués.

2.2.1 LES DONNÉES MASSIVES

Les données massives (Big Data) représentent des données qui dépassent la capacité de stockage habituel d'une base de données conventionnelle. Le Big Data nécessite des outils et des méthodes pour être en mesure d'extraire et d'analyser les données. Son gain de popularité est dû à l'augmentation du stockage, des capacités et de la puissance informatique disponible dans les organisations. Les données massives ont cependant leur limite. Il est important de faire attention au niveau de la qualité, la validation et le nettoyage des données, récolter toutes les données n'est pas toujours nécessaire. [27]

2.2.2 LA MOYENNE MOBILE

Une moyenne mobile est utilisée pour représenter et visualiser la tendance à la hausse ou à la baisse des valeurs d'une série de données. Les variations dans la moyenne suivent les

variations dans les données. La moyenne mobile est principalement utilisée dans des séries temporelles et doit constamment être recalculée. Elle consiste à calculer la moyenne d'un nombre k de données précédant un point précis. Le nombre k est choisi selon si on veut une moyenne à court, moyen ou long terme. Évidemment la précision par rapport à la valeur réelle du phénomène physique d'une moyenne mobile est limitée par la fréquence et la qualité des données utilisées.

2.2.3 LES SYSTÈMES EXPERTS

Les systèmes experts sont des programmes informatiques aidant les utilisateurs de ces systèmes à prendre des décisions. Ils renferment les connaissances des professionnels d'un domaine d'expertise et au besoin l'utilisateur interroge le système afin de connaître les procédures à effectuer lorsqu'une situation quelconque se produit. Le système pose une série de questions à l'utilisateur et propose la solution qui semble la meilleure selon les réponses reçues [28]. Il s'agit d'un système utilisant des règles ou des probabilités déterminées à partir des informations fournies tout au long de la vie du programme [29].

CHAPITRE III

MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre présente la méthodologie pour l'accomplissement d'une amélioration de l'estimation de l'accumulation de métal dans un four à arc à partir d'un système d'aide à l'opérateur déjà en place. Il sera d'abord question d'une introduction au milieu industriel où le projet s'est déroulé, puis une description et analyse de l'ancien calcul d'accumulation de métal extrait du système d'aide à l'opérateur chez Elkem métal Canada. Il sera ensuite question des modifications apportées au système en place. Finalement, une description plus complète de la procédure utilisée pour calculer le temps de latence par ordinateur de la transformation chimique des matériaux utilisés dans la production de ferrosilicium sera présentée.

3.1 ENVIRONNEMENT DE PROJET

Cette section décrit les diverses variables relatives à l'organisation du projet. Il est d'abord question de l'environnement et des divers éléments de l'entreprise où le projet se déroule. Il est ensuite décrit en plus amples détails le système d'aide à l'opérateur utilisé en date du 27 octobre 2021. Les problèmes de ce système et les solutions proposées seront finalement expliqués.

3.1.1 ELKEM MÉTAL CANADA

Le projet s'effectue en collaboration avec la compagnie Elkem ASA au Québec, Elkem métal Canada. Cette entreprise produit du ferrosilicium (FeSi) et produit par année entre 165 tonnes et 175 tonnes de ferrosilicium ayant une composition chimique constituée de 50% de silicium, entre 118 tonnes et 125 tonnes de ferrosilicium 65% et entre 104 tonnes et 114 tonnes de ferrosilicium 75%. Afin de produire une tonne de FeSi 75% il faut 1,1 tonne de quartz, 1,3 tonne de carbone, 0,7 tonne de charbon, 0,6 tonne de copeaux de bois, 0,65 tonne de fer, 0,37 tonne de calamine, 0,28 tonne de HBI (Hot Briquetted Iron) et une utilisation d'énergie d'environ 7,75 MWh.

Elkem métal Canada effectue une alternance de différentes recettes comparativement à d'autres usines n'ayant qu'une seule recette, ce qui ajoute une autre difficulté autant à la constance chimique du métal qu'aux différents procédés qui se doivent d'être dynamiques selon la recette en cours de production.

En 2014, l'entreprise a changé son four à arc électrique, ce qui signifie que les données significatives pour le projet débutent en janvier 2015.

3.1.2 ANCIEN CALCUL D'ACCUMULATION DE MÉTAL

Le système d'aide à l'opérateur, actuellement utilisé chez Elkem métal Canada, sert comme outil d'aide à la décision. Il renferme plusieurs informations de production en utilisant les multitudes de données acquises à l'aide de capteurs, de données entrées par les utilisateurs

et de données provenant des analyses du laboratoire interne. Parmi ces outils se trouve une première version de l'estimation de l'accumulation de métal dans le four.

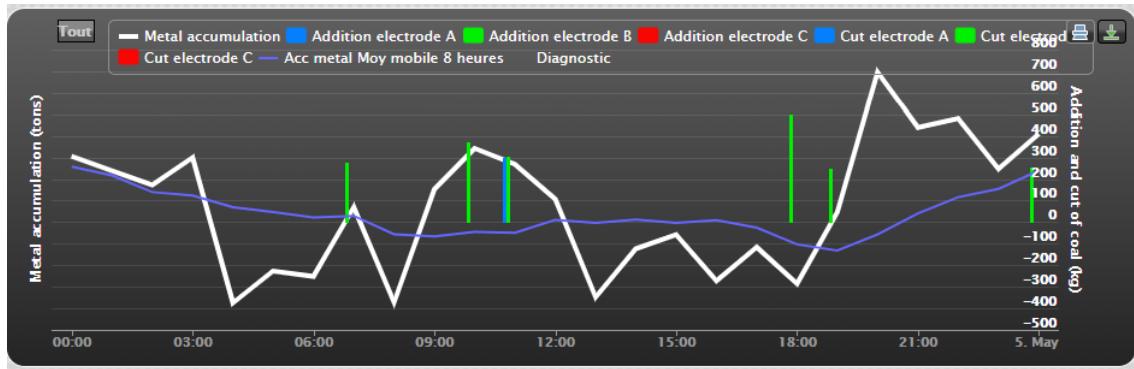


FIGURE 3.1 : Graphique d'accumulation de métal tiré du SAO

© Pierre-Yves Glidden, 2022.

La Figure 3.1 montre un graphique d'accumulation de métal dans un four à arc tel qu'il était avant le début de ce projet. Les 24 heures d'une journée spécifique sont présentées sur l'axe des abscisses tandis que l'axe des ordonnées, du côté gauche, montre le nombre de kilogrammes de métal accumulé estimé par le système. Toujours sur l'axe des ordonnées, du côté droit cette fois, se trouve le nombre de kilogrammes d'addition ou de coupure de charbon. La ligne épaisse représente la somme d'accumulation de métal estimé en kilogramme des 24 heures précédentes l'heure d'un point donné. Comme mentionné à la section 2.1.9, la formule « entrée - sortie » est utilisée pour estimer la quantité de métal généré pour chaque heure. Afin de calculer la matière première en entrée, la formule prend en compte la somme des quantités de matières premières ajoutées dans le four durant l'heure qui précède une certaine coulée et calcule la quantité de silicium du mélange selon le pourcentage théorique de Si contenu dans

chaque matériau. Afin de calculer la matière première totale en sortie, la quantité de silicium sortant de cette coulée est estimée en utilisant le pourcentage de Si de l'analyse au laboratoire et en le multipliant par la quantité totale de métal sortie. Lors du processus de production, une certaine quantité de poussière de silicium s'échappe des cheminées, cette quantité est aussi pesée et analysée et se retrouve donc dans le calcul. Le détail du calcul est décrit ci-après.

Les ensembles sont les suivants :

- $N = \{1, 2, \dots, n\}$: les types de matières premières où n est le nombre total de types.
- $T = \{1, 2, \dots, t\}$: l'ensemble total des heures T où t est le nombre total d'heures.

Les paramètres théoriques sont les suivants :

- x_{nt} poids de la matière première (Kg) du type $n \in N$ à l'heure $t \in T$
- S_n pourcentage de silicium contenu dans le type de matière première $n \in N$

Les paramètres observés sont les suivants :

- y_t poids de la poussière (Kg) à l'heure $t \in T$
- z_t poids de la coulée (Kg) à l'heure $t \in T$

La quantité totale de silicium ($SiMP_t$) dans la matière première à l'heure $t \in T$ est donnée

par :

$$SiMP_t = \sum_{i=t-1}^t \sum_{j=1}^n S_j x_{ij}. \quad (3.1)$$

La quantité totale de silicium (SiP) dans la poussière à l'heure $t \in T$ est donnée par :

$$SiP_t = \sum_{i=t-1}^t S_i y_i. \quad (3.2)$$

La quantité totale de silicium (*SiP*) au temps t dans les coulées de métals est donnée par :

$$SiC_t = \sum_{i=t-1}^t S_i z_i. \quad (3.3)$$

La quantité de métal accumulé (*MA*) au temps t est donnée par :

$$MA_t = SiMP_t - SiP_t - SiC_t. \quad (3.4)$$

En vue d'estimer l'accumulation totale en cours dans le four et non pas seulement l'accumulation générée pour une heure précise, l'accumulation de métal estimée d'une heure précise est additionnée avec toutes les accumulations estimées des 23 heures précédentes.

$$TotalMA_t(kg) = \sum_{n=t-23}^t MA_n. \quad (3.5)$$

L'algorithme exécuté sur les serveurs d'Elkem utilise le langage PHP [30]. Un tableau des 48 dernières heures est initialisé. Le système accède ensuite à la base de données Oracle [31] de la compagnie et récupère les tonnages des coulées de la journée et des 24 heures précédentes, ces tonnages sont regroupés par heure. Le système procède ensuite de la même façon et récupère les quantités de poussière et les matières premières pour les mêmes périodes que les coulées. Finalement, pour chaque heure du tableau le calcul d'estimation de l'accumulation

de métal est appliqué et ajouté au graphique.

3.2 MODIFICATIONS AU SYSTÈME EN PLACE

Afin d'améliorer la précision du calcul de l'accumulation de métal, plusieurs modifications doivent être effectuées sur le système en place. Cette section détaillera chacun des points retenus qui apporte une amélioration au calcul. Les principaux changements au calcul sont les suivants :

1. Effectuer le calcul d'accumulation de métal par coulées plutôt que par heure.
2. Ajouter au calcul d'accumulation de métal les données sur les quantités de fer.
3. Ajouter au calcul d'accumulation de métal le temps de réaction chimique de la matière première.
4. Ajouter au calcul d'accumulation de métal le type de FeSi actuellement en production.
5. Améliorer l'interface graphique.

Le premier point d'amélioration consiste à effectuer le calcul d'accumulation de métal par coulées. L'ancien calcul d'accumulation de métal est calculé par heure. Dans un contexte comme chez Elkem métal Canada, le four produit une coulée toutes les 45 à 65 minutes selon une consommation énergétique d'environ 31 MWh. Ceci signifie qu'il est parfois possible qu'aucune coulée ne soit effectuée durant une heure donnée ou même que deux coulées soient effectuées durant l'heure en question. Le but étant d'améliorer la précision du calcul d'accumulation de métal et donner une estimation juste dans le temps, effectuer un calcul par

coulée permet une vue plus exacte de la tendance.

Le deuxième point d'amélioration consiste à ajouter au calcul d'accumulation de métal les données sur les quantités de fer dans les mélanges de matières premières ainsi que dans les coulées de FeSi. Malgré que le silicium représente en majorité 50%, 65% et 75% du ferrosilicium produit, le deuxième élément présent en grande quantité est le fer représentant une quantité théorique approximative de 50%, 35% et 25% du ferrosilicium. En effet, bien que cet ajout peut représenter une faible amélioration du côté du FeSi 75%, il en est différemment du FeSi 50% où le fer représente la moitié du mélange. Effectuer un calcul d'accumulation de métal en prenant en compte le fer en plus du silicium peut fortement améliorer les résultats du calcul. L'ancien calcul d'accumulation de métal ne prenant pas en compte le fer, faisant abstraction de quantité importante portant un rôle considérable dans la production de FeSi.

Le troisième point qui suit est probablement l'un des plus importants changements au niveau du calcul d'accumulation de métal est le temps de latence, soit la considération du temps de réaction chimique de la matière première. Effectivement, l'ancien calcul d'accumulation de métal effectue la différence d'entrée de matière première de silicium avec la sortie totale de silicium au trou de coulée et au dépoussiéreur. Ce calcul est construit cependant de sorte à faire la différence d'entrées durant l'heure en cours et la sortie durant l'heure en cours. Il va de soi que l'apport des matières premières au processus prend un certain temps de transformation avant d'être réellement et complètement transformé en FeSi. Le nouveau calcul prend en considération cet élément et fait plutôt la différence des éléments ayant été ajoutée au processus durant la période totale du temps de latence.

Le quatrième point de modification est la considération du type de FeSi en production et des changements de type durant la production. L'ancien calcul d'accumulation de métal ne prend pas en compte le type de FeSi produit dans le calcul. Le nouveau calcul différencie le FeSi 50%, 65% et 75% autant dans le calcul des quantités de silicium et de fer dans la matière première que dans le calcul du temps de latence.

Le dernier point est celui de l'interface, bien qu'un changement au niveau de l'interface ne modifie pas le calcul en soi et les résultats de celui-ci, il en va différemment de l'interprétation du graphique. L'ancienne page du calcul d'accumulation de métal présente un graphique d'accumulation de métal compact à travers d'autres graphiques de production, un aperçu de cette interface est disponible en annexe à la Figure A.1. Une page attribuée uniquement à l'accumulation de métal avec un graphique épuré, clair et de grand format facilite l'interprétation des résultats du calcul d'accumulation de métal. Ce changement mineur peut tout de même avoir un impact sur les processus décisionnels des opérateurs en retirant les sections pouvant amener des distractions chez l'interpréteur. Un aperçu de la nouvelle interface est disponible en annexe à la Figure A.2.

3.2.1 NOUVEAU CALCUL D'ACCUMULATION DE MÉTAL

Le nouveau calcul prend en considération les améliorations de la section 3.2. Le nouveau calcul d'accumulation de métal est décrit ci-après. Puisqu'Elkem Métal produit 3 types différents de ferrosilicium, soit une teneur à 50%, 65% et 75%, le calcul doit être effectué pour chaque type. Dans un souci de clarté, la formulation générale est explicitée. Les paramètres

qui sont impactés par le type de ferrosilicium sont le pourcentage en fer (F_n) ainsi que le temps de latence l .

Les ensembles sont les suivants :

- $N = \{1, 2, \dots, n\}$: les types de matières premières où n est le nombre total de types.
- $T = \{1, 2, \dots, t\}$: l'ensemble total des heures T où t est le nombre total d'heures.

Les paramètres théoriques sont les suivants :

- x_{nt} poids de la matière première (Kg) du type $n \in N$ à l'heure $t \in T$
- l le temps de latence du type de ferrosilicium en production
- S_n pourcentage de silicium contenu dans le type de matière première $n \in N$
- F_n pourcentage de fer contenu dans le type de matière première $n \in N$

Les paramètres observés sont les suivants :

- y_t poids de la poussière (Kg) à l'heure $t \in T$
- z_t poids de la coulée (Kg) à l'heure $t \in T$

La quantité totale de fer et de silicium ($FeSiMP_t$) dans la matière première à la coulée $t \in T$ est donnée par :

$$SiMP_t = \sum_{i=t-l}^t \sum_{j=1}^n (S_j + F_j)x_{ij}. \quad (3.6)$$

La quantité totale de fer et de silicium ($FeSiP$) dans la poussière à l'heure $t \in T$ est donnée par :

$$SiP_t = \sum_{i=t-l}^t (S_i + F_i)y_i. \quad (3.7)$$

La quantité totale de fer et de silicium ($FeSiP$) au temps t dans les coulées de métals est donnée par :

$$SiC_t = \sum_{i=t-l}^t (S_i + F_i)z_i. \quad (3.8)$$

La quantité de métal accumulé (MA) au temps t est donnée par :

$$MA_t = FeSiMP_t - FeSiP_t - FeSiC_t. \quad (3.9)$$

Toujours en vue d'estimer l'accumulation totale en cours dans le four et non pas seulement l'accumulation générée pour une coulée de métal précise, l'accumulation de métal estimée d'une coulée de métal précise est additionnée avec toutes les accumulations estimées des 23 coulées précédentes.

$$TotalMA_t(kg) = \sum_{n=t-23}^t MA_n. \quad (3.10)$$

3.3 CALCUL DU TEMPS DE LATENCE

Le calcul du temps de latence est primordial. L'ancien calcul de l'accumulation de métal ne prend pas en compte ce concept et utilise les données de la matière première ajoutée au four durant l'heure où la coulée a lieu. Cependant, la matière première prend un temps avant de se rendre au four et d'être entièrement transformée [32]. Ainsi, la matière première ayant

un impact sur la chimie du FeSi n'est pas nécessairement celle ajoutée dans l'heure, mais peut être celle qui a été ajoutée il y a de cela 2 heures, peut être 3 heures, auparavant. Afin de calculer convenablement la différence entre la matière entrée et la matière sortie, il est impératif de connaître ce temps de latence, sinon les résultats seront erronés, puisque le calcul utilisera les quantités de matière en lien avec une autre coulée que celle que l'on a choisie.

Afin de calculer le temps de latence du procédé de production chez Elkem Métal Canada, les données entre le 1er janvier 2015 et le 16 juin 2021 ont été utilisées. Ayant changé leur four en 2014, les données précédant le 1er janvier 2015 ne sont pas représentatives et ont été retirées du calcul. Parmi les données sélectionnées se trouvent d'un côté les informations sur les quantités de matières premières ainsi que la date et l'heure de leur ajout au four. D'un autre côté se situent les informations sur les coulées de ferrosilicium, soit la date et l'heure, le tonnage, le pourcentage de silicium, le type de production et la puissance électrique du four au moment de la coulée. Les données sont comptabilisées à toutes les coulées, à environ toutes les heures pour les poussières et à toutes les 3 à 5 minutes pour la matière première. Ce qui représente une base de données contenant approximativement 75 000 lignes pour les coulées, 125 000 lignes pour les poussières et 800 000 lignes pour la matière première.

Pour trouver le temps de latence, il faut trouver des moments précis où une variation des quantités de matières premières ajoutées au four est considérable et calculer la différence avec le moment où un changement de chimie se fait sentir dans le produit. L'algorithme va comme suit : les données des matières premières et des analyses de coulées d'une même date et heure sont regroupées en une seule ligne, puis classées en ordre croissant par date et heure.

Le système cherche ensuite un changement important des quantités de matière première en parcourant les lignes une à une. Afin qu'un changement soit valide et considéré important, il faut que la différence entre le poids de l'entrée en cours soit supérieure ou inférieure à 3 fois le poids de l'entrée précédente. Une autre façon de détecter un changement est lorsqu'une absence d'ajout de matière première se fait sentir durant plus de 15 minutes, afin d'être calculé l'algorithme compare la date et l'heure de chaque entrée consécutive. Le tableau 3.1 présente un exemple de ce que représente un changement important dans la matière première.

TABLEAU 3.1 : Détection d'un changement de matière première

| Date Ajout Matière Première | Bois (kg) | Charbon (kg) | Quartz (kg) | Fer (kg) |
|-----------------------------|-----------|--------------|-------------|----------|
| 2017-06-30 20 :06 | 404,92 | 395,70 | 699,06 | 100,31 |
| 2017-06-30 20 :09 | 395,07 | 396,32 | 728,20 | 100,78 |
| 2017-06-30 20 :14 | 393,04 | 390,54 | 689,29 | 95,70 |
| 2017-06-30 20 :22 | | | | 696,79 |
| 2017-06-30 20 :25 | | | | 701,71 |
| 2017-06-30 20 :29 | | | | 703,82 |

La première colonne indique la date et l'heure d'un ajout de matière première au four. Les autres colonnes indiquent la quantité en kilogramme ajoutée de la matière première, soit le bois, le charbon, le quartz et le fer. L'absence de quantité de bois, de charbon et de quartz dans les entrées qui suit 20h14 montre une coupure de matière première. Un autre indicateur de coupure est la différence de temps entre les entrées de 20 h 14 et 20 h 22 est de 8 minutes montrant qu'aucune matière première a été ajoutée entre les deux entrées. Ce délai est supérieur à la moyenne d'ajout de matière qui se fait normalement toutes les 3 à 4 minutes.

Du côté du fer un important changement se fait sentir à 20 h 22 avec une augmentation représentant un peu plus de 7 fois la quantité de 20 h 14. Il est hors de tout doute qu'un tel changement aura un impact sur la chimie de la coulée dans les prochaines heures.

Le tableau 3.2 affiche un exemple de la détection du changement de chimie dans les analyses des coulées de ferrosilicium. Les colonnes du tableau affichent respectivement la date et l'heure de la coulée de FeSi, l'énergie consommée entre la coulée et celle qui la précède, le tonnage de FeSi qui s'est écoulé du four, le pourcentage de silicium analysé pour la coulée et le type de ferrosilicium produit durant la coulée. Du côté de l'algorithme, le système va utiliser ces données afin de détecter la variation d'énergie, la différence de tonnage et le plus important la différence des pourcentages de silicium entre deux coulées.

TABLEAU 3.2 : Détection d'un changement de chimie

| Date Analyse Chimique | Consommation énergétique du four (MWh) | Poids de la coulée (Tonnes) | Taux de Silicium (%) | Changement de Type (% de Si) |
|-----------------------|--|-----------------------------|----------------------|------------------------------|
| 2017-06-30 23 :13 | 31,37 | 4,22 | 72,34 | 75 |
| 2017-06-30 23 :56 | 30,84 | 5,05 | 54,60 | 50 |

Le tableau 3.3 affiche les 10 premiers résultats de l'algorithme du temps de latence. Les deux premières colonnes sont respectivement la date et l'heure qu'un changement de quantité de matière première a été détecté et la date et l'heure qu'un changement de chimie dans l'analyse des coulées a été détecté à la suite du changement de matière première. La troisième colonne est le résultat de la différence des deux premières colonnes déterminant ainsi

le temps de latence du procédé de production par le four. Les deux prochaines colonnes sont la moyenne d'énergie en MWh que le four a utilisé pour la production et le temps d'opération total durant la période de latence. Ces deux colonnes sont utilisées pour déterminer si le four était suffisamment en production pour être considéré dans le temps médian de la transformation des éléments. La dernière colonne, changement de type, est utilisée afin de regrouper les temps de latence par type de ferrosilicium en production.

TABLEAU 3.3 : Premiers résultats des détections du temps de latence

| Date Changement matière première | Date Changement chimie | Temps de latence (heures) | Moyenne de consommation énergétique (MWh) | Temps d'opération (%) | Changement de type (%Si) |
|----------------------------------|------------------------|---------------------------|---|-----------------------|--------------------------|
| 03/09 04 :19 | 03/09 06 :45 | 2 :35 :34 | 27,286 | 97,1 | 75->75 |
| 03/12 10 :42 | 03/12 11 :50 | 1 :07 :32 | 30,832 | 97,2 | 75->50 |
| 03/23 07 :31 | 03/23 13 :11 | 5 :39 :34 | 36,823 | 100,0 | 50->50 |
| 03/24 09 :04 | 03/24 13 :38 | 4 :33 :37 | 36,076 | 100,0 | 50->65 |
| 04/03 13 :53 | 04/03 18 :12 | 4 :18 :33 | 33,943 | 99,3 | 75->75 |
| 04/14 08 :01 | 04/14 09 :54 | 1 :52 :33 | 31,467 | 100,0 | 75->75 |
| 04/15 13 :30 | 04/15 15 :21 | 1 :50 :57 | 35,058 | 99,4 | 75->50 |
| 04/21 15 :23 | 04/21 18 :03 | 2 :39 :33 | 24,501 | 85,3 | 75->50 |
| 04/22 15 :51 | 04/22 19 :25 | 3 :33 :32 | 33,652 | 98,6 | 50->50 |
| 04/30 06 :58 | 04/30 11 :28 | 4 :29 :40 | 30,761 | 99,2 | 75->50 |

Le tableau 3.4 présente le nombre de changements de chimie détecté par l'algorithme comparativement au nombre réel de changements de type effectué lors de la production. Pour qu'un changement de chimie soit retenu, la différence du pourcentage de silicium entre deux coulées de FeSi doit être supérieure à 5%. Par conséquent, plusieurs changements chimiques ont été détectés entre des coulées de même type malgré qu'il s'agissait théoriquement du

même produit.

Une fois que l'algorithme a parcouru la totalité des données sélectionnées, le programme enregistre un fichier en format CSV comprenant toutes les informations du tableau 3.3. Le fichier est ensuite récupéré et analysé à l'aide du langage de programmation Python [33] et de la librairie pandas [34]. Le temps de latence médian tous types confondus est d'environ 3 heures et 31 minutes. Par contre, le temps peut différer d'un type de FeSi à l'autre, les données sont donc regroupées par changement de type et les médIANes sont calculées par groupes. Le tableau 3.5 affiche les résultats obtenus des médIANes par changement de type pour le temps de latence et les MWh.

Pour mieux visualiser les données engendrées par l'algorithme, les Figures 3.2 et 3.3 présentent tous deux des diagrammes de boîtes à moustaches [35]. Pour toutes les boîtes, la ligne verticale à l'extrême droite de la section représente le maximum et la ligne extrême gauche représente le minimum, c'est ligne sont appelées les moustaches. Le côté droit de la boîte représente le quartile supérieur, le côté gauche représente le quartile inférieur et la ligne du milieu représente la médiane. Finalement, les points se trouvant à l'extérieur des moustaches représentent des données aberrantes [36].

La Figure 3.2 affiche les boîtes à moustache des moyennes de MWh du four lors de la production pour les périodes recueillies par le temps de latence selon le type de changement de chimie du FeSi. La première constatation est la forte présence de données aberrantes dans le jeu de données en question. En effet, la plupart des données se situant en dessous de 25 MWh

sont détectées comme étant non significatives dans le graphique. Cette situation est légitime, puisque la production significative est celle utilisant une consommation énergétique de plus de 31 MWh. La deuxième constatation est que les médianes de MWh dans le diagramme se situent principalement dans les 35 MWh, confirmant une fois de plus que les données significatives se situent dans une échelle supérieure à une consommation énergétique de 31 MWh.

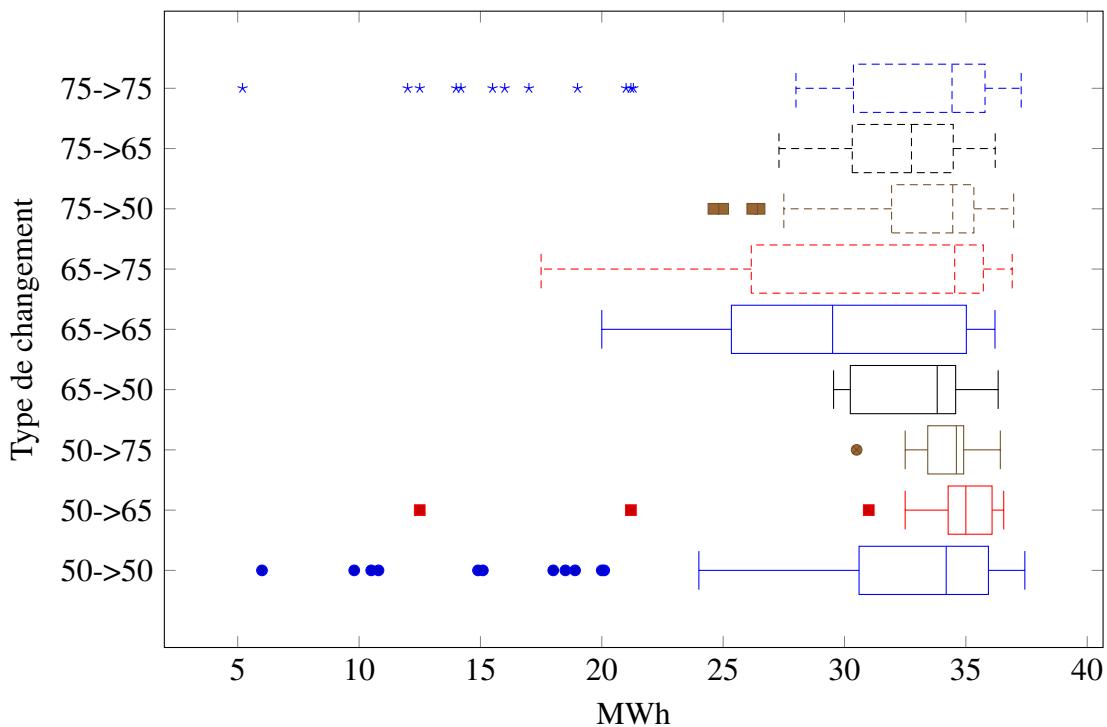


FIGURE 3.2 : MWh du temps de latence

© Pierre-Yves Glidden, 2022.

La Figure 3.3 affiche les boîtes à moustache du temps de latence pour les périodes de temps de latence détectées par l'algorithme. La constatation qui est importante dans la figure est que les médianes du temps de latence sont situées entre 3 h et 5 h pour tous les changements

de type. Il va donc de soi que l'ancien calcul faussait une partie importante des données en prenant en compte seulement les matières premières entrées durant l'heure de la coulée. En effet, suite à cette observation, les matières devant être récoltées dans le calcul se situent entre les 3 h et 5 h avant que la coulée ne soit produite. Cependant, la Figure 3.2 a montré qu'une certaine partie des données est sujette à être retirée du calcul.

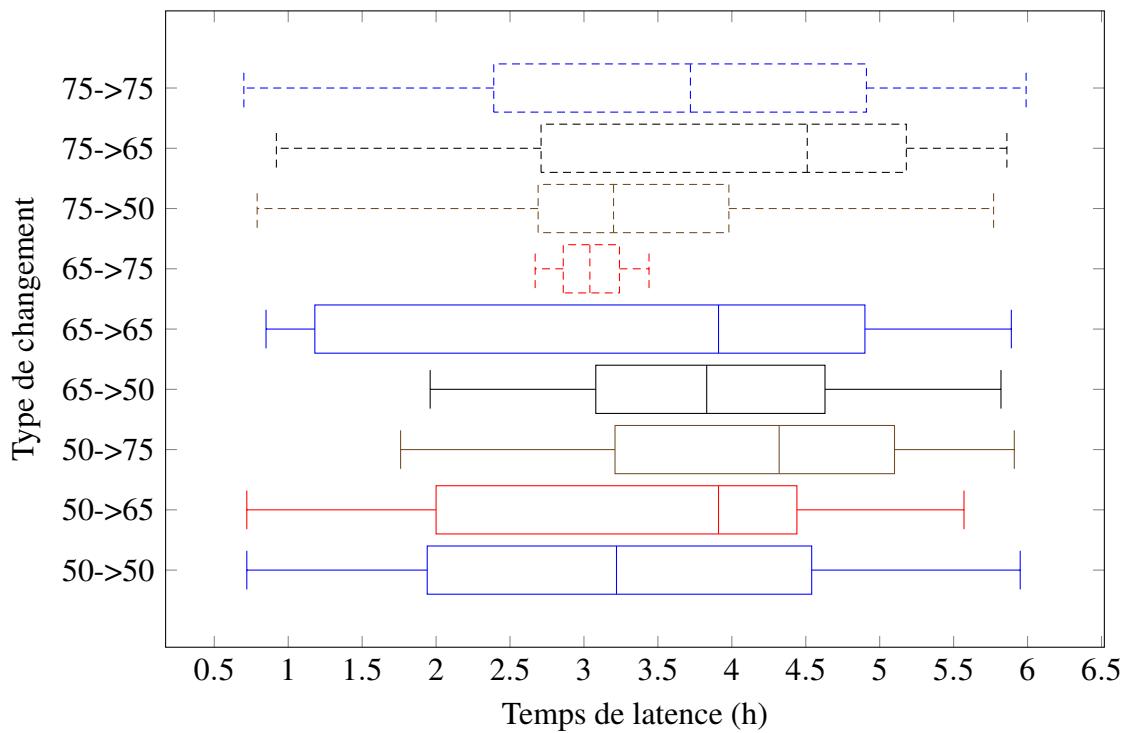


FIGURE 3.3 : Temps de latence

© Pierre-Yves Glidden, 2022.

Bien qu'Elkem métal Canada soit ouvert 24 h par jour, 7 jours sur 7, il peut arriver que de la maintenance sur le four doit être effectuée. Par conséquent, il existe certaines périodes où la production est en cours d'arrêt ou est relancée. Le four ne fonctionne donc pas complètement et les données recueillies durant ces périodes ne sont pas représentatives

de l'état réel des procédés de production. Il faut donc retirer ces périodes de coupure qui falsifient les résultats du temps de latence. Pour se faire, seules les données renfermées dans les périodes où le four possède une consommation énergétique d'un minimum de 31 MWh sont gardées dans l'équation. Le Tableau 3.4 affiche les quantités de changement détecté ayant une consommation d'énergie supérieur à 31 MWh comparativement à toutes les détections et les changements de production réels. Cette opération fait passer la quantité de résultats détectés de 426 à 327 résultats répartis dans différents groupes de changement de type.

TABLEAU 3.4 : Nombre de changement de type

| Changement Type | Détecté > 31 MWh | Total détecté | Réel |
|-----------------|------------------|---------------|------|
| 50->50 | 111 | 151 | 0 |
| 50->65 | 37 | 39 | 65 |
| 50->75 | 8 | 9 | 11 |
| 65->50 | 5 | 8 | 18 |
| 65->65 | 3 | 8 | 2 |
| 65->75 | 2 | 3 | 96 |
| 75->50 | 43 | 54 | 57 |
| 75->65 | 2 | 3 | 49 |
| 75->75 | 116 | 161 | 2 |

Le Tableau 3.5 affiche les temps des latences médians calculés ayant une consommation énergétique moyenne supérieure à 31 MWh. Le Tableau 3.5 comprend plusieurs informations afin d'offrir une meilleure comparaison des temps de latence avant et après le filtre de la consommation énergétique supérieur à 31 MWh..

TABLEAU 3.5 : Médianes du temps de latence

| Changement Type | Temps de latence | Temps de latence > 31 MWh | MWh | MWh > 31 MWh |
|-----------------|------------------|------------------------------|-------|-----------------|
| 50->50 | 3 :13 :34 | 3 :13 :34 | 34,19 | 35.31 |
| 50->65 | 3 :54 :38 | 3 :56 :38 | 35,01 | 35.20 |
| 50->75 | 4 :19 :39 | 4 :32 :07 | 34,61 | 34.65 |
| 65->50 | 3 :50 :03 | 3 :28 :31 | 33,82 | 34.55 |
| 65->65 | 3 :55 :06 | 1 :17 :35 | 29,51 | 35.85 |
| 65->75 | 3 :02 :34 | 2 :51 :36 | 34,54 | 35.72 |
| 75->50 | 3 :12 :06 | 3 :12 :35 | 34,46 | 35.05 |
| 75->65 | 4 :30 :36 | 5 :11 :06 | 32,76 | 34.48 |
| 75->75 | 3 :43 :36 | 3 :29 :33 | 34,43 | 35.29 |

La Figure 3.4 présente le diagramme à moustache de la consommation énergétique du four des données faisant partie du calcul du temps de latence ayant plus de 31 MWh. La plupart des données aberrantes de la Figure 3.3 ont été retirées en filtrant les consommations énergétiques du four supérieures à 31 MWh. Ceci engendre une vue plus rapprochée et précise des ensembles de données représentées dans le diagramme.

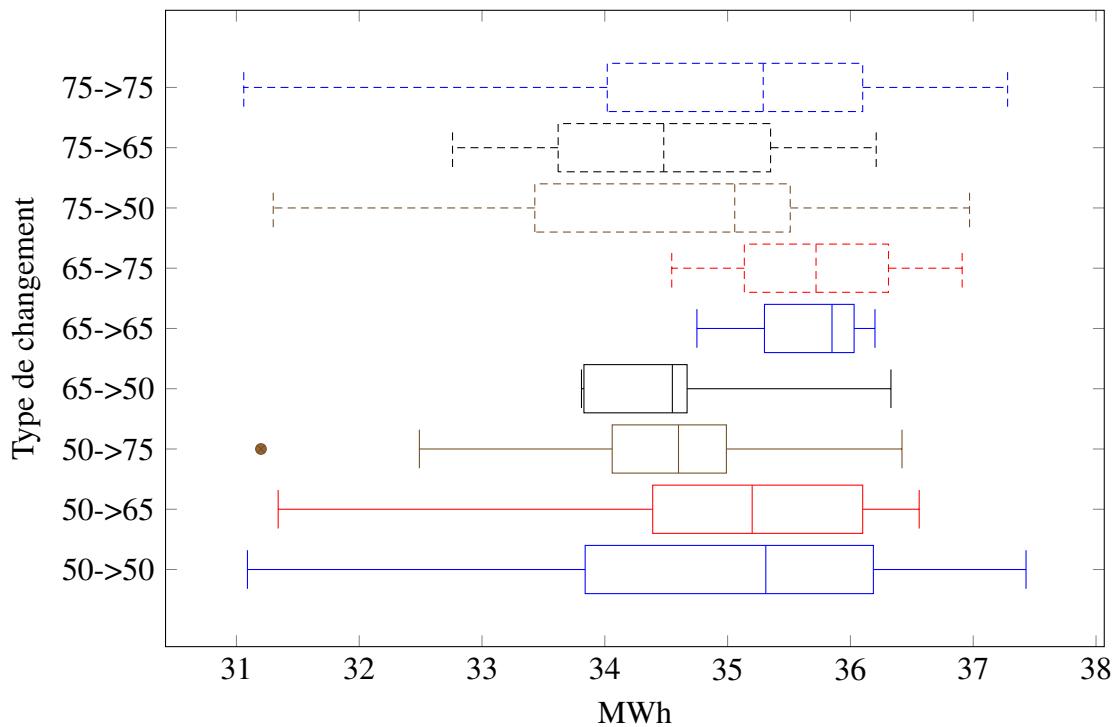


FIGURE 3.4 : MWh du temps de latence > 31 MHw

© Pierre-Yves Glidden, 2022.

La Figure 3.5 présente le diagramme à moustache du résultat final du temps de latence une fois filtrée par une consommation énergétique du four supérieur à 31 MWh. La figure montre un écart important du temps de latence entre les différents types de chimie. Il est donc important d'ajouter comme variable au calcul le type de chimie lors de la coulée et s'il s'agit de changement de type. Ceci déterminera le temps de latence à considérer et ainsi la période de matières premières entrées dans le four qui sera récoltée pour le calcul.

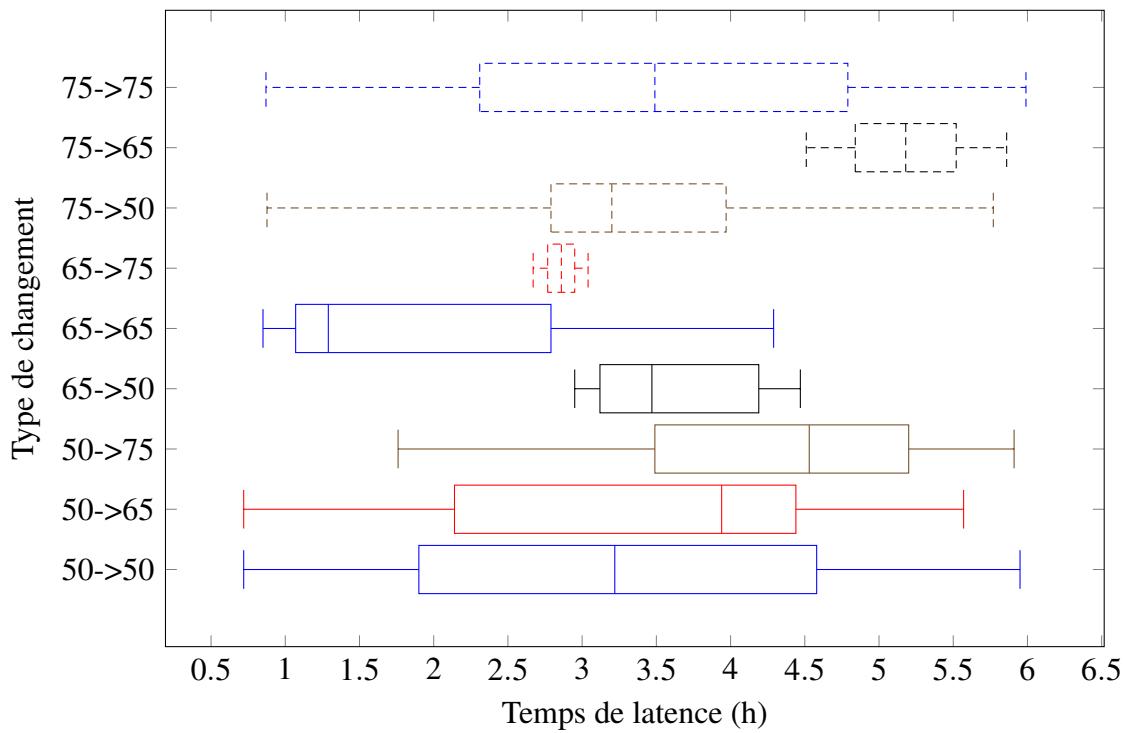


FIGURE 3.5 : Temps de latence > 31 MWh

© Pierre-Yves Glidden, 2022.

Finalement cette section a montré les étapes à suivre afin de calculer par ordinateur le temps de latence et de transformation chimique dans la production de ferrosilicium. Il est important de connaître le temps de latence puisqu'il permettra de calculer la période de temps significative où les apports de matières premières seront additionnés afin de connaître les quantités de silicium et de fer en entrées. Ces données entrantes seront ensuite utilisées dans le calcul d'accumulation de métal afin de connaître les quantités de matières premières restantes dans le four.

CHAPITRE IV

RÉSULTATS

Ce chapitre présente les résultats obtenus par le nouveau calcul de l'estimation de l'accumulation de métal dans un four à arc développé lors de ce projet. Les résultats sont divisés en trois sections. La première section consiste à un ensemble de données statistiques sur la production de ferrosilicium pour l'année 2020. La deuxième section présente trois exemples de résultats montrant la détection d'une accumulation de métal et finalement la dernière section présente trois autres exemples de résultats montrant une production standard sans accumulation de métal. Le Tableau 4.1 montre les dates d'accumulations certaines et de productions standards sélectionnées. Les données utilisées proviennent des tables de production et d'analyse enregistrées dans la base de données d'Elkem Métal Canada qui sont situées entre le 1er janvier 2015 et le 16 juin 2021. Les données ont été fournies par la compagnie pour une période d'environ 12 mois.

TABLEAU 4.1 : Tableau des résultats retenus

| Accumulation certaine | Production standard |
|-----------------------|---------------------|
| 4 décembre 2020 | 12 janvier 2020 |
| 9 février 2021 | 15 Mars 2020 |
| 1 juin 2021 | 22 janvier 2021 |

4.1 STATISTIQUES DE PRODUCTION

Afin de comparer adéquatement le poids d'une coulée unitaire, il est important de connaître la tendance générale des coulées annuellement. Le Tableau 4.2 présente les données statistiques du poids des coulées de l'année 2020 par type de produit, soit le ferrosilicium ayant une chimie d'environ 50%, 65% et 75% de silicium pour des productions utilisant une énergie de four de plus de 31 MWh.

TABLEAU 4.2 : Poids de production pour l'année 2020

| Type de production (%) | Minimum (T) | Maximum (T) | Moyenne (T) | Médiane (T) | Quantité total de coulées |
|------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|---------------------------|
| 50 | 1,30 | 9,75 | 6,49 | 6,54 | 2 146 |
| 65 | 2,03 | 7,69 | 4,63 | 4,67 | 300 |
| 75 | 1,03 | 9,00 | 4,30 | 4,36 | 5 710 |

L'année 2020 a généré un total de 2 146 coulées de ferrosilicium (FeSi) 50%, un total de 300 coulées de ferrosilicium 65% et un total de 5 710 coulées de ferrosilicium 75% toujours avec une consommation énergétique ayant un minimum de 31 MWh. Le poids médian par coulée du FeSi 50% est de 6,54 tonnes, 4,67 tonnes pour le 65% et 4,36 tonnes pour le ferrosilicium 75%.

Le poids minimum d'une coulée de ferrosilicium 50% était de 1,3 tonne en 2020, celui du 65% de 2,03 tonnes et 1,03 tonne pour le 75%. En vérifiant les données de production des dates où ces minimums ont été enregistrés dans la base de données, il est possible de comprendre qu'il s'agit parfois de coulées se situant immédiatement avant un arrêt de production et parfois

de coulées se situant immédiatement après la reprise d'une production. Dans le cas d'un début de production suivant un arrêt du four, le four n'a pas eu le temps d'atteindre la bonne température et la bonne quantité de matière première malgré une consommation énergétique de plus de 31 MWh. Par conséquent, une faible quantité de métal a pu s'écouler par le trou de coulée. Dans le cas d'une fin de production précédant un arrêt du four, aucune matière première n'est ajoutée et le four est vidé des restes de métal se trouvant à l'intérieur. La dernière possibilité est évidemment que le métal n'a pas réussi à couler suffisamment provoquant une accumulation de métal.

Le poids maximum d'une coulée de ferrosilicium 50% était de 9,75 tonnes en 2020, celui du 65% était de 7,69 tonnes et 9 tonnes pour le 75%. Encore une fois plutôt écartées de la moyenne, ces données peuvent s'expliquer par une accumulation de métal s'étant écoulé ou par un fort apport en matières premières. Les dates ayant sorti ces tonnages pourraient être sujettes à investigation par les métallurgistes à l'aide du logiciel d'accumulation de métal.

4.2 ACCUMULATIONS DÉTECTÉES

Afin de démontrer la validité des résultats engendrés par le nouveau calcul développé dans le cadre de ce mémoire, il est important de déceler des dates cibles qu'une accumulation de métal était hors de tout doute présente dans le four. Ainsi avec l'aide des métallurgistes d'Elkem métal Canada, plusieurs dates ont été ciblées comme des jours où une accumulation de métal est certaine et a impacté les processus de production. Chacune des dates formant les sections comporte la journée précédente, la journée même et la journée suivante afin de

donner une image globale de la variation du métal accumulé dans le four. Pour toutes les dates, le document présente les graphiques obtenus par le calcul, des tableaux contenant des informations statistiques et des comparaisons aidant la compréhension des graphiques, une interprétation des valeurs théoriques et réelles, une comparaison des quantités obtenues et des quantités médianes annuelles et finalement une comparaison entre les résultats de l'ancien calcul d'accumulation de métal et du nouveau calcul d'accumulation de métal.

4.2.1 ACCUMULATION CERTAINE : 4 DÉCEMBRE 2020

Parmi les dates de grandes accumulations se trouvent la journée du 4 décembre 2020 où l'usine était en production de ferrosilicium 75%. Cette date a été signalée par les métallurgistes d'Elkem comme étant un jour où une accumulation de métal certaine a affecté les procédés de production. En effet, une bonne quantité de matières premières fut ajoutée dans le four sans une coulée de métal conséquente. La journée suivante a connu des records de production en fournissant au trou de coulée une quantité importante de métal. Un record de production précédé d'une mauvaise journée de production confirme l'hypothèse des métallurgistes qu'une accumulation s'est produite la veille.

4.2.1.1 JOUR PRÉCÉDENT

La Figure 4.1 présente le résultat des calculs d'accumulation de métal par le système d'aide à l'opérateur. Les lignes minces montrent la valeur de l'accumulation de métal à un

moment précis de la journée du 3 décembre 2020, soit une accumulation ponctuelle. Les lignes épaisses montrent la valeur de la moyenne mobile de l'accumulation de métal des 8 dernières heures. Finalement le pointillé présente les anciennes données du SAO tandis que les lignes pleines présentent celles du nouveau calcul.

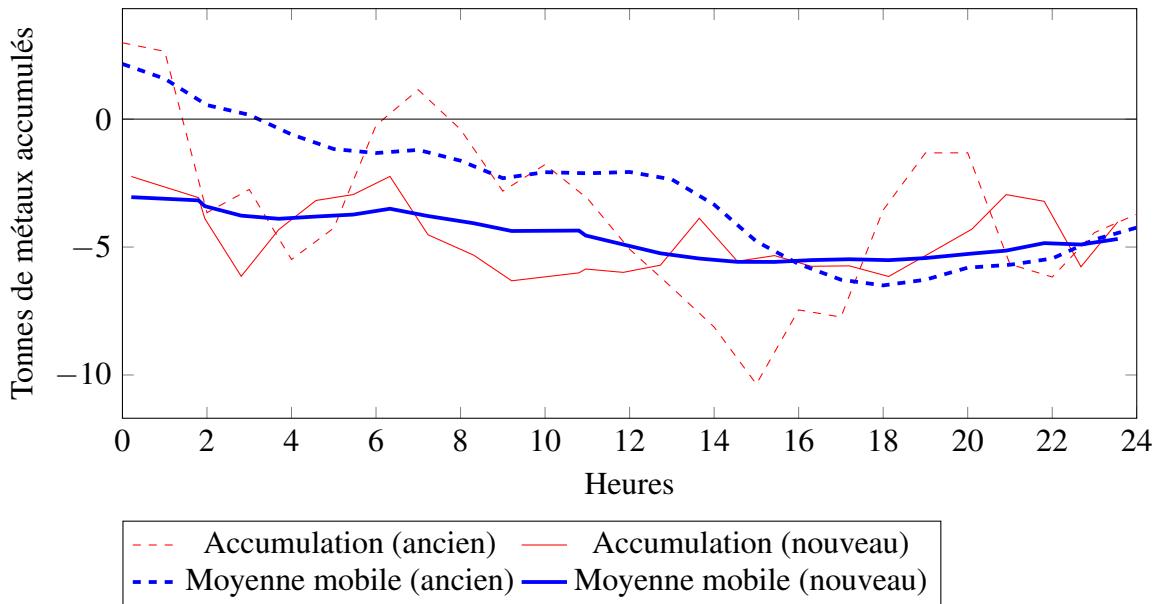


FIGURE 4.1 : Accumulation de métal du 3 décembre 2020

© Pierre-Yves Glidden, 2022.

Le Tableau 4.3 permet de connaître certaines statistiques de la journée servant à mieux interpréter les résultats. Il présente certaines informations importantes sur l'accumulation de métal pour la journée du 3 décembre 2020, notamment le nombre de coulées totales de la journée, le poids moyen des coulées de la journée ainsi que le poids total de métal engendré par ces coulées. Il présente aussi les sommes de Si et Fe théoriques totales en entrées et en sorties. Finalement ce tableau montre les quantités de poussières générées par le four qui ont

été attrapées par le dé poussiéreur.

TABLEAU 4.3 : Données de production du 3 décembre 2020

| Nom | Valeur |
|--|---------------|
| Nombre de coulées | 27 |
| Somme des Si et Fe théorique entrés dans le four | 116,61 tonnes |
| Somme des Si et Fe sortie du four (avec poussière) | 124,99 tonnes |
| Poids total des coulées dans la journée | 123,52 tonnes |
| Poussière total dans la journée | 2,94 tonnes |
| Poids moyen des coulées de la journée | 4,57 tonnes |

Le Tableau 4.4 indique les minimums et les maximums de l'accumulation de métal durant la journée pour l'accumulation ponctuelle et la moyenne mobile de l'ancien calcul et du nouveau calcul. Il indique aussi la première valeur estimée en début de journée et la dernière valeur estimée en fin de journée pour la moyenne mobile et l'accumulation ponctuelle. Il est possible d'apercevoir une forte différence entre les données du nouveau calcul et de l'ancien. Dans le cas de l'ancien calcul, les données montrent une accumulation de métal pour les maximums et pour les valeurs en début de journée alors que du côté du nouveau calcul les données montrent plutôt un drainage.

TABLEAU 4.4 : Comparaison du 3 décembre 2020

| Accumulation | Ancien (tonnes) | Nouveau (tonnes) |
|-----------------------------|--------------------|---------------------|
| Minimum ponctuel | -10,35 | -6,31 |
| Maximum ponctuel | 2,98 | -2,23 |
| Minimum moyenne mobile | -6,49 | -5,58 |
| Maximum moyenne mobile | 2,15 | -3,04 |
| Ponctuelle début de journée | 2,98 | -2,24 |
| Ponctuelle fin de journée | -3,71 | -4,01 |
| Mobile début de journée | 2,15 | -3,05 |
| Mobile fin de journée | -4,24 | -4,68 |

En explorant d'abord la moyenne mobile du nouveau calcul à la Figure 4.1, il est possible d'observer, d'une heure à l'autre, une constance au niveau de la sortie du ferrosilicium. La journée débute avec des coulées ayant des quantités de sorties plus élevées que la quantité de matière première entrée dans le four provoquant ainsi un drainage affichant une approximation négative de l'accumulation de -2,24 tonnes à la première coulée et de -4,01 tonnes à la dernière coulée. Cette situation s'explique lorsqu'une accumulation de métal s'est produite récemment et que la quantité de métal en sortie dépasse la quantité de matière en entrée. La tendance montre un faible drainage de métal tout au long de ces 24 heures, il est donc concevable d'affirmer qu'une petite quantité de métal s'est accumulée durant la journée précédente et que le four a sorti la quantité excédentaire durant la journée.

4.2.1.2 JOUR D'ACCUMULATION

La Figure 4.2 présente les résultats de l'estimation de l'accumulation de métal du 4 décembre 2020. La Figure 4.2 affiche une absence d'accumulation au début de la journée. Il est aussi possible de constater une accumulation progressive s'étant déroulée principalement entre 00h25 et 13h54. À partir de la coulée de 13h54, le four ne semble pas avoir accumulé davantage, mais a tout de même conservé les surplus. La dernière coulée présente un total cumulé d'environ 4,08 tonnes, soit pratiquement la quantité d'une coulée complète. La moyenne mobile aide à mieux visualiser la progression, elle permet d'adoucir les données aberrantes en montrant une vue d'ensemble sur la tendance de l'accumulation de métal.

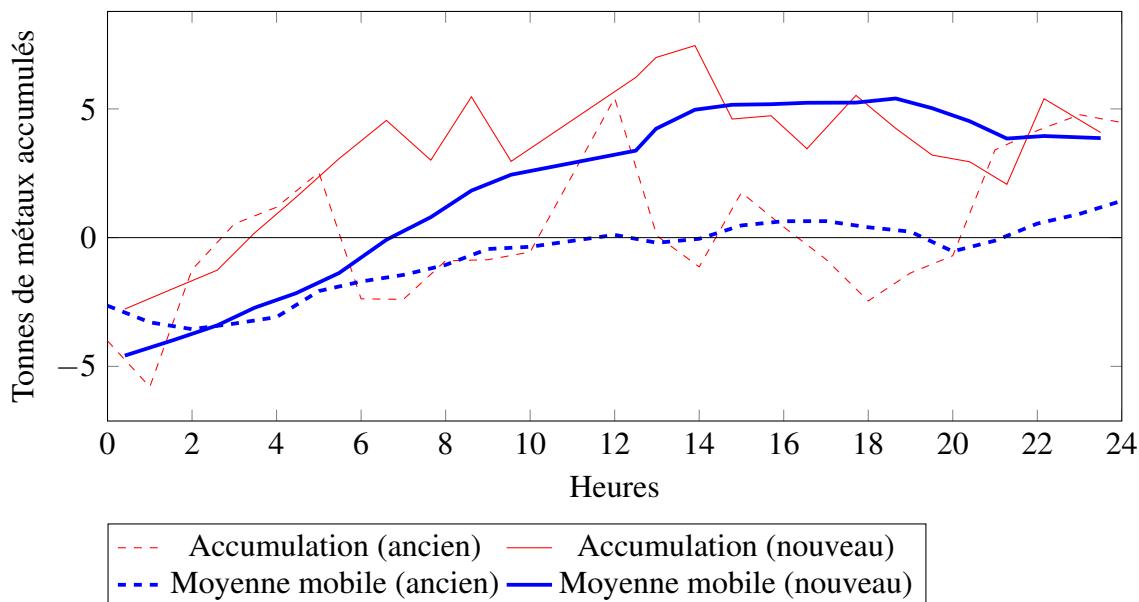


FIGURE 4.2 : Accumulation de métal du 4 décembre 2020

© Pierre-Yves Glidden, 2022.

Les Tableaux 4.5 et 4.6 permettent de connaître différentes statistiques sur l'accumulation

de métal de cette journée et ainsi mieux interpréter la Figure 4.2.

TABLEAU 4.5 : Données de production du 4 décembre 2020

| Nom | Valeur |
|--|---------------|
| Nombre de coulées | 23 |
| Somme des Si et Fe théorique entrés dans le four | 99,54 tonnes |
| Somme des Si et Fe sortie du four (avec poussière) | 96,07 tonnes |
| Poids total des coulées dans la journée | 93,455 tonnes |
| Poussière total dans la journée | 3,4 tonnes |
| Poids moyen des coulées de la journée | 4,06 tonnes |

TABLEAU 4.6 : Comparaison du 4 décembre 2020

| Accumulation | Ancien (tonnes) | Nouveau (tonnes) |
|-----------------------------|--------------------|---------------------|
| Minimum ponctuel | -5,79 | -2,77 |
| Maximum ponctuel | 5,42 | 7,45 |
| Minimum moyenne mobile | -3,55 | -4,58 |
| Maximum moyenne mobile | 1,42 | 5,40 |
| Ponctuelle début de journée | -4,00 | -2,77 |
| Ponctuelle fin de journée | 4,47 | 4,08 |
| Mobile début de journée | -2,64 | -4,58 |
| Mobile fin de journée | 1,42 | 3,86 |

La somme totale des éléments de silicium et de fer dans la matière première ajoutée au four pour cette journée est de 99,54 tonnes. En calculant la somme de ces deux éléments aux trous de coulée et aux filtreurs de poussières, le total de silicium et de fer sortant du procédé durant ce jour est de 96,07 tonnes. Ainsi en calculant la différence entre l'entrée totale et la sortie totale pour ce jour, une accumulation d'environ 3,47 tonnes de silicium et de fer pur se serait formée dans le four. Les autres éléments pouvant être présents en faibles quantités

dans le mélange, comme l'aluminium et le calcium, ne sont pas pris en compte puisqu'ils ne représentent qu'un maximum de 5% du mélange.

Le poids médian d'une coulée pour la production de ferrosilicium 75% était de 4,36 tonnes en 2020. Il y a eu 23 coulées chez Elkem métal Canada le 4 décembre 2020 ayant un poids totalisant 93,45 tonnes de ferrosilicium. En calculant le poids total médian, il y aurait dû avoir approximativement 100,28 tonnes de métal ce jour-là. La différence des deux quantités révèle la possibilité d'une accumulation totalisant 6,83 tonnes, soit une accumulation s'approchant d'une fois et demie une coulée standard.

Le calcul de l'accumulation de métal ponctuel de l'ancienne courbe du système d'aide à l'opérateur présente plusieurs heures ayant une accumulation élevée comparativement à la tendance du 4 décembre 2020. La nouvelle courbe, quant à elle, est beaucoup plus stable et présente moins de variations. Du côté de la moyenne mobile de l'ancienne courbe, une légère augmentation du métal dans le four est perçue jusqu'à un seuil normal et respectable soit entre -1 tonne et 1 tonne de métal accumulé durant la journée pour atteindre un maximum approximatif de 1,4 tonne de métal en fin de journée. La nouvelle courbe démontre toutefois une accumulation importante débutant à 6h36, atteignant une stabilité vers 13h54 pour atteindre un maximum approximatif de 3,8 tonnes de métal en fin de journée.

4.2.1.3 JOUR SUIVANT

La Figure 4.3 présente le jour suivant l'accumulation certaine du 4 décembre et montre les résultats d'un jour ayant un surplus de métal dans le four.

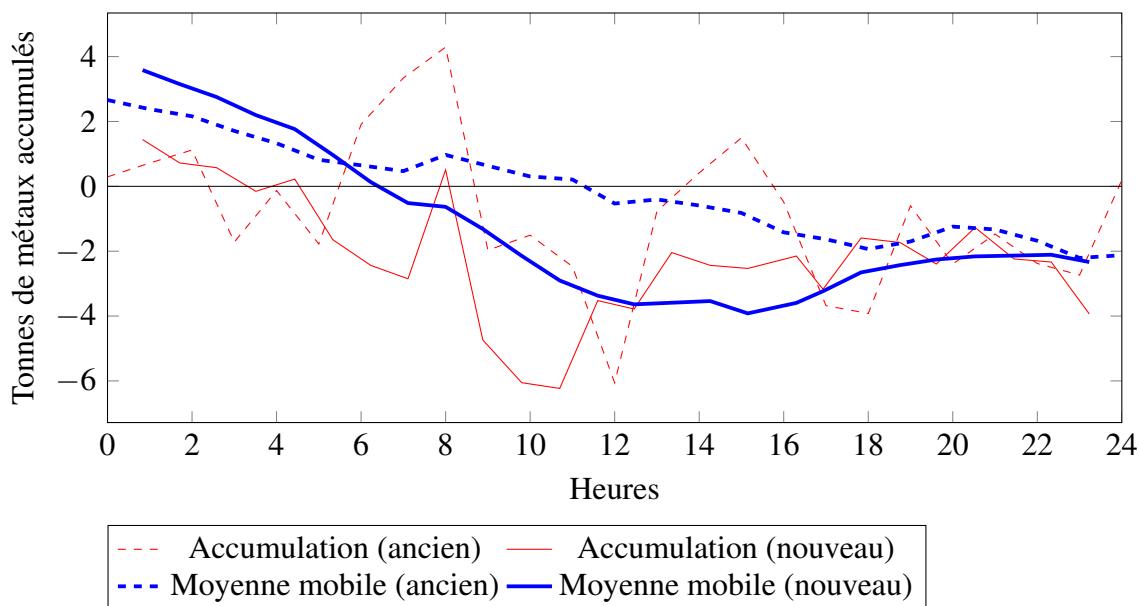


FIGURE 4.3 : Accumulation de métal du 5 décembre 2020

© Pierre-Yves Glidden, 2022.

Les Tableaux 4.7 et 4.8 permettent de connaître différentes statistiques du jour suivant l'accumulation de métal certaine du 4 décembre 2020 et ainsi mieux interpréter la Figure 4.3.

TABLEAU 4.7 : Données de production du 5 décembre 2020

| Nom | Valeur |
|---|---------------|
| Nombre de coulées | 26 |
| Somme des Si et Fe théorique entrés dans le four | 109,41 tonnes |
| Somme des Si et Fe sorti du four (avec poussière) | 114,01 tonnes |
| Poids total des coulées dans la journée | 110,50 tonnes |
| Poussière totale dans la journée | 4,53 tonnes |
| Poids moyen des coulées de la journée | 4,25 tonnes |

TABLEAU 4.8 : Comparaison du 5 décembre 2020

| Accumulation | Ancien (tonnes) | Nouveau (tonnes) |
|-----------------------------|--------------------|---------------------|
| Minimum ponctuel | -6,05 | -6,23 |
| Maximum ponctuel | 4,29 | 1,44 |
| Minimum moyenne mobile | -2,20 | -3,91 |
| Maximum moyenne mobile | 2,66 | 3,58 |
| Ponctuelle début de journée | 0,29 | 1,44 |
| Ponctuelle fin de journée | 0,19 | -3,9 |
| Mobile début de journée | 2,66 | 3,58 |
| Mobile fin de journée | -2,12 | -2,33 |

En ce qui a trait au 5 décembre 2020, la Figure 4.3 présente un fort drainage de minuit à midi, puis cherche à se stabiliser pour le reste de la journée. La courbe atteint un sommet de -3,9 tonnes confirmant un surplus de métal ayant été accumulé tout au long des dernières heures.

La quantité totale théorique de silicium et de fer ayant été ajoutée au procédé pour cette date est de 109,41 tonnes. La somme du fer et du silicium combinés sortie par le trou de coulée et en poussière pour ce jour est de 114,01 tonnes. Par conséquent, une quantité supplémentaire

de 4,6 tonnes de fer et de silicium pur est sortie du four durant les 24 heures du 5 décembre.

Encore une fois les autres éléments du mélange ne sont pas considérés vu leur faible apport.

Il y a eu 26 coulées de ferrosilicium 75% chez Elkem métal Canada le 5 décembre 2020 ayant un poids total de 110,5 tonnes. En se référant au poids médian de 2020 pour le FeSi 75%, il y aurait dû avoir 113,36 tonnes de métal pour une journée normale. Bien que cela représente un surplus de 2,86 tonnes, il faut comprendre que la journée précédente avait un surplus de 6,83 tonnes selon le calcul médian. La différence de ces deux valeurs permet de constater une diminution de 3,97 tonnes de métal entre le 4 et le 5 décembre.

L'ancienne courbe de l'accumulation de métal présente quelques variations avec deux sommets plus importants suggérant une accumulation de métal. L'ancienne moyenne mobile montre une présence d'accumulation de métal en début de journée malgré que la moyenne mobile de la journée précédente montrait une très faible accumulation. Les deux anciennes courbes diffèrent l'une de l'autre. La courbe montre aussi un faible drainage progressif au long des 24 heures. Par contre, la nouvelle courbe affiche un drainage plus important en début de journée et se stabilise vers midi. La nouvelle moyenne mobile suit le même mouvement.

4.2.1.4 COMPARAISON DES CALCULS

La sous-section en cours démontre la validité de la nouvelle courbe ainsi que son amélioration vis-à-vis l'ancien calcul. Les résultats du 3 décembre 2020 ne montrent malheureusement pas d'information concluante quant à une amélioration ou à une détérioration

du calcul. Pour ce faire, il faudrait un aperçu de la journée du 2 décembre. Par contre, en observant les journées du 4 et 5 décembre 2020, il est possible de constater une amélioration de la courbe. En effet, les métallurgistes ont confirmé qu'une accumulation de métal s'est formée le 4 décembre 2020 et qu'un drainage s'est matérialisé le jour suivant. Or, l'ancienne courbe n'affiche pas d'augmentation de métal dans le four, mais plutôt une stabilité s'approchant des zéros tonne d'accumulation. La nouvelle courbe de son côté confirme les observations des métallurgistes en affichant une accumulation. Finalement, le 5 décembre les deux calculs montrent une accumulation suivant un drainage durant la journée, ceci concorde avec la nouvelle courbe, mais montre une incohérence entre le passage du 4 au 5 décembre pour l'ancienne courbe. La nouvelle courbe présente donc une amélioration par rapport à l'ancienne.

4.2.2 ACCUMULATION CERTAINE : 9 FÉVRIER 2021

La deuxième date ayant été signalée par les métallurgistes d'Elkem comme étant un jour que du métal s'est accumulé dans le four est le 9 février 2021. Il s'agit une fois de plus d'un jour de production de FeSi 75%. Une quantité normale de matières premières a été ajoutée durant la journée, cependant la quantité de métal attendue à la sortie du four était inférieure aux attentes des métallurgistes. La journée qui suit, quant à elle, a sorti des quantités de métal au trou de coulée largement supérieures à l'habitude. Une fois de plus, cette situation confirme l'hypothèse des métallurgistes vis-à-vis de la présence d'accumulation de métal dans le four à cette date.

4.2.2.1 JOUR PRÉCÉDENT

La Figure 4.4 présente le résultat des calculs estimant l'accumulation de métal effectués par le SAO. Les lignes minces affichent les quantités de métal accumulé en tonnes à une heure précise du 8 février 2021. Les lignes épaisses affichent la valeur de la moyenne mobile des 8 dernières heures en tonnes de métal du surplus accumulé dans le four. Les pointillés représentent les valeurs de l'ancien calcul d'accumulation de métal et les lignes pleines représentent les valeurs du nouveau calcul.

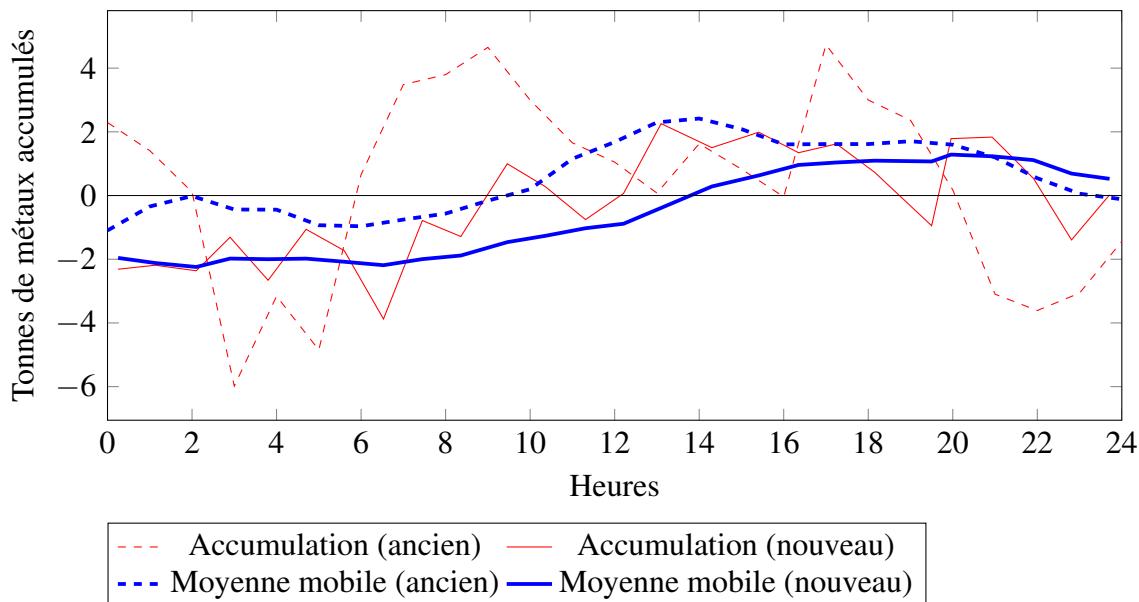


FIGURE 4.4 : Accumulation de métal du 8 février 2021

© Pierre-Yves Glidden, 2022.

Le Tableau 4.9 contient la même structure que les tableaux de production de l'accumulation du 4 décembre et présente ainsi des statistiques de la journée permettant de mieux interpréter les résultats du 8 février 2021 obtenus par le calcul d'accumulation de métal.

TABLEAU 4.9 : Données de production du 8 février 2021

| Nom | Valeur |
|---|---------------|
| Nombre de coulées | 26 |
| Somme des Si et Fe théorique entré dans le four | 110,53 tonnes |
| Somme des Si et Fe sorti du four (avec poussière) | 112,75 tonnes |
| Poids total des coulées dans la journée | 109,88 tonnes |
| Poussière totale dans la journée | 3,80 tonnes |
| Poids moyen des coulées de la journée | 4,23 tonnes |

Le Tableau 4.10 contient la même structure que les tableaux comparatifs de l'accumulation du 4 décembre et présente par conséquent des comparaisons entre les données obtenues de l'ancien calcul et du nouveau calcul. Ce tableau permet une meilleure vue d'ensemble sur les différences des courbes de la Figure 4.4.

TABLEAU 4.10 : Comparaison du 8 février 2021

| Accumulation | Ancien (tonnes) | Nouveau (tonnes) |
|-----------------------------|--------------------|---------------------|
| Minimum ponctuel | -5,98 | -3,88 |
| Maximum ponctuel | 4,73 | 2,26 |
| Minimum moyenne mobile | -1,10 | -2,24 |
| Maximum moyenne mobile | 2,42 | 1,29 |
| Ponctuelle début de journée | 2,29 | -2,31 |
| Ponctuelle fin de journée | -1,44 | 0,02 |
| Mobile début de journée | -1,10 | -1,96 |
| Mobile fin de journée | -0,12 | 0,52 |

En observant en premier la ligne pleine et épaisse de la Figure 4.4, soit la moyenne mobile du nouveau calcul, il est possible de constater une accumulation située entre -2 tonnes

et 1 tonne. Ceci représente une constance normale de métal à l'intérieur du four et n'est pas considéré comme de l'accumulation de métal. La journée débute avec une quantité de métal s'étant écoulé supérieure à la quantité de matière première ajoutée au four, affichant ainsi une accumulation de -2,31 à la première coulée. Une légère accumulation a dû se former durant la journée précédente. La quantité de métal s'est stabilisée durant la journée et le SAO affiche 0,02 tonne de métal accumulé à la dernière coulée.

4.2.2.2 JOUR D'ACCUMULATION

La Figure 4.5 montre les résultats de l'estimation de l'accumulation de métal certaine du 9 février 2020. Elle affiche une absence d'accumulation entre 00h30 et 5h15, pour ensuite afficher une légère accumulation. La dernière coulée indique une présence d'accumulation de métal totalisant les 2,63 tonnes de métal.

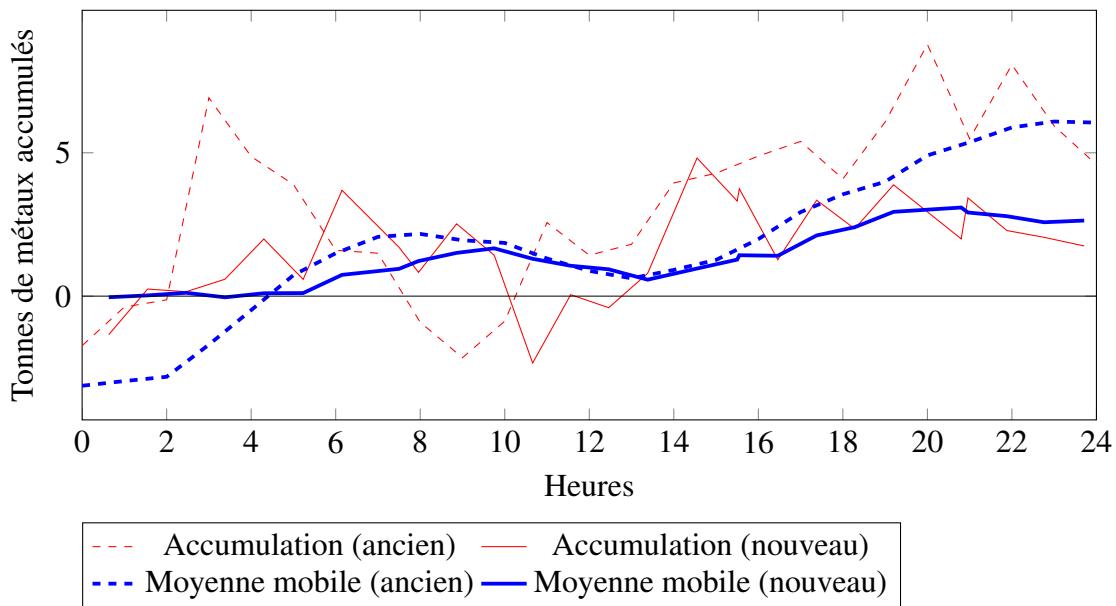


FIGURE 4.5 : Accumulation de métal du 9 février 2021

© Pierre-Yves Glidden, 2022.

Le Tableau 4.11 présente certaines informations nécessaires à une bonne interprétation des résultats du 9 février 2021. Il présente notamment la somme totale des éléments de silicium et de fer dans la matière première ajoutée au four pour ce jour, qui est de 109,41 tonnes. La somme totale en sortie de ces éléments dans le ferrosilicium et dans la poussière est de 107,25 tonnes. Par conséquent, il est possible de calculer la différence de ces deux valeurs afin d'obtenir un total de 2,16 tonnes de Si et Fe encore présent dans le four. Une fois de plus, les autres éléments présents dans le mélange ne sont pas pris en compte.

TABLEAU 4.11 : Données de production du 9 février 2021

| Nom | Valeur |
|---|---------------|
| Nombre de coulées | 27 |
| Somme des Si et Fe théorique entré dans le four | 109,41 tonnes |
| Somme des Si et Fe sorti du four (avec poussière) | 107,25 tonnes |
| Poids total des coulées dans la journée | 103,46 tonnes |
| Poussière totale dans la journée | 4,03 tonnes |
| Poids moyen des coulées de la journée | 4,13 tonnes |

Le Tableau 4.12 présente un comparatif des résultats obtenus pour l'ancien calcul et le nouveau calcul. Il présente un écart de plus de 3 tonnes au niveau des maximums ponctuels et mobiles, du minimum ponctuel, de l'estimé ponctuel en début de journée et de l'estimé en début et fin de journée de la moyenne mobile.

TABLEAU 4.12 : Comparaison du 9 février 2021

| Accumulation | Ancien (tonnes) | Nouveau (tonnes) |
|-----------------------------|--------------------|---------------------|
| Minimum ponctuel | -2,15 | -2,33 |
| Maximum ponctuel | 8,78 | 4,82 |
| Minimum moyenne mobile | -3,13 | -0,04 |
| Maximum moyenne mobile | 6,09 | 3,09 |
| Ponctuelle début de journée | -1,73 | -1,34 |
| Ponctuelle fin de journée | 4,59 | 1,75 |
| Mobile début de journée | -3,13 | -0,04 |
| Mobile fin de journée | 6,05 | 2,64 |

Puisque le 9 février est encore tôt dans l'année 2021 et que les statistiques de cette année ne sont pas complètes, le poids médian d'une coulée sera encore calculé selon l'année 2020,

soit de 4,36 tonnes pour le FeSi 75%. Il y a eu 25 coulées de ferrosilicium 75% le 9 février 2021 totalisant 103,46 tonnes. En calculant le poids médian pour 25 coulées, il y aurait dû avoir un total de 109 tonnes en sortie ce jour-là. La différence de ces deux quantités montre la possibilité d'une accumulation de métal de 5,54 tonnes de métal.

L'ancienne courbe de l'accumulation de métal présente un drainage d'environ -3,12 tonnes de métal en début de journée malgré que le graphique de la journée précédente, Figure 4.4, montre une accumulation pratiquement nulle en fin de journée. La Figure 4.5 devrait donc montrer une accumulation pratiquement nulle en début de journée, ce qui est démontré par la courbe du nouveau calcul. Cependant du côté de la fin de journée, l'ancienne courbe semble être plus juste puisqu'elle présente davantage une forte accumulation, 6,05 tonnes de métal, comparativement à la nouvelle courbe qui montre une accumulation plus faible de 2,63 tonnes de métal.

4.2.2.3 JOUR SUIVANT

En ce qui concerne le jour suivant l'accumulation de métal, la Figure 4.6 affiche un drainage constant de minuit à 15h pour ensuite retomber dans un cycle d'accumulation de métal. La courbe atteint un minimum de -4,87 tonnes confirmant qu'un surplus de métal s'est accumulé durant les dernières heures.

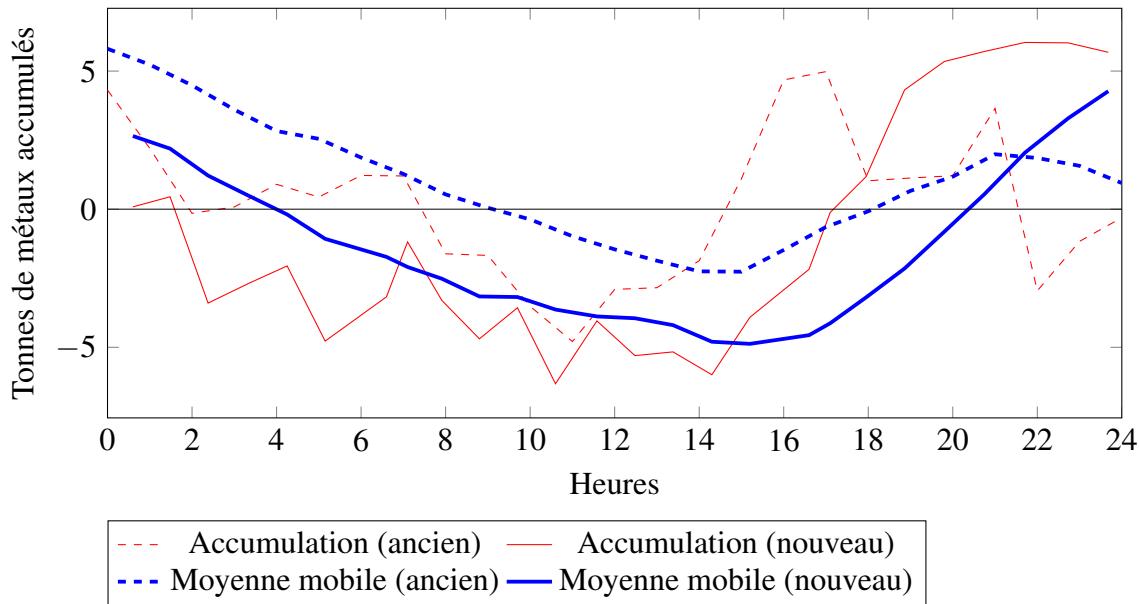


FIGURE 4.6 : Accumulation de métal du 10 février 2021

© Pierre-Yves Glidden, 2022.

Les Tableaux 4.13 et 4.14 affichent les statistiques du 10 février 2021 permettant une meilleure interprétation des résultats engendrés par la Figure 4.6.

TABLEAU 4.13 : Données de production du 10 février 2021

| Nom | Valeur |
|---|---------------|
| Nombre de coulées | 26 |
| Somme des Si et Fe théorique entré dans le four | 110,22 tonnes |
| Somme des Si et Fe sorti du four (avec poussière) | 109,40 tonnes |
| Poids total des coulées dans la journée | 106,44 tonnes |
| Poussière totale dans la journée | 3,78 tonnes |
| Poids moyen des coulées de la journée | 4,09 tonnes |

TABLEAU 4.14 : Comparaison du 10 février 2021

| Accumulation | Ancien (tonnes) | Nouveau (tonnes) |
|-----------------------------|--------------------|---------------------|
| Minimum ponctuel | -4,79 | -6,32 |
| Maximum ponctuel | 4,98 | 6,04 |
| Minimum moyenne mobile | -2,26 | -4,88 |
| Maximum moyenne mobile | 5,81 | 4,27 |
| Ponctuelle début de journée | 4,31 | 0,08 |
| Ponctuelle fin de journée | -0,31 | 5,68 |
| Mobile début de journée | 5,81 | 2,65 |
| Mobile fin de journée | 0,95 | 4,27 |

La quantité totale théorique de silicium et de fer ayant été ajoutée durant cette journée est de 110,22 tonnes. La somme de ces mêmes éléments en sortie au trou de coulée et au dépoussiéreur totalise 109,40 tonnes. Cependant, une grande quantité d'éléments de fer et de silicium a été retenue dans le four en fin de journée, de 15h à 23h59. Or, bien que la différence entre l'entrée et la sortie soit de 0,82 tonne, il est possible de comprendre qu'une plus grande quantité de ces éléments est sortie entre minuit et 15h comparativement à la quantité entrée.

Il y a eu 26 coulées de FeSi 75% chez Elkem métal Canada le 10 février 2021 ayant un poids total 106,44 tonnes. Toujours en se référant sur le poids médian de 2020, il y aurait dû avoir un total de 113,36 tonnes de métal pour une journée normale. Encore une fois, bien que ces données montrent que 6,92 tonnes de métal supplémentaire auraient dû couler du four, il est important de se rappeler que de 15h à 23h59 une grande quantité de métal s'est accumulée et vient fausser les résultats de ce jour.

L'ancienne moyenne mobile de l'accumulation de métal, la ligne épaisse pointillée de

la Figure 4.6, présente semblablement la même trajectoire que la nouvelle courbe, la ligne épaisse et pleine. L'ancienne courbe présente cependant une plus grande quantité de métal accumulé en début de journée, soit 5,80 tonnes comparativement à 2,65 tonnes pour la nouvelle courbe. Elle présente aussi une accumulation moins importante en fin de journée. Il en va de même pour l'accumulation de métal de chaque heure, les lignes minces.

4.2.2.4 COMPARAISON DES CALCULS

Bien que les Figures 4.4, 4.5 et 4.6 affichent des courbes semblables de l'estimé de l'accumulation de métal et du drainage, le nouveau calcul présente une certaine amélioration. Pour être observé, il faut se référer aux données théoriques des tableaux de production et des tableaux comparatifs. Le total des Si et Fe en entrée pour la journée d'accumulation du 8 février 2021 est de 109,41 tonnes et en sortie est de 107,25 totalisant une différence de 2,16 tonnes de Fe et Si pures accumulée dans le four. Sachant que plus de 95% du ferrosilicium provient du Fe et du Si l'estimé de l'accumulation de métal en fin de journée devrait être proche de ce résultat. C'est le cas pour le nouveau calcul qui affiche une accumulation d'environ 2,64 tonnes de métal en fin de journée comparativement à 6,05 tonnes de métal accumulé pour l'ancien calcul.

4.2.3 ACCUMULATION CERTAINE : 1 JUIN 2021

Le dernier résultat sélectionné pour les journées ayant une accumulation de métal certaine est le 1 juin 2021. L'usine était en production de ferrosilicium 75%. Cette date a une fois de plus été signalée comme jour où le four ne sortait pas assez une grande quantité de métal pour la quantité de matières premières ajoutées.

4.2.3.1 JOUR PRÉCÉDENT

La Figure 4.7 présente le résultat du nouveau calcul et de l'ancien calcul de l'accumulation de métal, ainsi que la moyenne mobile de ces valeurs pour la journée du 31 mai 2021, soit une journée précédant une accumulation certaine.

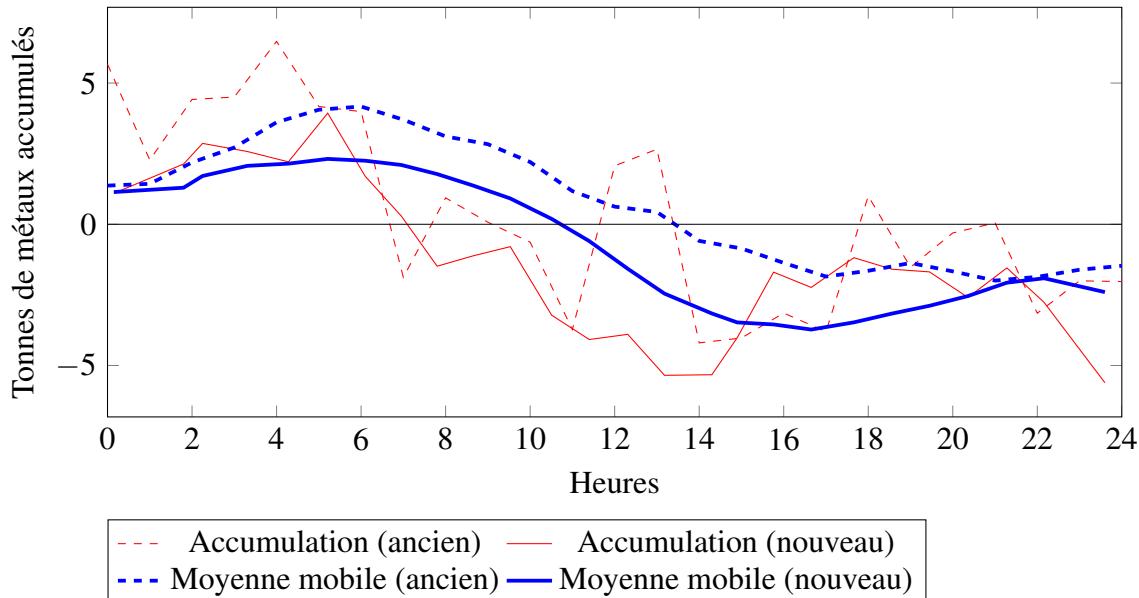


FIGURE 4.7 : Accumulation de métal du 31 mai 2021

© Pierre-Yves Glidden, 2022.

Les Tableaux 4.15 et 4.16 permettent de connaître certaines informations sur cette journée afin de mieux interpréter les résultats. Ils présentent des comparaisons de l'accumulation en début et en fin de journée des deux calculs, les valeurs de l'accumulation ponctuelle et de la moyenne mobile des deux calculs en début et en fin de journée, les sommes totales de Si et Fe théoriques en entrée et en sortie et les poids totaux des coulées de ce jour.

TABLEAU 4.15 : Données de production du 31 mai 2021

| Nom | Valeur |
|---|---------------|
| Nombre de coulées | 27 |
| Somme des Si et Fe théorique entré dans le four | 109,39 tonnes |
| Somme des Si et Fe sorti du four (avec poussière) | 114,15 tonnes |
| Poids total des coulées dans la journée | 110,59 tonnes |
| Poussière totale dans la journée | 4,61 tonnes |
| Poids moyen des coulées de la journée | 4,10 tonnes |

TABLEAU 4.16 : Comparaison du 31 mai 2021

| Accumulation | Ancien (tonnes) | Nouveau (tonnes) |
|-----------------------------|--------------------|---------------------|
| Minimum ponctuel | -4,20 | -5,61 |
| Maximum ponctuel | 6,47 | 3,93 |
| Minimum moyenne mobile | -1,99 | -3,73 |
| Maximum moyenne mobile | 4,17 | 2,31 |
| Ponctuelle début de journée | 5,67 | 1,10 |
| Ponctuelle fin de journée | -2,03 | -5,61 |
| Mobile début de journée | 1,37 | 1,14 |
| Mobile fin de journée | -1,47 | -2,40 |

En comparant d'abord les lignes minces de la Figure 4.7, il est une fois de plus possible de constater une meilleure constance au niveau de la ligne pleine que de la pointillée. L'ac-

cumulation mobile du nouveau calcul, ligne pleine épaisse, affiche en début de journée une accumulation de métal d'environ 1,14 tonne et en fin de journée environ -2,40 tonnes. Bien qu'une légère accumulation se soit formée entre 2h et 7h, l'excédent semble s'être évacué par la suite. La tendance pour ce jour montre un faible drainage et non une accumulation.

4.2.3.2 JOUR D'ACCUMULATION

La Figure 4.8 présente les résultats de l'estimation de l'accumulation de métal du 1er juin 2021. Elle affiche un équilibre entre l'ajout de matière première et les coulées de FeSi entre minuit et 6h, puis une accumulation importante entre 6h et 15h. À partir de 15h l'accumulation de métal semble légèrement diminuée. La première coulée affiche une accumulation totale de -2,43 tonnes alors que la dernière coulée affiche 5,48 tonnes.

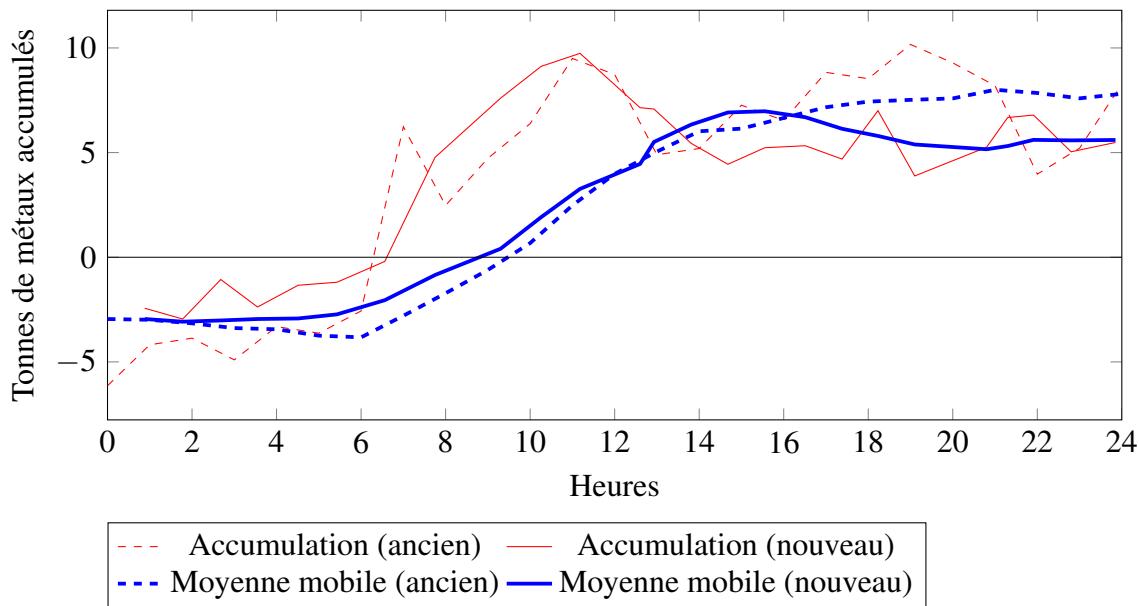


FIGURE 4.8 : Accumulation de métal du 1 juin 2021

© Pierre-Yves Glidden, 2022.

Les Tableaux 4.17 et 4.18 montrent les différentes statistiques de la journée du 1er juin 2021 aidant ainsi à une meilleure interprétation des résultats.

TABLEAU 4.17 : Données de production du 1 juin 2021

| Nom | Valeur |
|---|---------------|
| Nombre de coulées | 25 |
| Somme des Si et Fe théorique entré dans le four | 108,98 tonnes |
| Somme des Si et Fe sorti du four (avec poussière) | 101,63 tonnes |
| Poids total des coulées dans la journée | 98,17 tonnes |
| Poussière totale dans la journée | 4,48 tonnes |
| Poids moyen des coulées de la journée | 3,95 tonnes |

TABLEAU 4.18 : Comparaison du 1 juin 2021

| Accumulation | Ancien (tonnes) | Nouveau (tonnes) |
|-----------------------------|--------------------|---------------------|
| Minimum ponctuel | -6,14 | -2,95 |
| Maximum ponctuel | 10,17 | 9,74 |
| Minimum moyenne mobile | -3,83 | -3,08 |
| Maximum moyenne mobile | 8,00 | 6,98 |
| Ponctuelle début de journée | -6,14 | -2,43 |
| Ponctuelle fin de journée | 8,27 | 5,48 |
| Mobile début de journée | -2,95 | -2,95 |
| Mobile fin de journée | 7,81 | 5,60 |

La somme totale des éléments de Si et Fe de la matière première ajoutée au four pour la journée est de 108,98 tonnes. En calculant la quantité de ces éléments au trou de coulée et au dépoussiéreur, un total de 101,63 tonnes est sorti du procédé. Par conséquent, près de 7,35 tonnes de Fe et Si pures sont restées à l'intérieur du four.

Il y a eu un total de 25 coulées de FeSi chez Elkem métal Canada pour ce jour. Ces coulées ont généré un total de 98,17 tonnes de ferrosilicium. En calculant le poids médian à l'aide des informations statistiques de 2020, il y aurait dû avoir près de 109 tonnes de métal en sortie. Selon cette façon de calculer, près de 10,83 tonnes de ferrosilicium seraient toujours à l'intérieur du four à la fin de cette journée.

En comparant la nouvelle courbe et l'ancienne courbe, il est possible cette fois de voir une grande ressemblance entre celles-ci. En effet, bien qu'une faible variation de quantité est visible entre les lignes pleines et les lignes pointillées, les quantités sont proches les unes des autres, la constance entre minuit et 6h est pratiquement la même et l'augmentation de la

quantité de métal accumulé est effectuée pratiquement au même moment. Il demeure malgré tout que l'ancienne courbe présente toujours une légère augmentation de métal en fin de journée, entre 16h et 23h59 comparativement à la nouvelle courbe qui présente une légère diminution.

4.2.3.3 JOUR SUIVANT

La Figure 4.9 présente les résultats du jour suivant l'accumulation certaine du 1er juin 2021. Elle présente un drainage important entre minuit et midi passant d'une estimation d'accumulation de métal de 6,42 tonnes à -5,09 tonnes. Par conséquent, près de 11,51 tonnes de métal excédentaire ont coulé durant la journée du 2 juin 2021.

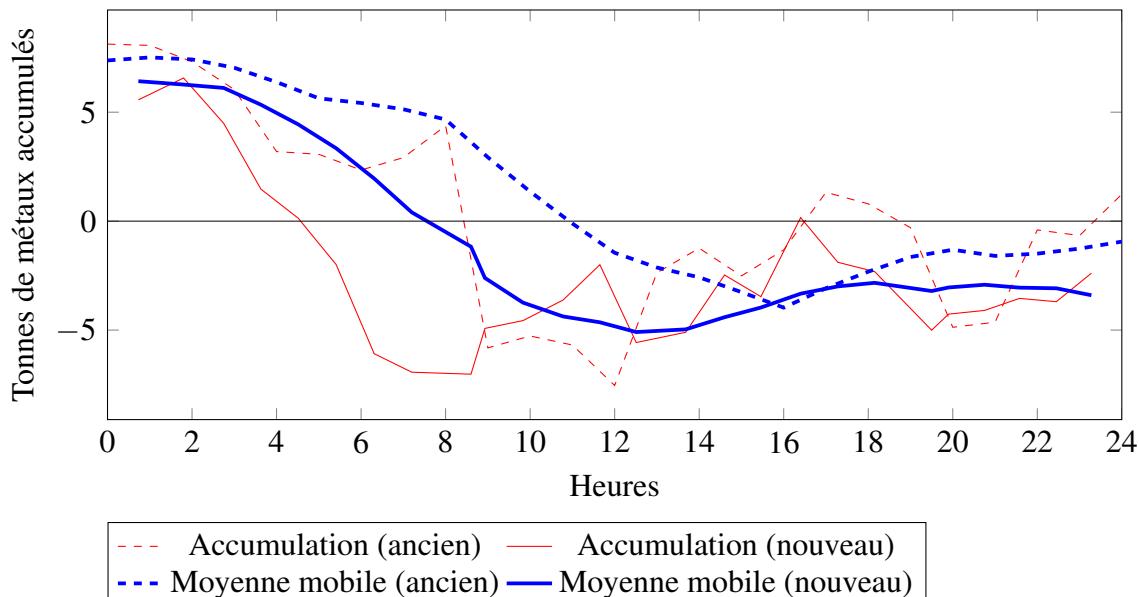


FIGURE 4.9 : Accumulation de métal du 2 juin 2021

© Pierre-Yves Glidden, 2022.

Les Tableaux 4.19 et 4.20 fournissent les informations statistiques des entrées et sorties du 2 juin 2021.

TABLEAU 4.19 : Données de production du 2 juin 2021

| Nom | Valeur |
|---|---------------|
| Nombre de coulées | 26 |
| Somme des Si et Fe théorique entré dans le four | 113,18 tonnes |
| Somme des Si et Fe sorti du four (avec poussière) | 119,34 tonnes |
| Poids total des coulées dans la journée | 117,29 tonnes |
| Poussière totale dans la journée | 2,97 tonnes |
| Poids moyen des coulées de la journée | 4,51 tonnes |

TABLEAU 4.20 : Comparaison du 2 juin 2021

| Accumulation | Ancien (tonnes) | Nouveau (tonnes) |
|-----------------------------|--------------------|---------------------|
| Minimum ponctuel | -7,54 | -7,02 |
| Maximum ponctuel | 8,12 | 6,57 |
| Minimum moyenne mobile | -3,97 | -5,09 |
| Maximum moyenne mobile | 7,51 | 6,42 |
| Ponctuelle début de journée | 8,12 | 5,57 |
| Ponctuelle fin de journée | 1,23 | -2,39 |
| Mobile début de journée | 7,37 | 6,42 |
| Mobile fin de journée | -0,94 | -3,40 |

La quantité totale théorique de silicium et de fer pur ayant été ajoutée au procédé pour cette journée est de 113,18 tonnes. La somme totale en sortie de ces éléments est de 119,34 tonnes. Du coup, une approximation de 6,16 tonnes de silicium et de fer pur excédentaire est sortie du procédé pour cette journée. Ceci confirme une fois de plus la présence de métal accumulé durant les heures précédant les coulées du 2 juin 2021.

Il y a eu 26 coulées de FeSi 75% totalisant 117,29 tonnes à cette date. Selon le poids médian des coulées de FeSi 75% de l'année précédente, un total d'environ 113,36 tonnes aurait dû s'écouler du four. Une fois de plus, ceci démontre que la journée précédente a accumulé du métal, et ce pour un minimum d'environ 3,93 tonnes.

Une fois de plus les courbes de l'ancien calcul et du nouveau calcul sont similaires. Les deux moyens mobiles présentent un drainage entre minuit et 14h. Bien que l'ancienne courbe présente une plus grande présence de métal accumulé en début de journée, la nouvelle courbe a un plus petit minimum. La différence de chaque courbe entre l'accumulation en début de journée et leur minimum est de 11,51 tonnes pour la nouvelle courbe et de 11,34 tonnes pour l'ancienne courbe, montrant encore une fois une grande ressemblance entre les deux courbes pour la période du 31 mai au 2 juin.

4.2.3.4 COMPARAISON DES CALCULS

Encore une fois, les courbes des Figures 4.7 à 4.9 suivent les mêmes tendances, il est donc difficile de percevoir une amélioration simplement en observant les courbes. Il faut donc observer les données des tableaux de production et des tableaux de comparaison du 31 mai 2021 au 2 juin 2021. Les entrées de Fe et Si du 1 juin totalisent 108,98 tonnes et les sorties totalisent 101,63 tonnes montrant une accumulation théorique de 7,35 tonnes. Or, les maximums ponctuels et mobiles de l'ancien calcul sont de 10,17 tonnes et 8,00 tonnes respectivement. Les maximums ponctuels et mobiles du nouveau calcul sont de 9,74 tonnes et

6,98 tonnes, soit légèrement plus rapprochées du résultat espéré de 7,35 tonnes montrant une très faible amélioration.

4.3 PRODUCTION STANDARD SANS ACCUMULATION

Une autre façon de démontrer la validité du nouveau calcul consiste à vérifier des dates où la production est normale, c'est-à-dire que la quantité attendue en sortie est la bonne, et ce de façon constante. Encore une fois, l'équipe d'Elkem métal canada a permis de cibler des journées dans lesquelles la production était standard. La structure de chaque sous-section demeure la même que pour les sous-sections de la Section 4.2

4.3.1 PRODUCTION STANDARD : 12 JANVIER 2020

Le premier jour de production standard ayant été ciblé est le 12 janvier 2020, il s'agit d'une date faisant partie d'une campagne de production de ferrosilicium 50%. En effet, la production de cette date a effectué les quantités normales attendues par les métallurgistes et n'a montré aucun signe d'accumulation de métal.

4.3.1.1 JOUR PRÉCÉDENT

La Figure 4.10 présente le résultat des calculs d'accumulation de métal de la journée précédent la journée standard du 12 janvier 2020. La nouvelle moyenne mobile, ligne pleine et épaisse, montre une constance légèrement en dessous de zéro. Il est possible qu'il y ait eu

une très faible accumulation la journée d'avant.

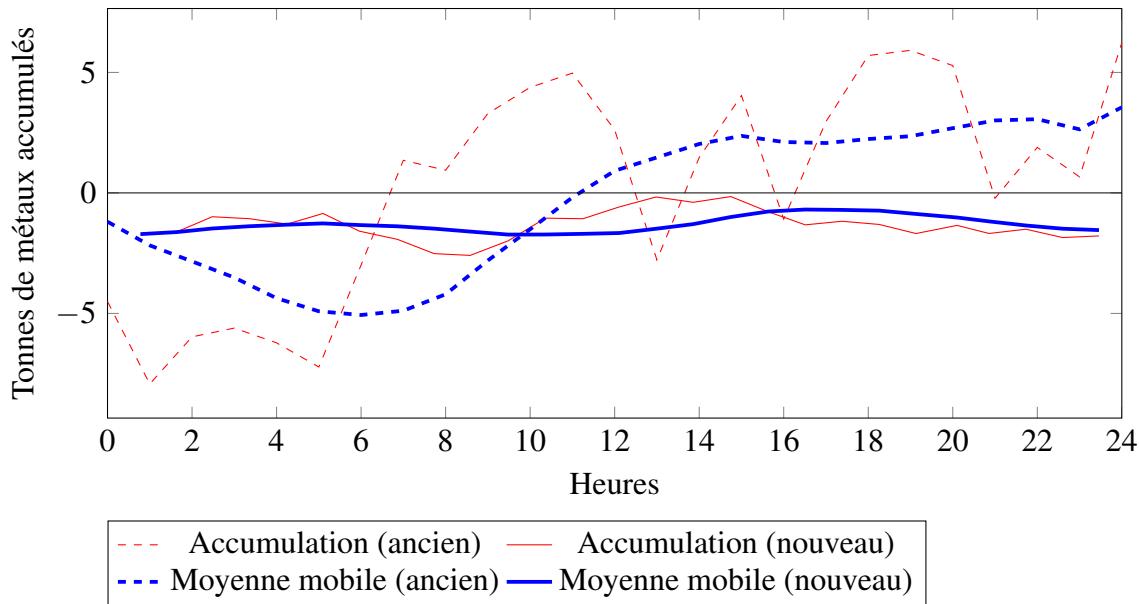


FIGURE 4.10 : Accumulation de métal du 11 janvier 2020

© Pierre-Yves Glidden, 2022.

Le Tableau 4.21 fournit les informations statistiques des entrées et sorties du 11 janvier 2020. Le tableau fournit le nombre de coulées, les sommes théoriques de Si et Fe en entrées et en sorties ainsi que le poids total des coulées, de poussières et la moyenne du poids des coulées de la journée. Il est possible d'observer un faible écart entre les données d'entrées et de sortie.

TABLEAU 4.21 : Données de production du 11 janvier 2020

| Nom | Valeur |
|---|---------------|
| Nombre de coulées | 27 |
| Somme des Si et Fe théorique entré dans le four | 174,97 tonnes |
| Somme des Si et Fe sorti du four (avec poussière) | 173,85 tonnes |
| Poids total des coulées dans la journée | 174,14 tonnes |
| Poussière totale dans la journée | 1,18 tonne |
| Poids moyen des coulées de la journée | 6,45 tonnes |

Le Tableau 4.22 présente un comparatif des résultats obtenus par l'ancien calcul et par le nouveau calcul. Il présente les minimum et maximum détectés durant la journée ainsi que les différentes estimations d'accumulation en début et fin de journée.

TABLEAU 4.22 : Comparaison du 11 janvier 2020

| Accumulation | Ancien (tonnes) | Nouveau (tonnes) |
|-----------------------------|--------------------|---------------------|
| Minimum ponctuel | -7,93 | -7,63 |
| Maximum ponctuel | 6,23 | -0,07 |
| Minimum moyenne mobile | -5,07 | -5,62 |
| Maximum moyenne mobile | 3,55 | -0,98 |
| Ponctuelle début de journée | -4,51 | -5,77 |
| Ponctuelle fin de journée | 6,23 | -0,65 |
| Mobile début de journée | -1,19 | -4,79 |
| Mobile fin de journée | 3,55 | -0,98 |

La journée débute avec des quantités de sorties légèrement supérieures aux quantités d'entrées positionnant la courbe en dessous de la ligne de zéro. Malgré tout, les quantités demeurent constantes pour l'estimation d'accumulation de métal, ligne mince pleine, faisant

en sorte que la nouvelle moyenne mobile présente elle aussi peu de variation. La quantité de métal accumulé estimée en début de journée est de -1,74 tonne et en fin de journée de -1,78 tonne. La différence de ces quantités étant de 0,04 tonne de métal, il est évident qu'aucune matière ne s'est accumulée dans le four ce jour-là. Un autre point important est la grande variation de l'accumulation de métal de l'ancien calcul qui ne présente pas de constance, mais plutôt une période de drainage en avant-midi et d'accumulation en après midi démontrant une amélioration du calcul.

4.3.1.2 JOUR STANDARD

La Figure 4.11 présente les résultats du calcul d'accumulation de métal de la journée standard du 12 janvier 2020. Elle présente au niveau du nouveau calcul de très faibles changements de quantité avec une sortie légèrement supérieure aux entrées.

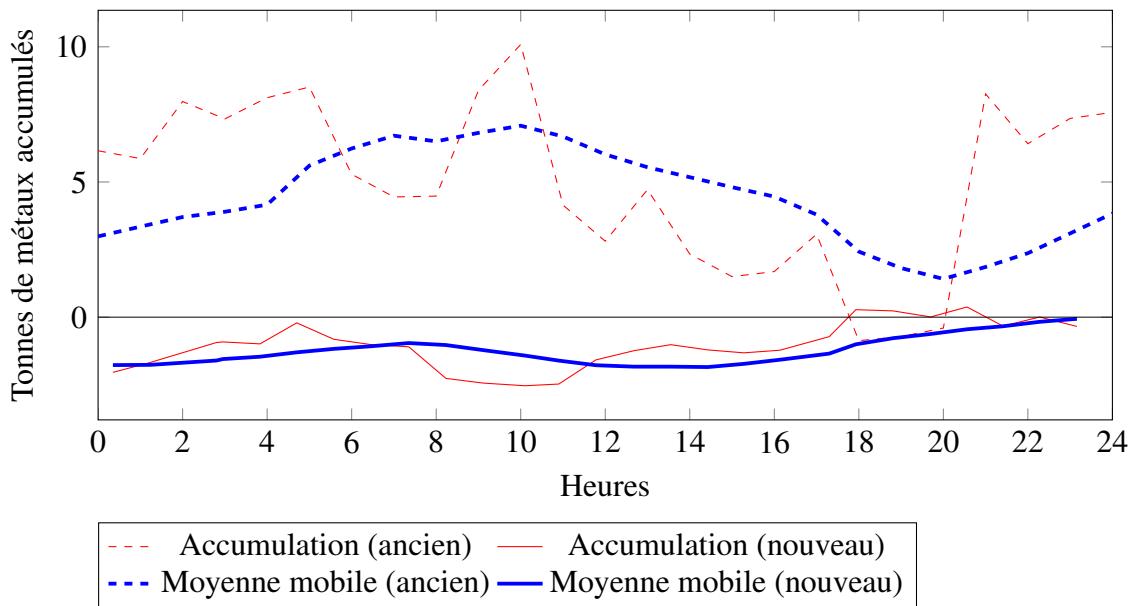


FIGURE 4.11 : Accumulation de métal du 12 janvier 2020

© Pierre-Yves Glidden, 2022.

Les Tableaux 4.23 et 4.24 affichent les statistiques de la journée standard du 12 janvier 2020.

TABLEAU 4.23 : Données de production du 12 janvier 2020

| Nom | Valeur |
|---|---------------|
| Nombre de coulées | 27 |
| Somme des Si et Fe théorique entré dans le four | 177,15 tonnes |
| Somme des Si et Fe sorti du four (avec poussière) | 177,85 tonnes |
| Poids total des coulées dans la journée | 176,56 tonnes |
| Poussière totale dans la journée | 1,63 tonne |
| Poids moyen des coulées de la journée | 6,54 tonnes |

TABLEAU 4.24 : Comparaison du 12 janvier 2020

| Accumulation | Ancien (tonnes) | Nouveau (tonnes) |
|-----------------------------|--------------------|---------------------|
| Minimum ponctuel | -0,87 | -4,77 |
| Maximum ponctuel | 10,09 | 2,08 |
| Minimum moyenne mobile | 1,41 | -2,86 |
| Maximum moyenne mobile | 7,08 | 0,39 |
| Ponctuelle début de journée | 6,15 | -1,55 |
| Ponctuelle fin de journée | 7,58 | -2,24 |
| Mobile début de journée | 2,99 | -1,35 |
| Mobile fin de journée | 3,83 | -1,23 |

En vérifiant d'abord les informations des quantités entrées et sorties théoriques, il est possible de constater une différence s'approchant de zéro. La somme des éléments de silicium et de fer pur ajoutés au four totalise 177,15 tonnes. Du côté de la sortie de ces mêmes éléments, un total de 177,85 tonnes. Le résultat de la différence est donc de 0,7 tonne, soit une quantité normale se situant entre les -1 tonne et 1 tonne de matière accumulée. Les autres éléments se trouvant dans le mélange sont peu significatifs et ne sont pas tenus en compte dans le calcul théorique.

Maintenant, il est question de comparer les quantités de ferrosilicium sortant cette journée avec les quantités standard médianes de l'année 2020. Le poids médian pour la production de ferrosilicium 50% était de 6,54 tonnes par coulée. Il y a eu 27 coulées chez Elkem métal Canada le 12 janvier 2020 totalisant 176,56 tonnes de métal. Ceci représente seulement 0,02 tonne de métal de moins que le poids total médian qui aurait dû être de 176,58 tonnes.

Finalement, il est possible de comparer facilement les nouvelles courbes avec les anciennes courbes. De toute évidence, les Tableaux 4.21 à 4.24 ainsi que les Figures 4.10 et 4.11 ont montré qu'il n'y avait pas de métal accumulé lors de ces jours. Malgré ces informations, les anciennes courbes présentent une information complètement opposée, soit une forte accumulation de métal.

4.3.1.3 JOUR SUIVANT

La Figure 4.12 affiche les résultats du calcul d'accumulation de métal du 13 janvier 2020. La moyenne mobile du nouveau calcul montre une faible augmentation de l'accumulation entre minuit et midi, puis une faible diminution de midi à 23h59. Malgré tout, il s'agit d'une accumulation normale, soit un seuil entre -1 et 1 tonne de métal en surplus dans le four.

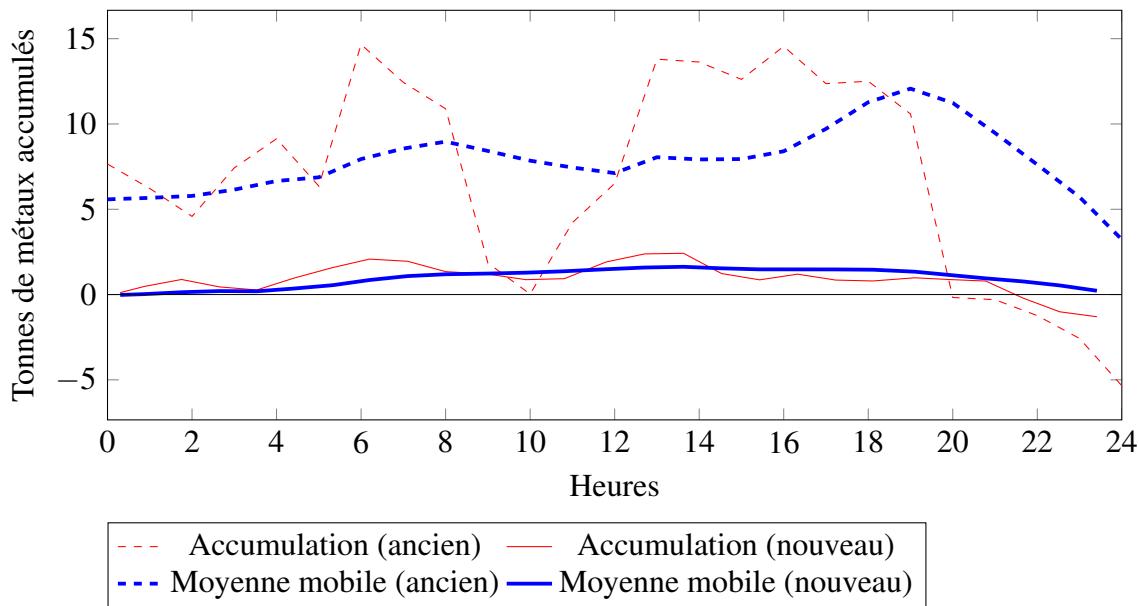


FIGURE 4.12 : Accumulation de métal du 13 janvier 2020

© Pierre-Yves Glidden, 2022.

Les Tableaux 4.25 et 4.26 présentent les données statistiques du lendemain de la journée standard du 12 janvier 2020.

TABLEAU 4.25 : Données de production du 13 janvier 2020

| Nom | Valeur |
|--|---------------|
| Nombre de coulées | 27 |
| Accumulation en début de journée | -0,11 tonne |
| Accumulation en fin de journée | -1,30 tonne |
| Accumulation mobile en début de journée | -0,02 tonne |
| Accumulation mobile en fin de journée | 0,22 tonne |
| Somme des Si et Fe théorique entré dans le four | 178,02 tonnes |
| Somme des Si et Fe sortie du four (avec poussière) | 178,65 tonnes |
| Poids total des coulées dans la journée | 177,78 tonnes |
| Poussière totale dans la journée | 1,94 tonne |
| Poids moyen des coulées de la journée | 6,58 tonnes |

TABLEAU 4.26 : Comparaison du 13 janvier 2020

| Accumulation | Ancien (tonnes) | Nouveau (tonnes) |
|-----------------------------|--------------------|---------------------|
| Minimum ponctuel | -5,35 | -3,15 |
| Maximum ponctuel | 14,66 | 4,11 |
| Minimum moyenne mobile | 3,23 | -1,26 |
| Maximum moyenne mobile | 12,07 | 2,02 |
| Ponctuelle début de journée | 7,65 | -1,03 |
| Ponctuelle fin de journée | -5,35 | -3,15 |
| Mobile début de journée | 5,58 | -1,26 |
| Mobile fin de journée | 3,23 | 0,38 |

Une fois de plus cette journée montre une différence d'entrée et de sortie en silicium et fer pur s'approchant des zéros. Tel que vu dans le Tableau 4.25, il y a eu un total de 178,02 tonnes d'élément de Si et Fe pur en entrée dans le four comparativement à 178,65 tonnes en sortie. La différence de ces deux informations donne un total de 0,63 tonne, un seuil acceptable et normal se situant entre -1 tonne et 1 tonne.

Il y a eu 27 coulées de FeSi le 13 janvier 2020 pour un total de 177,78 tonnes de métal. Le poids médian pour une coulée de FeSi 50% était de 6,54 tonnes. En calculant la différence entre le poids médian théorique et réel, il est possible de constater qu'un surplus de 1,2 tonne de métal s'est écoulé du four ce jour-là. Tel que vu pour les deux dernières journées, il est possible qu'une très faible quantité de métal se soit accumulée de façon constante et lentement pour enfin s'écouler petit à petit durant le 13 janvier 2020.

Encore une fois, les courbes du nouveau calcul et de l'ancien calcul diffèrent énormément montrant un changement majeur au modèle du système d'aide à l'opérateur. En effet, la ligne

pleine et épaisse montre une accumulation de métal normal dans le four, tandis que la ligne épaisse pointillée affiche plutôt une forte accumulation dépassant jusqu'à environ 10 tonnes de métal vers 19h.

4.3.1.4 COMPARAISON DES CALCULS

En observant les Figures 4.21 à 4.25 et en sachant qu'il s'agit de journée standard ayant eu une production normale sans accumulation, l'amélioration du calcul est évidente pour les journées du 11 janvier 2020 au 13 janvier 2020. En effet, l'ancien calcul affiche une forte accumulation de métal alors que le nouveau calcul montre une tendance s'approchant des 0 tonne accumulée.

4.3.2 PRODUCTION STANDARD : 15 MARS 2020

Le prochain jour de production standard ayant été déterminé est celui du 15 mars 2020. Il s'agit d'un jour de changement de campagne passant d'une production de ferrosilicium 65% à du ferrosilicium 75%. Les journées de changement de campagne sont normalement moins propices à une production stable, puisqu'ils sont sujets à des augmentations ou diminutions de matières premières. Malgré tout, ce jour s'est déroulé avec une production normale.

4.3.2.1 JOUR PRÉCÉDENT

La Figure 4.13 montre les résultats des calculs d'accumulation de métal pour la journée du 14 mars 2020. Elle montre les courbes d'accumulation de métal et de moyenne mobile de l'ancien et du nouveau calcul d'accumulation de métal utilisé dans le système d'aide à l'opérateur chez Elkem métal Canada.

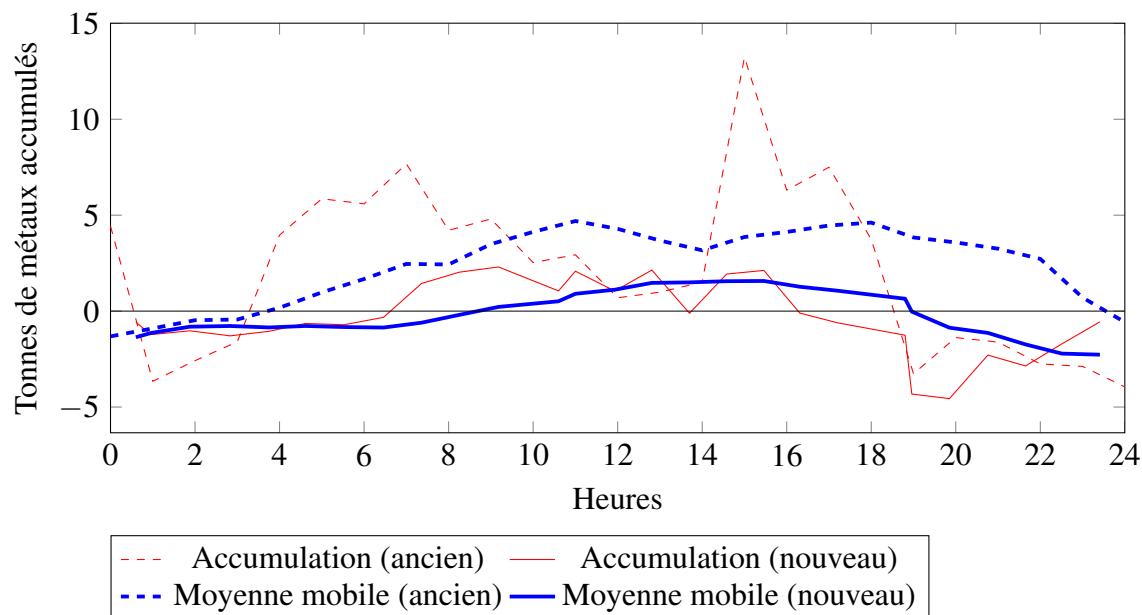


FIGURE 4.13 : Accumulation de métal du 14 mars 2020

© Pierre-Yves Glidden, 2022.

Le Tableau 4.27 présente les données statistiques de cette journée. Ces informations permettent une meilleure interprétation des résultats de la Figure 4.13 en permettant de calculer l'accumulation théorique et réelle globale à cette journée.

TABLEAU 4.27 : Données de production du 14 mars 2020

| Nom | Valeur |
|---|---------------|
| Nombre de coulées | 27 |
| Somme des Si et Fe théorique entré dans le four | 125,18 tonnes |
| Somme des Si et Fe sorti du four (avec poussière) | 134,89 tonnes |
| Poids total des coulées dans la journée | 132,92 tonnes |
| Poussière totale dans la journée | 2,44 tonnes |
| Poids moyen des coulées de la journée | 4,92 tonnes |

Le Tableau 4.28 affiche des comparaisons entre les résultats du nouveau calcul et les résultats de l'ancien calcul. Il affiche principalement les minimum et maximum de chaque courbe de la Figure 4.13 et affiche aussi les valeurs des courbes en début et en fin de journée.

TABLEAU 4.28 : Comparaison du 14 mars 2020

| Accumulation | Ancien (tonnes) | Nouveau (tonnes) |
|-----------------------------|--------------------|---------------------|
| Minimum ponctuel | -3,95 | -4,56 |
| Maximum ponctuel | 13,23 | 2,30 |
| Minimum moyenne mobile | -1,32 | -2,27 |
| Maximum moyenne mobile | 4,69 | 1,57 |
| Ponctuelle début de journée | 4,43 | -0,58 |
| Ponctuelle fin de journée | -3,95 | -0,56 |
| Mobile début de journée | -1,32 | -1,36 |
| Mobile fin de journée | -0,58 | -2,27 |

La Figure 4.13 montre par la moyenne mobile du nouveau calcul, la ligne pleine et épaisse, un faible drainage de -1,36 tonne en début de journée pour ensuite atteindre un maximum d'accumulation de métal de 1,55 tonne et termine avec un drainage de -2,27 tonnes.

La différence de la moyenne mobile entre le début et la fin de la journée est de 0,91 tonne, soit un seuil acceptable. Du côté de l'accumulation de métal ponctuel, les lignes minces, il est possible de voir un grand écart entre la ligne épaisse et la ligne mince, et ce principalement entre 3h et 10h ainsi qu'entre 14h et 18h. L'ancien calcul présente une forte accumulation de métal faisant augmenter sa moyenne mobile à près de 4,69 tonnes, soit 3,14 tonnes de plus que le nouveau calcul.

4.3.2.2 JOUR STANDARD

La Figure 4.14 présente les résultats de l'ancien calcul et du nouveau calcul de l'accumulation de métal du 15 mars 2020. La courbe de la moyenne mobile du nouveau calcul débute la journée avec un drainage de métal totalisant les -2,84 tonnes de métal et remonte rapidement à un niveau normal de 0,02 tonne vers 6h pour terminer avec une accumulation de 0,54 tonne de métal en fin de journée. Les courbes minces présentent une grande variation d'une coulée à l'autre. Ceci peut être expliqué par le changement en quantité de matière première afin de passer du FeSi 65% au FeSi 75%. Quoi qu'il en soit, les moyennes mobiles affichent une constance du métal accumulé.

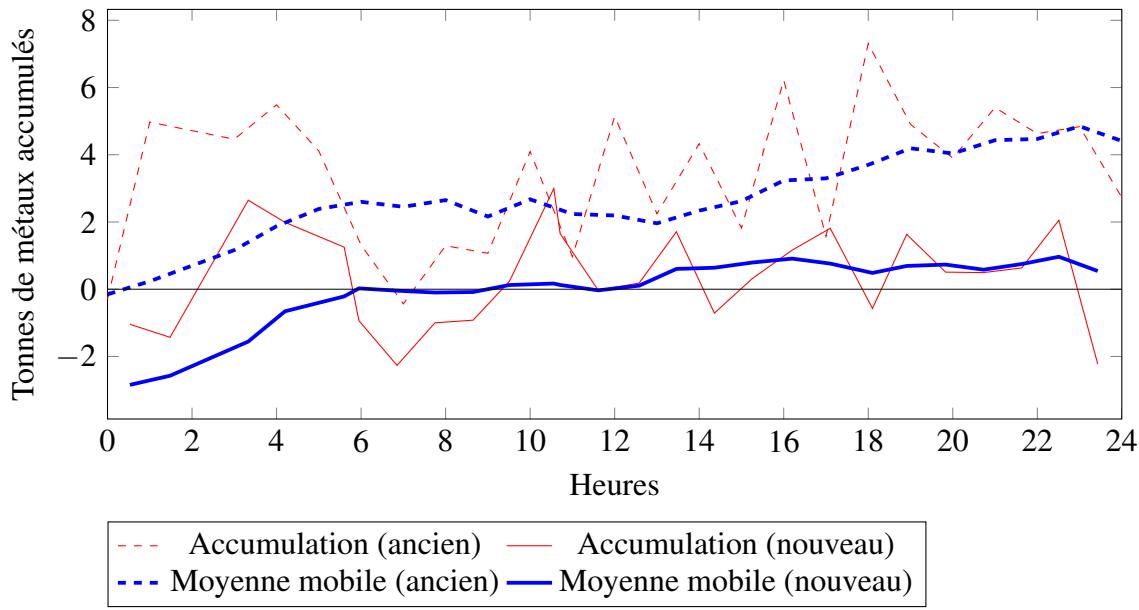


FIGURE 4.14 : Accumulation de métal du 15 mars 2020

© Pierre-Yves Glidden, 2022.

Afin de mieux comprendre les courbes de la Figure 4.14, certaines statistiques sur les coulées, les quantités de matière première en entrées et en sortie de même que des comparatifs entre l'ancien calcul et le nouveau calcul sont nécessaires. Les Tableaux 4.29 et 4.30 présentent ces données.

TABLEAU 4.29 : Données de production du 15 mars 2020

| Nom | Valeur |
|---|---------------|
| Nombre de coulées | 26 |
| Somme des Si et Fe théorique entré dans le four | 108,55 tonnes |
| Somme des Si et Fe sorti du four (avec poussière) | 112,69 tonnes |
| Poids total des coulées dans la journée | 111,88 tonnes |
| Poussière totale dans la journée | 2,39 tonnes |
| Poids moyen des coulées de la journée | 4,30 tonnes |

TABLEAU 4.30 : Comparaison du 15 mars 2020

| Accumulation | Ancien (tonnes) | Nouveau (tonnes) |
|-----------------------------|--------------------|---------------------|
| Minimum ponctuel | -0,43 | -2,26 |
| Maximum ponctuel | 7,31 | 2,99 |
| Minimum moyenne mobile | -0,15 | -2,85 |
| Maximum moyenne mobile | 4,85 | 0,97 |
| Ponctuelle début de journée | -0,29 | -1,04 |
| Ponctuelle fin de journée | 2,73 | -2,23 |
| Mobile début de journée | -0,15 | -2,85 |
| Mobile fin de journée | 4,41 | 0,54 |

Les quantités théoriques de silicium et de fer ayant été ajoutées à cette date totalisent 108,55 tonnes. Les quantités en sortie de ces éléments à même date sont de 112,69 tonnes. La différence montre un drainage de 4,14 tonnes de fer et de silicium pur. Cependant, dû au changement de campagne, le four et les réactions chimiques provoqués à l'intérieur peuvent réagir différemment qu'à l'habitude faussant une partie des données.

Il y a eu un total de 111,88 tonnes de ferrosilicium ayant coulé du four chez Elkem le 15 mars 2020 pour 8 coulées de FeSi 65% et 18 coulées de FeSi 75%. En se référant au poids médian des coulées de 2020 il y aurait dû avoir environ 115,85 tonnes de métal, montrant une différence de 3,96 tonnes. Encore une fois, le changement de campagne peut fausser certaines quantités. La différence entre le minimum et le maximum atteint par la moyenne mobile du nouveau calcul totalise 3,81 tonnes, quantité s'approchant de la différence des entrées et sorties.

En comparant les courbes de l'ancien et du nouveau calcul, il est possible de voir une

ressemblance entre elles. Cependant, la courbe du nouveau calcul est positionnée davantage sur la ligne des zéros contrairement à l'ancienne courbe qui présente une grande quantité de métal accumulé.

4.3.2.3 JOUR SUIVANT

La Figure 4.15 affiche les résultats de l'estimation de l'accumulation de métal du lendemain de la production normale du 15 mars 2020. La ligne épaisse et pleine montre une accumulation normale se situant entre -1 tonne et 1 tonne en début de journée pour ensuite afficher une accumulation de métal entre midi et 20h. Du côté de l'ancienne courbe, il est possible de voir qu'elle affiche près de 3,45 tonnes de métal accumulées malgré le fait que les coulées des dernières heures se soient bien déroulées. Elle va même jusqu'à afficher plus de 9,68 tonnes de métal accumulé, soit 3,06 tonnes de plus que la nouvelle courbe.

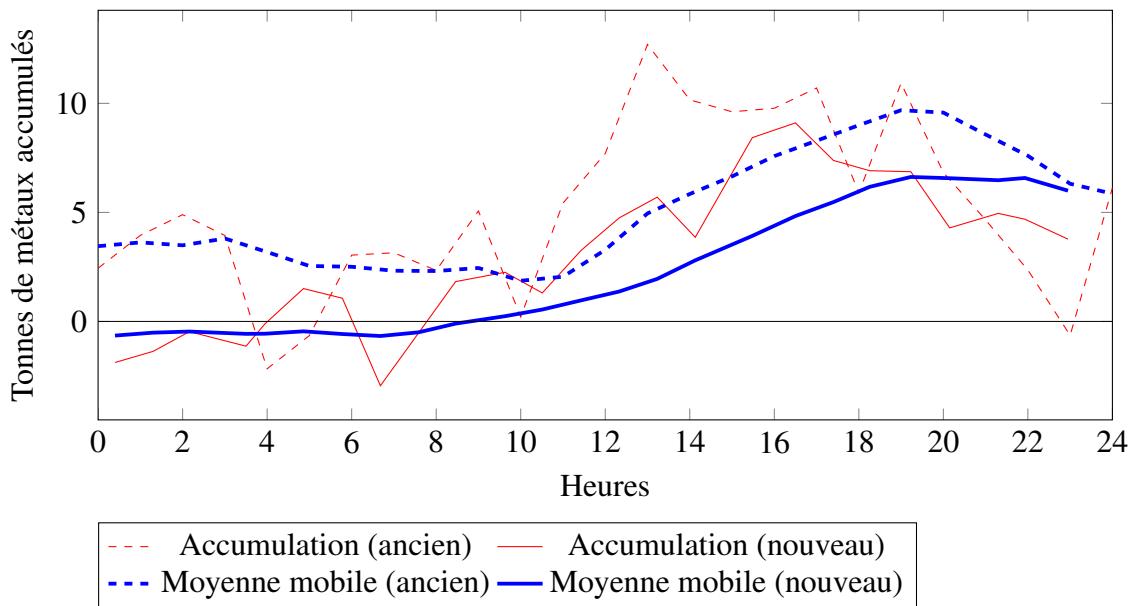


FIGURE 4.15 : Accumulation de métal du 16 mars 2020

© Pierre-Yves Glidden, 2022.

Les Tableaux 4.31 et 4.32 affichent les statistiques importantes à connaître au niveau de l’accumulation de métal aidant à la compréhension de la Figure 4.15. Ils permettent de faire une comparaison des quantités de matières étant entrées dans le four avec les matières étant sorties de celui-ci. Les deux tableaux offrent une vue d’ensemble et aident à comparer les résultats des calculs.

TABLEAU 4.31 : Données de production du 16 mars 2020

| Nom | Valeur |
|---|---------------|
| Nombre de coulées | 26 |
| Somme des Si et Fe théorique entré dans le four | 109,98 tonnes |
| Somme des Si et Fe sorti du four (avec poussière) | 108,63 tonnes |
| Poids total des coulées dans la journée | 106,49 tonnes |
| Poussière totale dans la journée | 3,41 tonnes |
| Poids moyen des coulées de la journée | 4,09 tonnes |

TABLEAU 4.32 : Comparaison du 16 mars 2020

| Accumulation | Ancien (tonnes) | Nouveau (tonnes) |
|-----------------------------|--------------------|---------------------|
| Minimum ponctuel | -2,17 | -2,95 |
| Maximum ponctuel | 12,70 | 9,10 |
| Minimum moyenne mobile | 1,86 | -0,67 |
| Maximum moyenne mobile | 9,69 | 6,62 |
| Ponctuelle début de journée | 2,44 | -1,88 |
| Ponctuelle fin de journée | 6,13 | 3,77 |
| Mobile début de journée | 3,45 | -0,65 |
| Mobile fin de journée | 5,86 | 6,00 |

4.3.2.4 COMPARAISON DES CALCULS

Une fois de plus, pour les dates du 14 mars 2020 au 16 mars 2020, une simple observation des Figures 4.13, 4.14 et 4.15 montrent une amélioration du calcul, puisque les courbes du nouveau calcul sont davantage rapprochées à aucune tonne de métal accumulé comparativement à l'ancien calcul qui affiche une accumulation pouvant aller jusqu'à plus de 13 tonnes. Sachant que pour ces dates la production s'est bien déroulée et qu'aucun métal ne s'est accumulé, le nouveau calcul montre une amélioration.

4.3.3 PRODUCTION STANDARD : 22 JANVIER 2021

Le dernier jour de résultats ayant eu une production standard de ferrosilicium est le 22 janvier 2021. Il sera question d'une période de trois jours, le jour précédent, le jour même et le jour suivant. Tous ces jours font partie d'une production de ferrosilicium 50%.

4.3.3.1 JOUR PRÉCÉDENT

La Figure 4.16 affiche les résultats d'accumulation de métal du 21 janvier 2021. Toutes les courbes s'accordent pour afficher un drainage approximatif de -5 tonnes de métal en début de journée. Il est donc possible qu'une accumulation de métal ait été présente la veille.

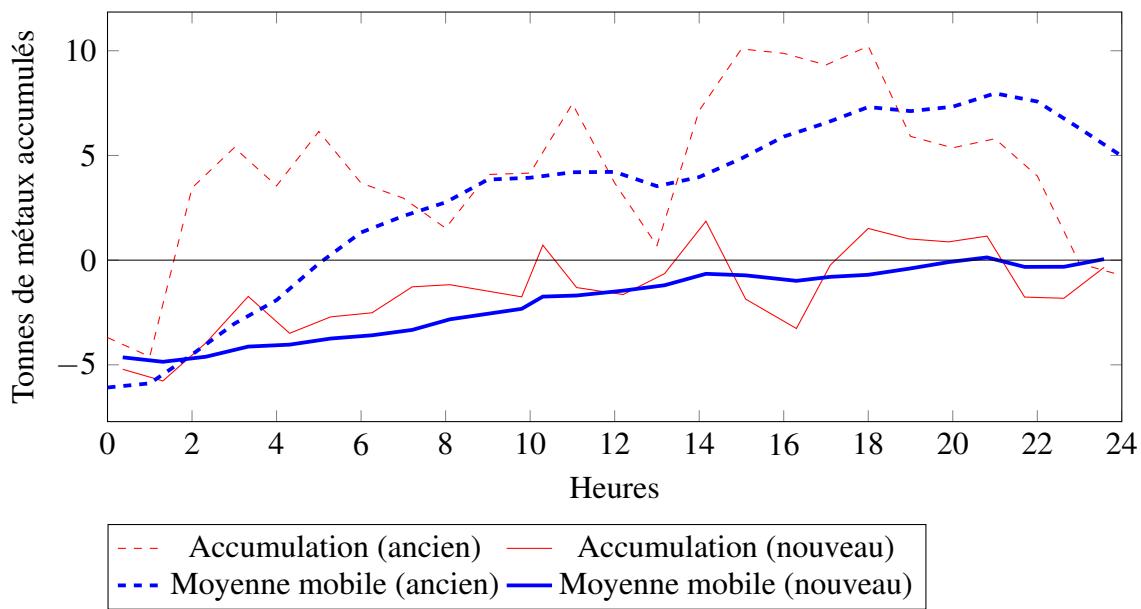


FIGURE 4.16 : Accumulation de métal du 21 janvier 2021

© Pierre-Yves Glidden, 2022.

Les Tableaux 4.33 et 4.34 montrent certaines statistiques importantes de cette journée aidant une meilleure interprétation des résultats observés dans la Figure 4.16.

TABLEAU 4.33 : Données de production du 21 janvier 2021

| Nom | Valeur |
|---|---------------|
| Nombre de coulées | 25 |
| Somme des Si et Fe théorique entré dans le four | 157,51 tonnes |
| Somme des Si et Fe sorti du four (avec poussière) | 159,12 tonnes |
| Poids total des coulées dans la journée | 154,73 tonnes |
| Poussière totale dans la journée | 4,21 tonnes |
| Poids moyen des coulées de la journée | 6,19 tonnes |

TABLEAU 4.34 : Comparaison du 21 janvier 2021

| Accumulation | Ancien (tonnes) | Nouveau (tonnes) |
|-----------------------------|--------------------|---------------------|
| Minimum ponctuel | -4,61 | -5,77 |
| Maximum ponctuel | 10,22 | 1,86 |
| Minimum moyenne mobile | -6,08 | -4,86 |
| Maximum moyenne mobile | 7,97 | 0,13 |
| Ponctuelle début de journée | -3,70 | -5,21 |
| Ponctuelle fin de journée | -0,73 | -0,35 |
| Mobile début de journée | -6,08 | -4,64 |
| Mobile fin de journée | 4,97 | 0,05 |

Bien que toutes les courbes montrent approximativement les mêmes valeurs en début de journée, les anciennes courbes, lignes pointillées, montrent immédiatement une grande accumulation de métal. Tandis que du côté des lignes pleines, l'accumulation de métal se fait constante jusqu'à la ligne de zéro. La différence en fin de journée entre la nouvelle moyenne mobile et l'ancienne est d'environ 8,28 tonnes de métal.

4.3.3.2 JOUR STANDARD

La Figure 4.17 montre les résultats de la production standard du 22 janvier 2021. Elle présente notamment la moyenne mobile longeant la ligne de zéro et l'accumulation ponctuelle variant entre -1 et 1 tonne de métal accumulé dans le four.

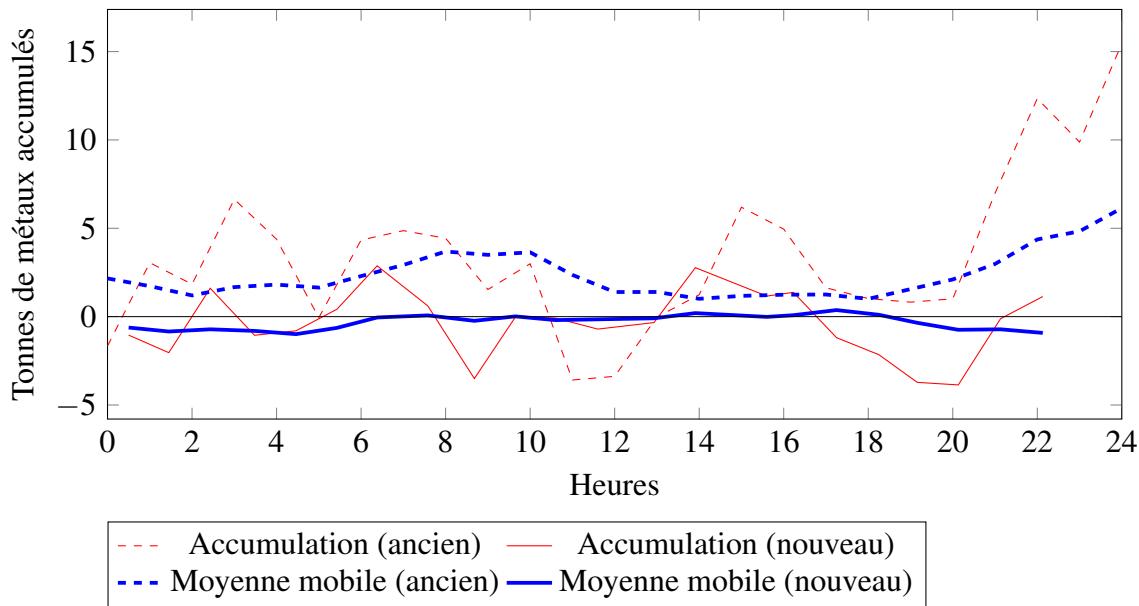


FIGURE 4.17 : Accumulation de métal du 22 janvier 2021

© Pierre-Yves Glidden, 2022.

Les Tableaux 4.35 et 4.36 affichent les informations statistiques de la journée afin de faciliter l'interprétation des résultats vus dans la Figure 4.17.

TABLEAU 4.35 : Données de production du 22 janvier 2021

| Nom | Valeur |
|---|---------------|
| Nombre de coulées | 22 |
| Somme des Si et Fe théorique entré dans le four | 138,58 tonnes |
| Somme des Si et Fe sorti du four (avec poussière) | 140,54 tonnes |
| Poids total des coulées dans la journée | 135,58 tonnes |
| Poussière totale dans la journée | 4,71 tonnes |
| Poids moyen des coulées de la journée | 6,16 tonnes |

TABLEAU 4.36 : Comparaison du 22 janvier 2021

| Accumulation | Ancien (tonnes) | Nouveau (tonnes) |
|-----------------------------|--------------------|---------------------|
| Minimum ponctuel | -3,59 | -3,86 |
| Maximum ponctuel | 15,45 | 2,88 |
| Minimum moyenne mobile | 1,01 | -0,99 |
| Maximum moyenne mobile | 6,14 | 0,37 |
| Ponctuelle début de journée | -1,66 | -1,05 |
| Ponctuelle fin de journée | 15,45 | 1,14 |
| Mobile début de journée | 2,16 | -0,62 |
| Mobile fin de journée | 6,14 | -0,92 |

Le Tableau 4.35 montre un total théorique des Si et des Fe en entrée de 138,58 tonnes et en sortie de 140,54 tonnes. La différence de ces quantités indique donc un drainage de 1,96 tonne de métal au cumulatif pour la journée. Bien que la journée précédente n'affiche pas d'accumulation de métal apparente, il est possible que la courbe du 21 janvier 2021 ait subi une légère translation vers le bas et qu'une petite somme de métal se soit accumulée durant cette journée. Somme toute, il n'y a pas eu d'accumulation de métal pour la journée du 22 janvier.

Du côté du poids total médian des coulées, la production de ferrosilicium 50% était de 6,54 tonnes de FeSi par coulée en 2020. Il y a eu un total de 22 coulées le 22 janvier 2021 chez Elkem métal Canada totalisant 135,58 tonnes de métal. Une différence atteignant les 8,3 tonnes. Malgré cette différence élevée, il est possible que durant cette journée les opérateurs aient ajouté une plus petite quantité de matière première générant ainsi une plus petite quantité médiane de métal pour ce jour. Une autre possibilité serait d'observer un début d'accumulation de métal dans les premières heures de la journée suivante.

En comparant les nouvelles et les anciennes courbes, il est une fois de plus possible de voir une constance et une cohérence d'un jour à l'autre pour les nouvelles courbes. En effet, en vérifiant la fin de la courbe de la moyenne mobile de la Figure 4.16 et le début de la courbe de la moyenne mobile de la Figure 4.17, il est possible de voir que l'une est le prolongement de l'autre. Toutefois, du côté de l'ancienne moyenne mobile, il est évident que des incohérences sont présentes, puisque la fin de la courbe du 21 janvier n'est pas le prolongement de la courbe du 22 janvier. La courbe fait un bon en passant d'une accumulation de 4,96 tonnes à 2,16 tonnes de métal. En vérifiant les valeurs de l'estimation de l'accumulation de métal ponctuelle pour le 22 janvier, l'ancienne courbe va atteindre une estimation de 15,45 tonnes de métal en fin de journée contrairement à la nouvelle courbe affichant 1,13 tonne.

4.3.3.3 JOUR SUIVANT

La Figure 4.18 affiche les résultats du lendemain de la production standard du 22 janvier 2020. La courbe de la moyenne mobile affiche 0,67 tonne de métal accumulé en début de journée, concordant avec les résultats en soirée de la journée précédente.

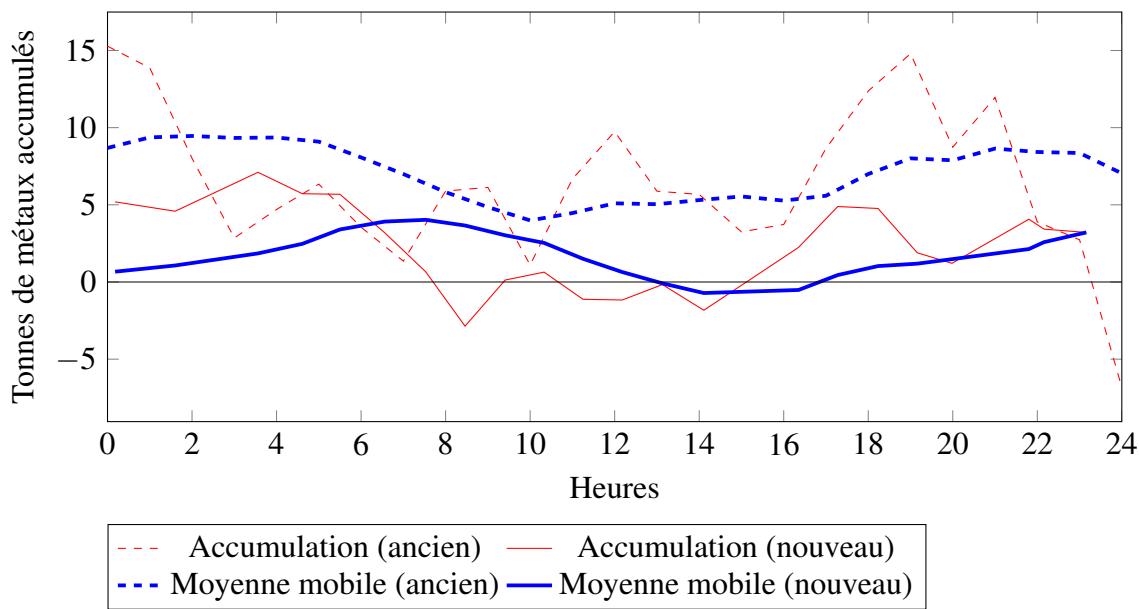


FIGURE 4.18 : Accumulation de métal du 23 janvier 2021

© Pierre-Yves Glidden, 2022.

Les Tableaux 4.37 et 4.38 montrent les statistiques de la journée du 23 janvier 2021.

TABLEAU 4.37 : Données de production du 23 janvier 2021

| Nom | Valeur |
|---|---------------|
| Nombre de coulées | 22 |
| Somme des Si et Fe théorique entré dans le four | 140,25 tonnes |
| Somme des Si et Fe sorti du four (avec poussière) | 135,86 tonnes |
| Poids total des coulées dans la journée | 131,84 tonnes |
| Poussière totale dans la journée | 3,45 tonnes |
| Poids moyen des coulées de la journée | 5,99 tonnes |

TABLEAU 4.38 : Comparaison du 23 janvier 2021

| Accumulation | Ancien (tonnes) | Nouveau (tonnes) |
|-----------------------------|--------------------|---------------------|
| Minimum ponctuel | -6,84 | -2,86 |
| Maximum ponctuel | 15,28 | 7,11 |
| Minimum moyenne mobile | 3,99 | -0,72 |
| Maximum moyenne mobile | 9,46 | 4,03 |
| Ponctuelle début de journée | 15,28 | 5,19 |
| Ponctuelle fin de journée | -6,84 | 3,21 |
| Mobile début de journée | 8,69 | 0,67 |
| Mobile fin de journée | 7,04 | 3,21 |

Bien que la journée précédente n'ait pas accumulé de métal, les anciennes courbes, les lignes pointillées, affichent une grande accumulation de métal dépassant les 8,68 tonnes pour la moyenne mobile et les 15,28 tonnes pour l'accumulation ponctuelle. L'expertise des métallurgistes et les Figures 4.16 et 4.17 ont pourtant démontré une production normale durant les dernières heures. Les anciennes courbes persistent sur une accumulation de métal et affichent un minimum de 3,99 tonnes de métal accumulé dans le four. Cependant du côté des nouvelles courbes, il est possible d'observer que l'accumulation de métal de la moyenne

mobile atteint un maximum de 4,27 tonnes de métal, soit une quantité plus réaliste selon les données récupérées par le système. Le four subit ensuite un drainage et l'accumulation de métal se retrouve dans les -0,71 tonne de métal.

4.3.3.4 COMPARAISON DES CALCULS

Le nouveau calcul d'accumulation de métal présente une amélioration à l'ancien calcul, puisque les jours du 21 janvier 2021 au 23 janvier 2021 sont des jours n'ayant pas eu d'accumulation de métal et que le nouveau calcul montre une tendance s'approchant des 0 tonne contrairement à l'ancien calcul montrant un maximum ponctuel de métal accumulé atteignant près de 10,22 tonnes de métal.

4.4 RÉSUMÉ

Finalement, les résultats dans cette section ont permis de montrer que le nouveau calcul d'accumulation de métal apporte une amélioration de l'estimation du métal dans le four. Le calcul a été mis en production dans le système d'aide à l'opérateur chez Elkem métal Canada et est en cours d'utilisation afin d'aider les opérateurs et les métallurgistes dans leurs décisions face à la production du ferrosilicium. Plusieurs outils informatiques ont permis de faire avancer et de développer ce projet. Pour l'élaboration et la mise en place du calcul sur la plateforme web, deux langages de programmation ont principalement été adoptés. Le premier langage ayant été utilisé est le langage Python [33]. Il a été sélectionné par sa grande variété de librairies, sa facilité d'utilisation et son efficacité. C'est un langage ayant

fait ses preuves à plusieurs reprises, et ce sur des projets d'envergure. Python a permis une meilleure vue d'ensemble sur les données utilisées et a grandement facilité la manipulation de celles-ci. Les librairies employées sont *Numpy* [37], *Pandas* [34] , *Matplotlib* [38] et *Seaborn* [39]. *Numpy* et *Pandas* ont servi à la lecture et l'ordonnancement des données sous forme de matrice. *Matplotlib* a servi à la conception d'histogrammes et de graphiques pour une meilleure interprétation des données dans leur environnement. Finalement la librairie *Seaborn* a permis le couplage des colonnes de données entre elles et la visualisation de leurs importances à l'aide d'une carte de chaleur. Le deuxième langage de programmation ayant été utilisé est PHP [30]. Il va sans dire que la raison principale du choix de ce langage est que les applications web de l'entreprise sont entièrement conçues en PHP. Malgré tout, la simplicité de ce langage et l'abondance de librairies disponibles ont permis de faciliter la conception de l'algorithme pour le calcul d'accumulation de métal et la conception graphique des résultats.

Durant le projet, certains défis et problèmes se sont présentés. En effet, le projet a grandement évolué et initialement se voulait prédire la chimie d'une coulée en cours de production. Malheureusement, bien que la compagnie possède beaucoup de données sur les coulées et les quantités produites, il en est différent pour les données de chimie sur les matières premières en entrée. Afin d'effectuer une prédition adéquate sur la chimie sortante, le calcul nécessiterait plus d'analyses fréquentes sur les taux d'humidité et les éléments chimiques contenus dans la matière en entrée. En date de janvier 2021, les analyses des matières premières se font rarement. Effectuer une analyse des matières premières toutes les semaines apporterait une meilleure vue d'ensemble des entrants et ceci pourrait faire place à une possibilité d'un

projet découlant.

CHAPITRE V

CONCLUSION

Ce mémoire a permis l'amélioration du calcul d'accumulation de métal dans un four à arc électrique pour des procédés de ferrosilicium. Le Chapitre 1 a présenté la problématique de ce projet ainsi que les solutions proposées. Le Chapitre 2 renferme la revue de littérature scientifique pour les principes métallurgiques de ferrosilicium et les principes informatiques ayant été utilisés pour le projet. Le Chapitre 3 a décrit la méthodologie pour parvenir à l'achèvement du nouveau calcul d'accumulation de métal. Le Chapitre 4 présente les résultats obtenus par le nouveau calcul et effectue une preuve d'amélioration en comparant les résultats du nouveau calcul avec les résultats de l'ancien calcul. Ces résultats montrent une amélioration du calcul et coïncident avec les affirmations des experts sur les quantités estimées.

5.1 REVUE DES CONTRIBUTIONS

Il existe deux contributions principales à ce projet. La première contribution consiste à l'amélioration du calcul d'estimation de l'accumulation de métal en soi. Le projet a permis une amélioration du calcul en incluant plus de paramètres jouant un rôle sur l'estimation et en affinant les paramètres déjà présents. Cet ajout permet un meilleur contrôle des quantités de matières premières que les opérateurs ont à ajouter et ainsi un meilleur résultat sur la qualité et la précision de la chimie des produits de ferrosilicium.

La seconde contribution est l'amélioration de l'interface du SAO rendant plus apparentes les quantités de matière première ajoutées, les quantités de ferrosilicium sortant et l'accumulation de métal dans une page web contenant un graphique unique, épuré et prenant en compte le type de ferrosilicium en production.

5.2 RECOMMANDATIONS ET TRAVAUX FUTURS

Le projet a apporté une amélioration du calcul en incluant le fer comme quantité en entrée. Cet ajout a permis d'aller chercher jusqu'à environ 98% des éléments dans la matière première en entrée et dans le ferrosilicium en sortie. Un autre ajout majeur au calcul est celui du temps de latence pour connaître la période réelle de récupération de la matière première en entrée. Ceci a permis d'aller chercher de la précision quant aux quantités à soustraire de la sortie, permettant une meilleure approximation des quantités dans le four. Ces ajouts permettent un meilleur contrôle des quantités de matières premières que les opérateurs ont à ajouter et ainsi un meilleur résultat sur la qualité et la précision de la chimie des produits de ferrosilicium.

Il serait aussi possible d'ajouter d'autres courbes utilisant des méthodes de calcul différentes. Parmi les calculs envisagés se trouve un nouveau calcul utilisant uniquement les différentes informations électriques et la consommation énergétique du four [40]. En effet, un taux de métal élevé dans le four peut modifier la tension électrique, peut modifier la consommation des anodes, l'efficacité de l'arc électrique et certains autres paramètres électriques pouvant être détectés avec l'équipement approprié [41]. Il suffirait d'effectuer les

recherches nécessaires pour bien comprendre les comportements entre les quantités de métal dans le four et les réactions électriques en découlant. Un nouveau calcul entièrement différent permettant de supporter les résultats du calcul déjà en place.

Finalement, il faudrait faire plus d'analyses sur la matière première, et ce sur une base hebdomadaire, voire journalière. Ces analyses apporteraient un grand nombre de données significatives permettant d'avoir une meilleure idée de l'impact des variations de l'humidité et des contaminants sur le processus. Une solution au problème d'accumulation de métal consiste à utiliser une approche complètement différente en effectuant des suggestions de quantités de matières premières au four selon le produit ciblé dans un contexte d'optimisation de boîte noire [42]. Plutôt que de déterminer les quantités de métal dans le four, le projet consisterait à utiliser des données historiques et de s'attaquer aux quantités en entrées afin d'avoir un résultat le plus optimal possible.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] G. Sævars döttir, H. Pálsson, M. Jónsson, et J. A. Bakken, “Electrode erosion due to high-current electric arcs in silicon and ferrosilicon furnaces,” *steel research international*, vol. 77, n° 6, pp. 385–391, 2006.
- [2] H.-J. Odenthal, A. Kemminger, F. Krause, L. Sankowski, N. Uebber, et N. Vogl, “Review on modeling and simulation of the electric arc furnace (eaf),” *steel research international*, vol. 89, n° 1, p. 1700098, 2018.
- [3] S. Bublik, J. E. Olsen, V. Loomba, Q. G. Reynolds, et K. E. Einarsrud, “A review of ferroalloy tapping models,” *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 52, n° 4, pp. 2038–2047, 2021.
- [4] V. Logar, D. Dovžan, et I. Škrjanc, “Mathematical modeling and experimental validation of an electric arc furnace,” *ISIJ international*, vol. 51, n° 3, pp. 382–391, 2011.
- [5] H. S. Mishra, R. Sahu, et D. Padan, “Effect of tin as alloying element on grey iron automobile casting,” dans *Recent Advances in Manufacturing Processes*. Springer, 2022, pp. 141–152.
- [6] A. Mekhtiyev, A. Akhmetov, V. Yudakova, et F. Bulatbayev, “Experience with ferrosilicoaluminum alloy during deoxidation of steel,” *Metalurgija*, vol. 55, n° 1, pp. 47–50, 2016.
- [7] F. Dubroux, “Le ferro-silicium,” *Revue de Métallurgie*, vol. 76, pp. 387–395, 1979.
- [8] M. S. B. Collins, T.J. Napier-Munn, “The production, properties, and selection of ferrosilicon powders for heavy-medium separation,” *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 75, n° 5, pp. 103–115, 1974.
- [9] H. El-Faramawy, M. Eissa, T. Mattar, A. Fathy, et S. Ghali, “Ferrosilicon magnesium production,” *Scandinavian Journal of Metallurgy*, vol. 32, n° 1, pp. 37–46, 2003.
- [10] I. Dugic et I. L. Svensson, “An investigation of the effect of inoculants on the metal expansion penetration in grey iron,” *International Journal of Cast Metals Research*, vol. 11,

n° 5, pp. 333–338, 1999.

- [11] S. Lemieux, “Étude des phénomènes d’appauvrissement en magnésium et strontium dans l’élaboration du ferrosilicium,” master, Université du Québec à Chicoutimi, 2009. [En ligne]. Repéré à : <https://constellation.uqac.ca/150/>
- [12] N. K. Batra, “Modelling of ferrosilicon smelting in submerged arc furnaces,” *Ironmaking & Steelmaking*, vol. 30, n° 5, pp. 399–404, 2003.
- [13] M. H. Jacobs, T. J. Law, D. A. Melford, et M. J. Stowell, “Basic processes controlling the nucleation of graphite nodules in chill cast iron,” *Metals Technology*, vol. 1, n° 1, pp. 490–500, 1974.
- [14] G. Alonso, P. Larrañaga, D. M. Stefanescu, E. D. la Fuente, A. Natxiondo, et R. Suarez, “Kinetics of nucleation and growth of graphite at different stages of solidification for spheroidal graphite iron,” *International Journal of Metalcasting*, vol. 11, 2017.
- [15] E. L. Radu Balan, Olimpiu Hancu, “Modeling and adaptive control of an electric arc furnace,” *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 40, n° 8, pp. 163–168, 2007.
- [16] N. E. Kamfjord, E. H. Myrhaug, H. Tveit, et B. Wittgens, “Energy balance of a 45 mw (ferro-) silicon submerged arc furnace,” *INFACON XII Helsinki Finland*, 2010.
- [17] L. S. Carlsson, P. B. Samuelsson, et P. G. Jönsson, “Modeling the effect of scrap on the electrical energy consumption of an electric arc furnace,” *Processes*, vol. 8, n° 9, 2020.
- [18] J. G. Nault, “Système intelligent d’aide au contrôle de procédé dans un four à arc,” master, Université du Québec à Chicoutimi, 8 2012. [En ligne]. Repéré à : <https://constellation.uqac.ca/2496/>
- [19] G. R. J. Helgi Thor Ingason, “Control of the silicon ratio in ferrosilicon production,” *Control Engineering Practice*, vol. 6, n° 8, pp. 1015–1020, 1998.
- [20] J. Safarian, “Extraction of iron and ferrosilicon alloys from low-grade bauxite ores,” dans *Extraction 2018*. Springer, 2018, pp. 825–837.

- [21] M. Free, M. Moats, T. Robinson, G. Houlachi, N. Neelameggham, D. Creber, G. Holywell, et M. Ginatta, "Electrometallurgy-now and in the future," dans *AIP Conference Proceedings*. American Institute of Physics, Ste. 1 NO 1 Melville NY 11747-4502 United States, 2012.
- [22] S. M. Nezhad et A. Zabett, "Thermodynamic analysis of the carbothermic reduction of electric arc furnace dust in the presence of ferrosilicon," *Calphad*, vol. 52, pp. 143–151, 2016.
- [23] J. F. White, K. Rigas, S. P. Andersson, et B. Glaser, "Thermal properties of söderberg electrode materials," *Metallurgical and Materials Transactions B*, vol. 51, p. 1928–1932, 2020.
- [24] M. E. Davis et R. J. Davis, *Fundamentals of chemical reaction engineering*. Courier Corporation, 2012.
- [25] T. Videm, "Reaction rate of reduction materials for the (ferro) silicon process," *INFACON*, vol. 7, pp. 221–231, 1995.
- [26] O. Y. Sheshukov, E. A. Vyaznikova, V. G. Smirnova, et L. A. Ovchinnikova, "Influence of the cooling rate on the structure of silicon ferroalloys," *Steel in Translation*, vol. 41, 2011.
- [27] M. Najafabadi, F. Villanustre, T. Khoshgoftaar, N. Seliya, R. Wald, et E. Muharemagic, "Deep learning applications and challenges in big data analytics," *Journal of Big Data*, vol. 2, 12 2015.
- [28] J. Ajenstat, F. Marcel, et S.-P. Alain, ""système expert d'aide à l'intervenant social"," *Service Social*, vol. 38, p. 297–315, 1989.
- [29] E. Castillo, J. M. Gutierrez, et A. S. Hadi, *Expert systems and probabilistic network models*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [30] S. S. Bakken, Z. Suraski, et E. Schmid, *PHP Manual : Volume 1*. iUniverse, Incorporated, 2000.
- [31] O. Corporation, 2017. [En ligne]. Repéré à : <https://www.oracle.com/database/index.html>

- [32] M. F. Roodsari, “The melting behaviour of coal ore composites,” phd, McMaster University, 2005.
- [33] G. Van Rossum et F. L. Drake, *Python 3 Reference Manual*. Scotts Valley, CA : CreateSpace, 2009.
- [34] W. McKinney *et al.*, “Data structures for statistical computing in python,” dans *Proceedings of the 9th Python in Science Conference*, vol. 445. Austin, TX, 2010, pp. 51–56.
- [35] M. M. Elseviers, “Statistics corner : The box plot : An alternative way to present a distribution of observations,” *EDTNA-ERCA Journal*, vol. 30, n° 2, pp. 114–116, 2004. [En ligne]. Repéré à : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1755-6686.2004.tb00345.x>
- [36] P. David F. Williamson, D. Robert A. Parker, et M. Juliette S. Kendrick, “The box plot : A simple visual method to interpret data,” *Annals of Internal Medicine*, vol. 110, n° 11, pp. 916–921, 1989, pMID : 2719423. [En ligne]. Repéré à : <https://www.acpjournals.org/doi/abs/10.7326/0003-4819-110-11-916>
- [37] C. R. Harris, K. J. Millman, S. J. van der Walt, R. Gommers, P. Virtanen, D. Cournapeau, E. Wieser, J. Taylor, S. Berg, N. J. Smith, R. Kern, M. Picus, S. Hoyer, M. H. van Kerkwijk, M. Brett, A. Haldane, J. Fernández del Río, M. Wiebe, P. Peterson, P. Gérard-Marchant, K. Sheppard, T. Reddy, W. Weckesser, H. Abbasi, C. Gohlke, et T. E. Oliphant, “Array programming with NumPy,” *Nature*, vol. 585, p. 357–362, 2020.
- [38] J. D. Hunter, “Matplotlib : A 2d graphics environment,” *Computing in science & engineering*, vol. 9, n° 3, pp. 90–95, 2007.
- [39] M. Waskom, O. Botvinnik, D. O’Kane, P. Hobson, S. Lukauskas, D. C. Gemperline, T. Augspurger, Y. Halchenko, J. B. Cole, J. Warmenhoven, J. de Ruiter, C. Pye, S. Hoyer, J. Vanderplas, S. Villalba, G. Kunter, E. Quintero, P. Bachant, M. Martin, K. Meyer, A. Miles, Y. Ram, T. Yarkoni, M. L. Williams, C. Evans, C. Fitzgerald, Brian, C. Fonnesbeck, A. Lee, et A. Qalieh, “mwaskom/seaborn : v0.8.1 (september 2017),” septembre 2017. [En ligne]. Repéré à : <https://doi.org/10.5281/zenodo.883859>
- [40] E. Khodabandeh, M. Ghaderi, A. Afzalabadi, A. Rouboa, et A. Salarifard, “Parametric study of heat transfer in an electric arc furnace and cooling system,” *Applied Thermal*

Engineering, vol. 123, pp. 1190–1200, 2017.

- [41] F. Qian, B. Farouk, et R. Mutharasan, “Modeling of fluid flow and heat transfer in the plasma region of the dc electric arc furnace,” *Metallurgical and materials transactions B*, vol. 26, n° 5, pp. 1057–1067, 1995.
- [42] C. Audet et W. Hare, *Derivative-free and blackbox optimization*. Springer, 2017, vol. 2.

APPENDICE A

INTERFACES LOGICIEL

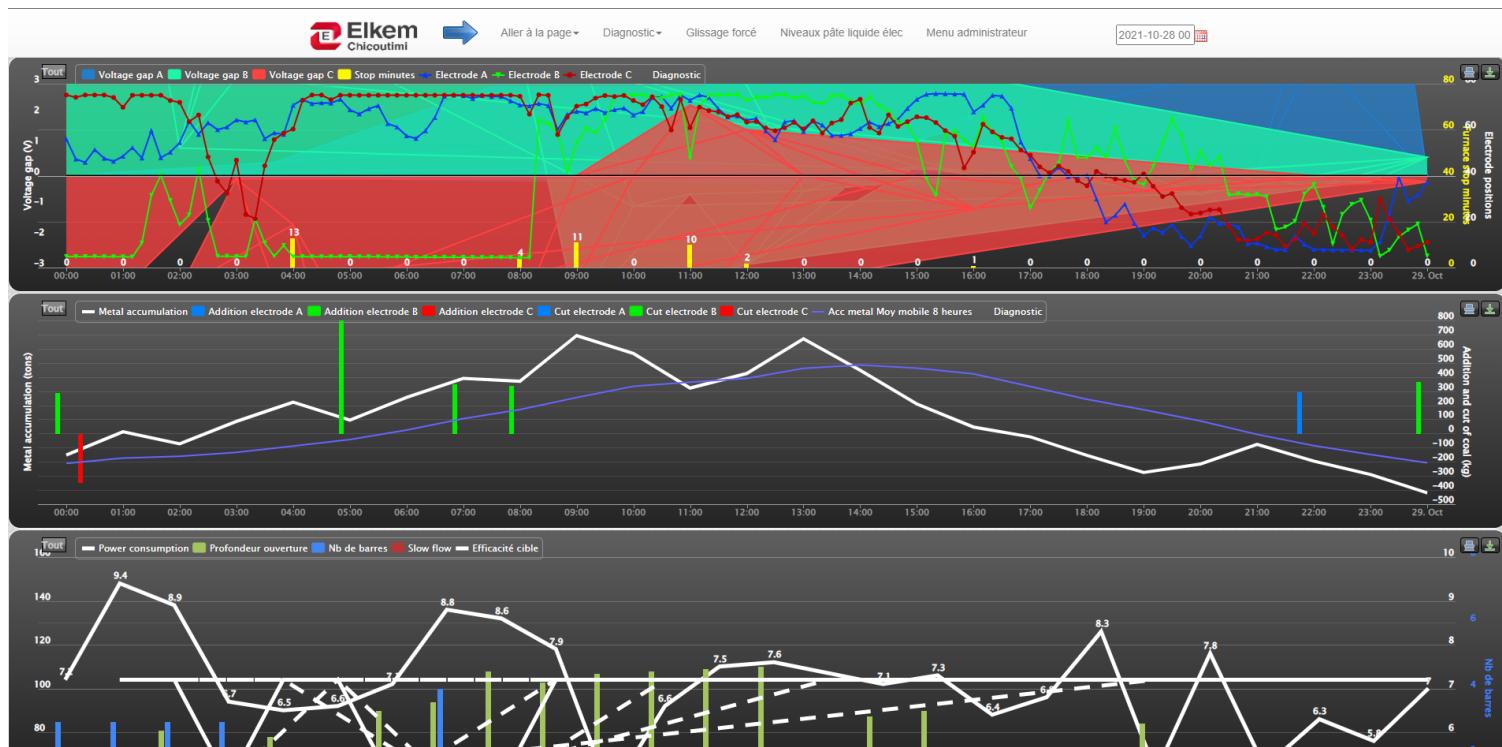


FIGURE A.1 : Ancienne page de l'accumulation de métal

© Pierre-Yves Glidden, 2022.

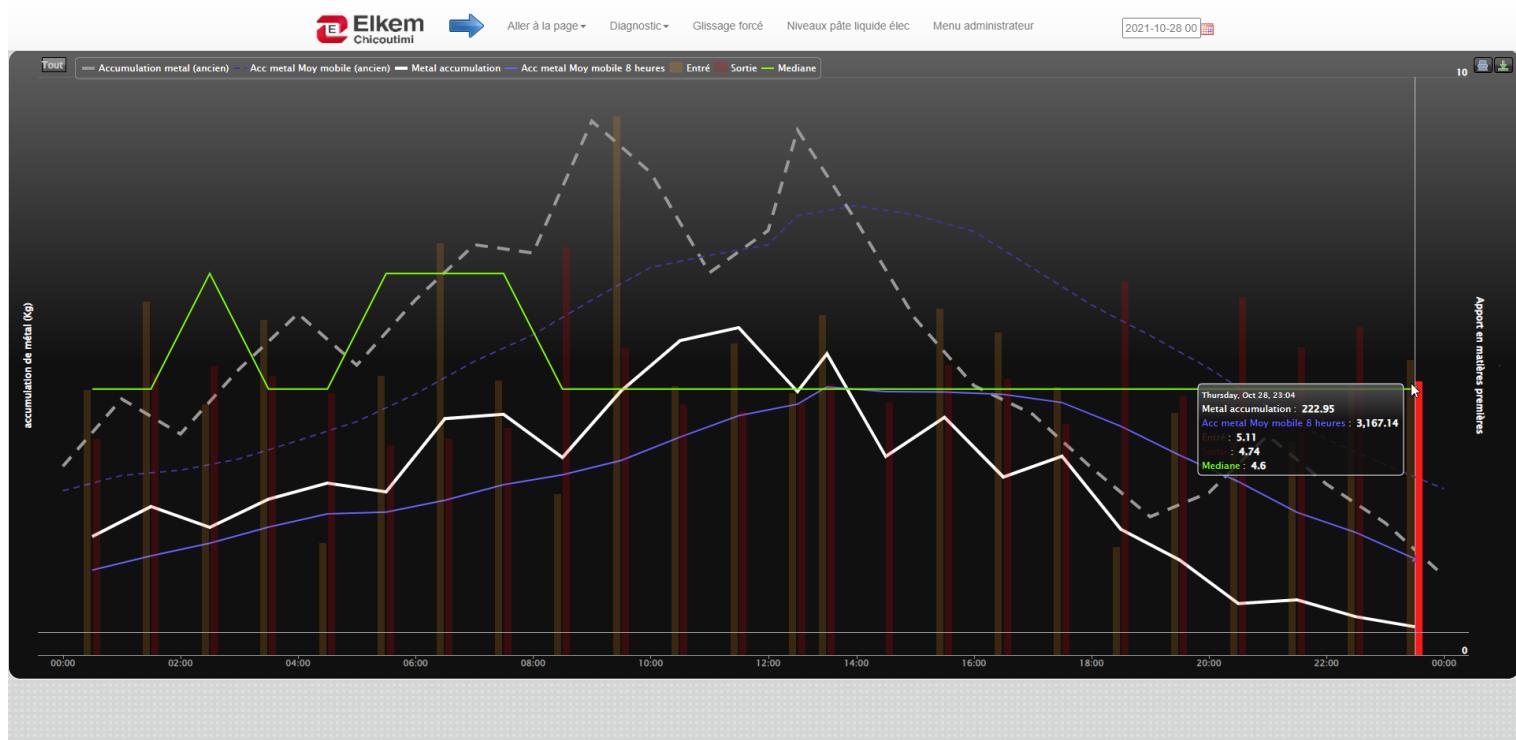


FIGURE A.2 : Nouvelle page de l'accumulation de métal

© Pierre-Yves Glidden, 2022.