

Rapport de Stage de Fin d'Études

Sujet du stage
Optimisation des coûts de production

Présenté par
Job CONGO

Stage réalisé à
Fonderie de Niederbronn, Niederbronn, France

Dates du stage
Du 11 mars 2024 au 26 juillet 2024

Encadrant industriel
Guy LUTINGER, président de la Fonderie de Niederbronn

Responsable académique
Christophe PRUD'HOMME, responsable du master CSMI

Date de soutenance
30 août 2024



Table des matières

1 Contexte	2
1.1 Introduction rapide	2
1.2 Présentation de la Fonderie de Niederbronn	2
1.3 Description du processus de production des pièces en fonte	4
1.4 Objectifs	8
1.5 Le plan du rapport	8
2 L'étude statistique	9
2.1 Contexte et Objectifs	9
2.2 Les données	10
2.3 Les indicateurs	13
2.4 Les éléments chimiques	15
2.5 Les valeurs extrêmes	17
2.6 Régression Linéaire	19
2.7 Conclusion	22
3 La recette Optimale	23
3.1 Présentation du problème	23
3.2 Modélisation du problème	23
3.3 L'algorithme du simplexe	25
3.4 Implémentation et Résultats	27
4 Le Traitement au Magnésium de la fonte GS	33
4.1 Présentation du problème	33
4.2 Implémentation et Résultats	36
5 Conclusion Générale	38

1 Contexte

1.1 Introduction rapide

La fonderie est un secteur industriel clé qui se spécialise dans la fabrication de pièces moulées en métal. Elle englobe une large gamme d'alliages, allant du fer à l'aluminium en passant par le cuivre, répondant ainsi aux besoins diversifiés de l'industrie moderne. Ce secteur joue un rôle essentiel dans la production de composants pour de nombreuses applications industrielles.

Le rapport de stage présente une analyse des activités réalisées au sein de l'équipe Informatique de la Fonderie de Niederbronn. Ce stage a eu lieu sur une période de quatre mois, du 11 mars au 26 juillet 2024.

1.2 Présentation de la Fonderie de Niederbronn

La Fonderie de Niederbronn, fondée en 1769, est un partenaire clé dans la production de pièces en fonte. Grâce à son expérience et son savoir-faire, l'entreprise produit des pièces en fonte à graphite lamellaire (GJL) et à graphite sphéroïdal (GJS) pour une clientèle industrielle variée, aussi bien en France qu'à l'international. L'usine est située au Nord-Est de la France à Niederbronn près de Strasbourg.

Capacités et Installations de Production

Moyens de Fusion :

- 2 fours Junker 5T d'une puissance de 4MW.

Lignes de Moulage :

- **DISAMATIC 270** : Coulée automatique verticale pour des pièces jusqu'à 950 x 700 mm et un poids maximum de 40 kg.
- **HWS** : Coulée automatique horizontale pour des pièces de dimensions jusqu'à 1600 x 1400 mm et un poids maximum de 600 kg.

Moyens de Noyautage :

- 5 machines à noyer avec une capacité de production allant de 1 à 100 litres et des noyaux jusqu'à 300 kg.

Moyens de Peinture :

- 2 lignes de peinture liquide pouvant traiter des pièces jusqu'à 500 kg. Peintures disponibles : primaire d'accrochage, peinture résistante aux brouillards salins de 300h, haute température (600°C).

Moyens d'Usinage :

- Tours et centres d'usinage CNC avec des capacités variées pour des pièces de grandes dimensions (jusqu'à 1200 x 1000 x 600 mm).

Contrôle Qualité

La Fonderie de Niederbronn attache une grande importance à la qualité de ses produits, mise en œuvre à travers divers contrôles :

- **Dimensionnel** : Utilisation de bras FARO et scan 3D.
- **Non Destructif** : Banc de magnétoscopie et contrôle par ultrasons.
- **Caractéristiques Mécaniques** : Traction, contrôle de dureté, résilience.
- **Métallurgiques** : Spectrométrie et micrographie.

Secteurs d'Activité

La Fonderie de Niederbronn sert plusieurs secteurs industriels et domestiques, en fournant des pièces spécifiques adaptées aux besoins de chaque domaine.

- **Usage Industriel** : Le Machinisme Agricole, les Machines du BTP, les Pièces Hydrauliques,...
- **Usage Domestique** : Les Corps de Chaudière et Radiateurs, les Poêles et Inserts de Cheminée,...

Chiffres Clés et Ressources Humaines

- **Nombre de Collaborateurs** : 170.
- **Capacité de Fusion** : 20 000 tonnes par an.
- **Chiffre d’Affaires** : 23 millions d'euros pour l'exercice 2023.

Cette présentation met en lumière l'expertise, les capacités de production, et l'engagement qualité de la Fonderie de Niederbronn, faisant d'elle un acteur incontournable dans le secteur de la fonderie.



FIGURE 1 – Vues extérieure et aérienne de la Fonderie de Niederbronn

1.3 Description du processus de production des pièces en fonte

La production de pièces en fonte suit un processus ordonnée et méticuleux, composé de plusieurs étapes interconnectées qui garantissent la qualité et la durabilité des produits finis. Chaque étape, depuis la préparation des matériaux jusqu'au produit final, est cruciale pour obtenir des pièces répondant aux exigences techniques et aux normes industrielles. Le schéma ci-dessous illustre ce flux de production, offrant une vue d'ensemble des différentes phases.

Le processus de fabrication de la fonte

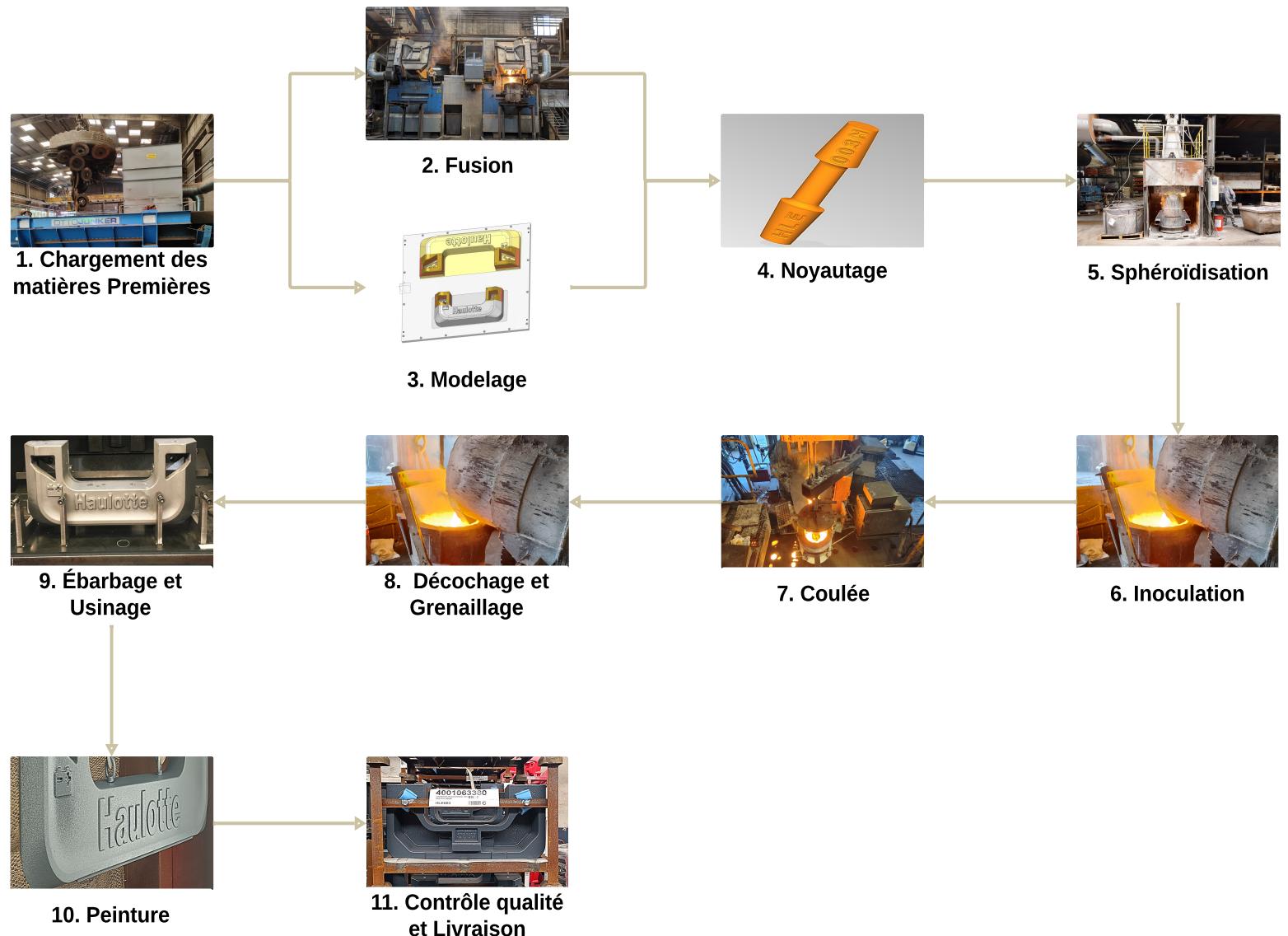


FIGURE 2 – Flux de production des pièces en fonte.

- 1. Chargement des matières premières :** À cette étape, les matériaux de base nécessaires à la production de la fonte sont préparés. Ce processus comprend le tri, le nettoyage et la sélection des matières premières, telles que le fer, le cuivre, les déchets métalliques provenant d'autres industries, ainsi que des alliages comme le magnésium et le silicium. Il est essentiel de choisir ces matériaux en fonction de

leur composition chimique afin d'obtenir les propriétés mécaniques souhaitées dans la fonte, car certains éléments chimiques peuvent altérer la qualité du produit final. Voici une illustration des matières premières utilisées dans la fonderie :



FIGURE 3 – Les retours et les Frite Haut Silicium



FIGURE 4 – Les Fontes d'affinages et les Disques

2. **Fusion** : Après la sélection des métaux, ceux-ci sont fondus dans un four à induction qui atteint des températures suffisamment élevées pour les transformer en métal liquide.
3. **Modélage** : Le modélage est l'une des premières étapes de la production en fonderie. Il consiste à préparer le modèle et le moule nécessaires pour la coulée. La pièce finale est d'abord conçue numériquement à l'aide de logiciels de CAO. Une fois la conception validée, un modèle physique est fabriqué en métal.

Le moule, généralement réalisé en sable mélangé à de l'argile et de l'eau, est compacté autour du modèle. Le sable doit être suffisamment résistant pour supporter le poids du métal fondu sans se désagréger. Après compactage, le modèle est retiré et les

parties du moule sont assemblées. Des conduits de coulée sont ensuite ajoutés pour permettre au métal fondu de remplir la cavité du moule.

4. **Noyautage** : Le noyautage constitue une étape importante dans le processus de fabrication des pièces moulées, notamment pour créer des formes internes complexes ou des cavités spécifiques. Semblables au moule, les noyaux sont souvent réalisés en sable et façonnés à l'aide de boîtes à noyaux qui leur confèrent la géométrie requise. Ces noyaux jouent un rôle déterminant en permettant la formation de canaux et d'autres détails internes indispensables à la pièce finale. Une fois confectionnés, ils sont positionnés avec précision dans le moule, où ils doivent être solidement fixés afin d'éviter tout déplacement pendant la coulée.
5. **Sphéroïdisation** : Cette étape est spécifiquement dédiée aux fontes à graphite sphéroïdal (fonte GS). La sphéroïdisation est un procédé essentiel visant à optimiser les propriétés mécaniques de la fonte, en particulier sa ductilité et sa résistance à la traction. Ce processus repose sur l'ajout de magnésium à la fonte liquide, favorisant ainsi la formation de graphite sous forme sphéroïdale plutôt que lamellaire. L'ajout de magnésium se fait souvent à travers un alliage, tel que le fil fourré. Cette transformation microstructurale, en remplaçant les lamelles de graphite par des sphéroïdes, permet d'améliorer significativement les performances mécaniques et la durabilité de la fonte, la rendant ainsi plus adaptée aux applications exigeantes.
6. **Inoculation et Dégrassement** : L'inoculation garantit une précipitation homogène et fine du graphite, minimisant ainsi les défauts structurels. Cette étape est cruciale pour obtenir une distribution optimale du graphite sphéroïdal, améliorant ainsi les performances mécaniques de la pièce.
Le dégraissage, quant à lui, consiste à éliminer les impuretés superficielles. Cette opération est indispensable pour maintenir la pureté du métal et éviter tout défaut dans les pièces finies, garantissant ainsi une coulée propre et de haute qualité.
7. **Coulée** : La coulée est l'étape où la fonte liquide, préparée et traitée lors des phases précédentes, est soigneusement versée dans le moule à travers un système de conduits conçu pour guider le métal dans toutes les parties de la cavité. Ce processus est crucial, car il détermine la répartition uniforme du métal dans le moule, assurant ainsi une formation correcte et homogène de la pièce.
Une fois le métal versé, il commence à refroidir progressivement, entraînant sa solidification à l'intérieur du moule. Pendant cette phase, le métal adopte la forme précise de la cavité, qui a été façonnée par le modèle et complétée par les noyaux pour former les détails internes complexes. Le contrôle du refroidissement est essentiel, car une solidification trop rapide ou inégale peut entraîner des tensions internes ou des défauts structurels. Ainsi, cette étape marque le point de transition du métal liquide à l'état solide, donnant naissance à la pièce brute.
8. **Décochage et Grenaillage** : Après la solidification complète du métal, le moule est démonté pour extraire la pièce coulée. Cette opération implique souvent la destruction du moule. Les noyaux en sable, utilisés pour créer les cavités internes de la pièce, sont retirés par des procédés mécaniques tels que des vibrations ou des chocs.

Une fois la pièce extraite, elle subit un processus de grenaillage, qui consiste à projeter des billes d'acier ou d'autres matériaux abrasifs à haute vitesse sur sa surface. Cette étape a pour objectif de nettoyer la pièce en éliminant les résidus de sable et autres impuretés qui se sont formées durant la coulée.

9. **Ébarbage et Usinage :** Après le démolage, la pièce brute nécessite encore d'autres opérations de finition. Le processus d'ébarbage consiste à éliminer les bavures, ou les métaux indésirables qui se forment le long des lignes de joint du moule ou au niveau des conduits de coulée.

Une fois ébarbée, la pièce peut passer à l'usinage, une opération plus précise qui vise à atteindre les dimensions désirées. L'usinage permet également d'améliorer la qualité de surface en la rendant plus lisse et conforme aux exigences fonctionnelles de la pièce.

10. **Peinture :** La peinture est appliquée sur la pièce pour assurer à la fois une protection contre la corrosion et un aspect esthétique. Avant l'application de la peinture, la surface de la pièce doit être soigneusement nettoyée et préparée afin de garantir une adhérence optimale du revêtement. Une fois la surface préparée, la peinture est appliquée par pulvérisation, trempage, ou encore au pinceau.
11. **Contrôle qualité et Livraison :** Avant la livraison des pièces finales, un contrôle qualité est effectué pour s'assurer qu'elles répondent aux normes et aux spécifications requises. La composition chimique de la pièce et des tests de traction, de dureté, est analysée pour s'assurer qu'elle correspond aux spécifications du client.

1.4 Objectifs

Ce stage est réalisé dans le cadre d'un projet financé par un crédit d'impôt recherche. Son objectif principal est d'optimiser l'utilisation des matières premières recyclées dans la production de fonte. Plus précisément, le stage vise à développer des méthodes de modélisation puis d'automatiser les processus associés au choix et aux quantités des matières premières utilisées.

Les missions confiées dans ce cadre sont les suivantes :

- **Modélisation du système :** Développer des modèles mathématiques pour représenter le système de gestion des matières premières.
- **Optimisation des coûts :** Contribuer à réduire les coûts de production en automatisant les processus de sélection et de gestion des matières premières.
- **Participer à d'autres problèmes d'optimisation :** Contribuer à d'autres défis liés à l'optimisation des procédés de production de fonte.

1.5 Le plan du rapport

Ce rapport est organisé en plusieurs sections principales. Il débute par un contexte général qui présente la Fonderie de Niederbronn et décrit son processus de production. La

section suivante est dédiée à une étude statistique visant à prédire la qualité des pièces en fonction de leur composition chimique. Ensuite, une partie du rapport est consacrée à la détermination de la recette optimale des matières premières. Cette analyse a pour but d'optimiser la sélection et les proportions des matériaux utilisés dans la production de fonte. Une autre section du rapport examine le processus de sphérodisation, avec pour objectif de réduire les coûts de production associés à cette étape et de garantir son bon fonctionnement. Le rapport se conclut par une synthèse des principaux résultats et enseignements tirés du stage.

2 L'étude statistique

2.1 Contexte et Objectifs

Au sein de la fonderie, deux mesures normatives sont utiliser pour évaluer les propriétés mécaniques de la fonte : la résistance mécanique, exprimée en MPa (mégapascals), et l'allongement, exprimé en pourcentage. La résistance mécanique mesure la capacité de la fonte à résister à une force ou à une contrainte avant de se rompre. Exprimée en mégapascals (MPa), cette valeur indique la force maximale que le matériau peut supporter par unité de surface. Ainsi une résistance mécanique élevée signifie que la pièce en fonte pourra supporter des charges importantes sans se casser. L'allongement est une mesure de la capacité du matériau à se déformer sous tension avant de se rompre. Il est exprimé en pourcentage et indique à quel point la pièce peut s'étirer avant de casser. Un allongement plus élevé signifie que le matériau est plus ductile, c'est-à-dire capable de se déformer sans se briser.

En complément de ces deux mesures normatives, des analyses de la composition chimique de la fonte sont également réalisées. A partir de cette composition chimique, des indicateurs de qualité sont calculer par des combinaisons linéaire de ses éléments chimiques.

Voici les principales formules proposées par différents auteurs pour essayer d'apprecier l'action globale de ces divers éléments soit sur la matrice, soit sur la forme du graphite.

1 L'indice d'impureté I, proposé par S. PARENT-SIMONIN et J.C. MARGERIE, est un indicateur utilisé pour prédire la structure d'une fonte après moulage. Ce modèle tient compte de la classe de la fonte, notamment de sa teneur en silicium, un élément crucial influençant sa solidification.

L'idée principale derrière cet indice est de déterminer la qualité de la fonte après un processus de refusion, c'est-à-dire après que la fonte a été refondue dans des conditions spécifiques.

$$\begin{aligned}\text{Impureté \%} = & 4.9(\text{Cu \%}) + 0.37(\text{Ni \%}) + 0.37(\text{Cr \%}) + 7.9(\text{Mo \%}) + 4.4(\text{Ti \%}) \\ & + 39.0(\text{Sn \%}) + 0.44(\text{Mn \%}) + 5.6(\text{P \%})\end{aligned}$$

2 Dans les fontes à graphite sphéroïdal à l'état brut de coulée, MOTZ et ORTHS proposent une formule de régression donnant le pourcentage de ferrite en fonction de certains éléments présents :

$$\text{Ferrite \%} = 92.3 - 96.2(\text{Mn \%}) - 211(\text{Cu \%}) - 14270(\text{Pb \%}) - 2815(\text{Sb \%})$$

Il apparaît que le plomb et l'antimoine ont une action prépondérante.

3 Pour K. ONO, H. TANIMURA, K. KODAMA et K. SATO, qui ont étudié l'influence des oligo-éléments sur les moulages, la pureté doit être la plus grande possible aussi bien pour assurer de hautes caractéristiques dans la fonte à graphite lamellaire que pour avoir une graphitisation rapide dans la fonte malléable ou bien encore, obtenir une sphéricité parfaite du graphite dans les fontes à graphite sphéroïdal. Pour cela, ils préconisent que :

$$\begin{aligned}\text{Pureté ONO \%} = & \text{ Cu \%} + \text{Ti \%} + \text{Ni \%} + \text{Cr \%} + \text{V \%} + \text{Al \%} + \text{As \%} + \text{Sn \%} \\ & + \text{Pb \%} + \text{Sb \%} + \text{Bi \%}\end{aligned}$$

Toutefois une ferrite trop pure, par exemple dans les fontes malléables, peut conduire à une basse limite d'élasticité.

4 T. THIELEMANN propose de considérer que la fonte à graphite sphéroïdal est pure si l'expression ci-dessous est vérifiée :

$$\begin{aligned}\text{Pureté THIELMANN \%} = & 4.4(\text{Ti \%}) + 2.0(\text{As \%}) + 2.3(\text{Sn \%}) + 5.0(\text{Sb \%}) \\ & + 290(\text{Pb \%}) + 370(\text{Bi \%}) + 1.6(\text{Al \%})\end{aligned}$$

5 H. MAYER maintient la relation

$$\text{Pureté MAYER \%} = \text{Ti \%} + \text{Pb \%} + \text{Bi \%} + \text{Sb \%}$$

pour que le graphite soit sphéroïdal dans les pièces d'épaisseur supérieure à 100 mm.

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer la pertinence de ces cinq indicateurs de qualité par rapport aux deux mesures normatives, et d'identifier les meilleurs indicateurs pour prédire les performances mécaniques de la fonte. Une fois les meilleurs indicateurs sélectionnés, nous déterminerons leurs intervalles de prédiction, ce qui permettra d'anticiper les performances de la fonte en fonction de sa composition chimique.

2.2 Les données

Les données utilisées dans cette étude proviennent de deux instruments de mesure principaux. La résistance mécanique et l'allongement des échantillons de fonte sont mesurés à l'aide d'une machine de traction. Cette machine permet de déterminer la capacité du matériau à supporter des forces et sa ductilité sous contrainte. En parallèle, la composition chimique des échantillons est analysée à l'aide d'un spectromètre. Cet appareil fournit des informations détaillées sur la concentration des différents éléments chimiques présents

dans la fonte. Les données utilisées sont ensuite exportées sous forme de fichiers Excel, à partir du logiciel Windev. Les données peuvent être regroupées en plusieurs catégories : les variables quantitatives, les indicateurs de qualité, les variables qualitatives, et les éléments chimiques, pour un total de 38 caractéristiques.

Les variables quantitatives :

- Rm : Résistance mécanique à la traction.
- Rp0.2 : Limite d'élasticité à 0,2% de déformation.
- A% : Allongement à la rupture en pourcentage.
- Contre-essai A% : Contre-essai de l'allongement à la rupture en pourcentage.
- Moyenne allongement : Moyenne de l'allongement à la rupture en pourcentage.

Les indicateurs :

- Impureté : Pourcentage d'impureté dans l'échantillon.
- % Ferrite : Pourcentage de ferrite dans l'échantillon.
- ONO, TANIMURA, ... : Un indicateur de qualité en pourcentage.
- THIELMANN : Un indicateur de qualité en pourcentage.

Les variables qualitatives :

- Recette : Nom ou code de la recette associée à l'échantillon.
- Date : Date à laquelle la coulée a été effectuée.
- Poche/Four/Barreau : Indication sur la provenance de l'échantillon (poche, four, barreau, etc.).
- Conforme ? : Indique si l'échantillon est conforme (1) ou non conforme (0) aux critères définis.
- Pièces : Référence des pièces.
- Observations : Commentaires ou observations sur l'échantillon.
- Comment. RQ : Commentaires ou remarques supplémentaires.

Les éléments chimiques :

- C, Si, Mn, P, Cr, Mo, Cu, Sn, Mg, Ce, Ca, Al
- Zn, Ti, S, Sn, V, Pb, Al, Bi, B, Te, Sb, As, Ti

Selon la littérature, on classe les éléments chimiques en plusieurs catégories :

- **Les éléments d'alliage** : C, Si, Mn, P, Cr, Mo, Cu, Sn
- **Les éléments de traitement** : Mg, Ce, Ca, Al

— **Les éléments polluants : Zn, Ti, S, Sn, V**

— **Les éléments poisons : Pb, Al, Bi, B, Te, Sb, As, Ti**

En 2024, 209 données ont été collectées, et 308 en 2023, pour un total de 517 données. La fonderie produit quatre nuances de fontes GS : GS 600-3, GS 450-10, GS 500-7, et GS 400-15. Les données collectées se répartissent ainsi : 10 pour la GS 400-15, 92 pour la GS 450-10, 29 pour la GS 500-7, et 45 pour la GS 600-3. En raison du nombre limité de données disponibles pour certaines nuances, l'étude statistique se concentrera exclusivement sur la GS 450-10.

La Figure ci-dessous 5 illustre l'état initial des données avant tout processus de nettoyage ou d'analyse.

Recette	Date	Poche/Four/ Barreau	Conforme ?	Rm	Rp0.2	A%	Contre-essai A%	Moyenne allongement	Pièces	Observations
GS 450-10	04/09/2023	247NF03	1	548	331	12,4	12,6	12,5		
GS 450-10	04/09/2023	247NF02	1	550	325	14,6	14,8	14,7	YAN026	
GS 450-10	07/09/2023	250NF06 -1	1	555	394	9,7	10	9,8	YAN026	Conforme

Comment. RQ	Impureté	% Ferrite	ONO, TANIMURA, ...	THIELMANN	PJ	C	Si	Mn	Cu	Cr	P
	1,42	17,62	0,16	1,27	0	3,704	2,574	0,207	0,057	0,042	0,032
	1,43	19,99	0,17	1,27	0	3,517	2,67	0,2	0,059	0,044	0,033
	1,64	15,15	0,18	1,29	0	3,316	2,999	0,233	0,051	0,042	0,025

Ni	Mo	Sn	Sb	Ca	Ba	Al	S	Mg	Pb	Ti	As	Bi	V
0,013	0,001	0,023	0,005			0,011	0,011	0,043	0,002	0,01	0,005	0,001	0,002
0,014	0,001	0,024	0,005			0,01	0,012	0,044	0,002	0,011	0,006	0,001	0,002
0,014	0,002	0,016	0,005			0,014	0,003	0,036	0,002	0,013	0,001	0,001	0,002

FIGURE 5 – Visualisation des données brutes

Avant d'utiliser les données pour l'analyse, plusieurs étapes de prétraitement ont été réalisées pour garantir leur qualité et leur pertinence. Voici les principales opérations effectuées :

— **Nettoyage des données :**

- Suppression des colonnes non pertinentes : Date, Rp0.2, A%, Contre-essai A%, Pièces, Observations, Comment. RQ, PJ, Ca, Ba.
- Élimination des lignes incomplètes contenant des valeurs manquantes.

— **Ajout d'indicateurs :**

- Introduction de l'indicateur de Pureté MAYER pour enrichir les données disponibles.

— **Mise en forme des données :**

- Renommage des colonnes pour une meilleure clarté et compréhension.
- Segmentation des données en fonction du type de recette pour une analyse plus ciblée.
- Classification des données selon la conformité de l'échantillon afin de faciliter les comparaisons.

Recette	Numéro de four	Conforme ?	Rm [MPa]	Moyenne allongement [%]	Impureté [%]	Ferrite [%]	Purete ONO [%]	Purete THIELMANN [%]	Purete MAYER [%]	Purete C [%]						
GS 450-10	247NF03	1	548	12,5	1,52	17,74	0,17	1,1	0,018	3,704						
GS 450-10	247NF02	1	550	14,7	1,58	18	0,18	1,11	0,019	3,517						
GS 450-10	250NF06 -1	1	555	9,8	1,21	16,51	0,16	1,09	0,021	3,316						
Si [%]	Mn [%]	Cu [%]	Cr [%]	P [%]	Ni [%]	Mo [%]	Sn [%]	Sb [%]	Al [%]	S [%]	Mg [%]	Pb [%]	Ti [%]	As [%]	Bi [%]	V [%]
2,574	0,207	0,057	0,042	0,032	0,013	0,001	0,023	0,005	0,011	0,011	0,043	0,002	0,01	0,005	0,001	0,002
2,67	0,2	0,059	0,044	0,033	0,014	0,001	0,024	0,005	0,01	0,012	0,044	0,002	0,011	0,006	0,001	0,002
2,999	0,233	0,051	0,042	0,025	0,014	0,002	0,016	0,005	0,014	0,003	0,036	0,002	0,013	0,001	0,001	0,002

FIGURE 6 – Visualisation des données nettoyées

2.3 Les indicateurs

À présent, nous allons évaluer la pertinence des cinq indicateurs de qualité à la vue des deux mesures normatives, à savoir l'allongement et la résistance mécanique. Pour ce faire, nous utilisons le coefficient de corrélation de Pearson, un outil statistique permettant de mesurer la force et la direction de la relation linéaire entre deux variables quantitatives.

Le coefficient de corrélation de Pearson (r), se calcule à partir des covariances des deux variables et des écarts-types respectifs. Il est défini par la formule suivante :

$$r = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{\sigma_X \sigma_Y}$$

où :

- $\text{Cov}(X, Y)$ est la covariance des variables X et Y ,
- σ_X et σ_Y sont les écarts-types des variables X et Y .

Le coefficient r prend des valeurs comprises entre -1 et 1 :

- Un coefficient proche de 1 indique une forte corrélation positive, c'est-à-dire que lorsque la valeur de l'une des variables augmente, celle de l'autre augmente également de manière proportionnelle.

- Un coefficient proche de -1 indique une forte corrélation négative, signifiant qu'une augmentation de la première variable entraîne une diminution proportionnelle de la seconde.
- Un coefficient proche de 0 suggère une absence de corrélation linéaire entre les deux variables, indiquant que les variations de l'une ne sont pas prévisibles à partir des variations de l'autre.

Après le calcul des coefficients de corrélation de Pearson, l'objectif est de classer ces indicateurs. Pour effectuer ce classement, nous utilisons la formule suivante pour établir un score global pour chaque indicateur :

$$\text{Score} = \frac{|\text{Corrélation avec Rm}| + |\text{Corrélation avec l'Allongement}|}{2}$$

Une fois ce classement établi, nous conservons uniquement les indicateurs présentant la dépendance linéaire la plus forte avec les deux mesures normatives.

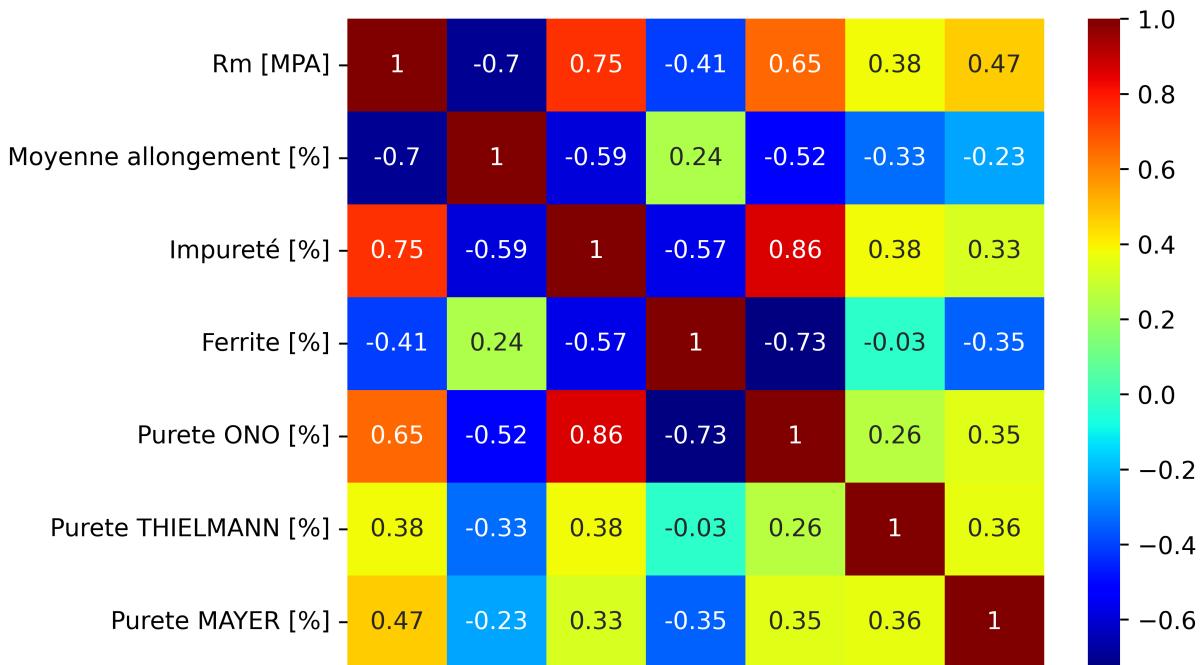


FIGURE 7 – Corrélation entre les indicateurs et les mesures normatives

Classement des indicateurs :

- Impureté [%] : 0.673506
- Pureté ONO [%] : 0.583101
- Pureté THIELMANN [%] : 0.353988

- Pureté MAYER [%] : 0.346637
- Ferrite [%] : 0.327601

L'analyse des corrélations a révélé plusieurs relations importantes. Une corrélation positive modérée de 0,65 a été observée entre la résistance à la traction Rm et l'alignement moyen, indiquant qu'une meilleure résistance est associée à une organisation plus homogène des matériaux. De même, une corrélation positive de 0,62 entre Rm et la pureté ONO suggère que la pureté chimique améliore la résistance mécanique.

En outre, une très forte corrélation positive de 0,86 a été trouvée entre l'alignement moyen et la teneur en ferrite, ce qui indique des mécanismes communs influençant ces deux variables. Cependant, une corrélation négative modérée de -0,41 a été identifiée entre Rm et la ferrite, suggérant que des niveaux plus élevés de ferrite diminuent la résistance mécanique. Enfin, une corrélation négative de -0,52 entre Rm et la pureté THIELMANN montre qu'une pureté plus élevée est liée à une réduction de la résistance à la traction. En ce qui concerne les scores, l'impureté et la pureté obtiennent les meilleurs résultats, avec des scores de 0,67 et 0,5 respectivement, et sont donc retenues pour la suite de l'analyse.

2.4 Les éléments chimiques

La figure ci-dessous illustre la matrice de corrélation entre l'impureté et les éléments chimiques. Cette analyse permet d'identifier les variables les plus influentes et d'évaluer leur impact réel sur la résistance mécanique et l'allongement des matériaux.

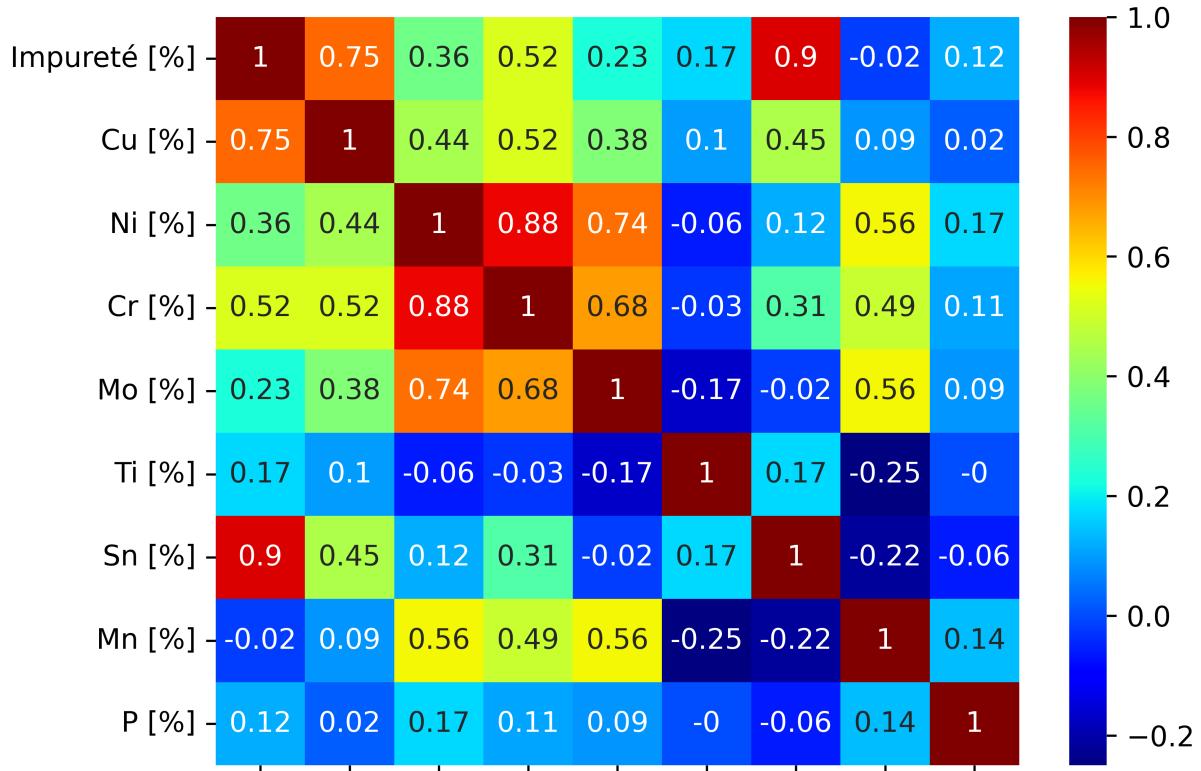


FIGURE 8 – Corrélation entre l’impureté et les éléments chimiques

Il existe une forte corrélation positive entre le cuivre (Cu) et l’impureté, avec un coefficient de corrélation de 0,75, ainsi qu’entre l’étain (Sn) et l’impureté, avec une corrélation de 0,9. Par ailleurs, les impuretés présentent une corrélation modérée avec le nickel (Ni) (0,36) et le chrome (Cr) (0,52), suggérant également une relation positive avec ces éléments. En revanche, les corrélations avec les autres éléments chimiques sont faibles et donc peu significatives.

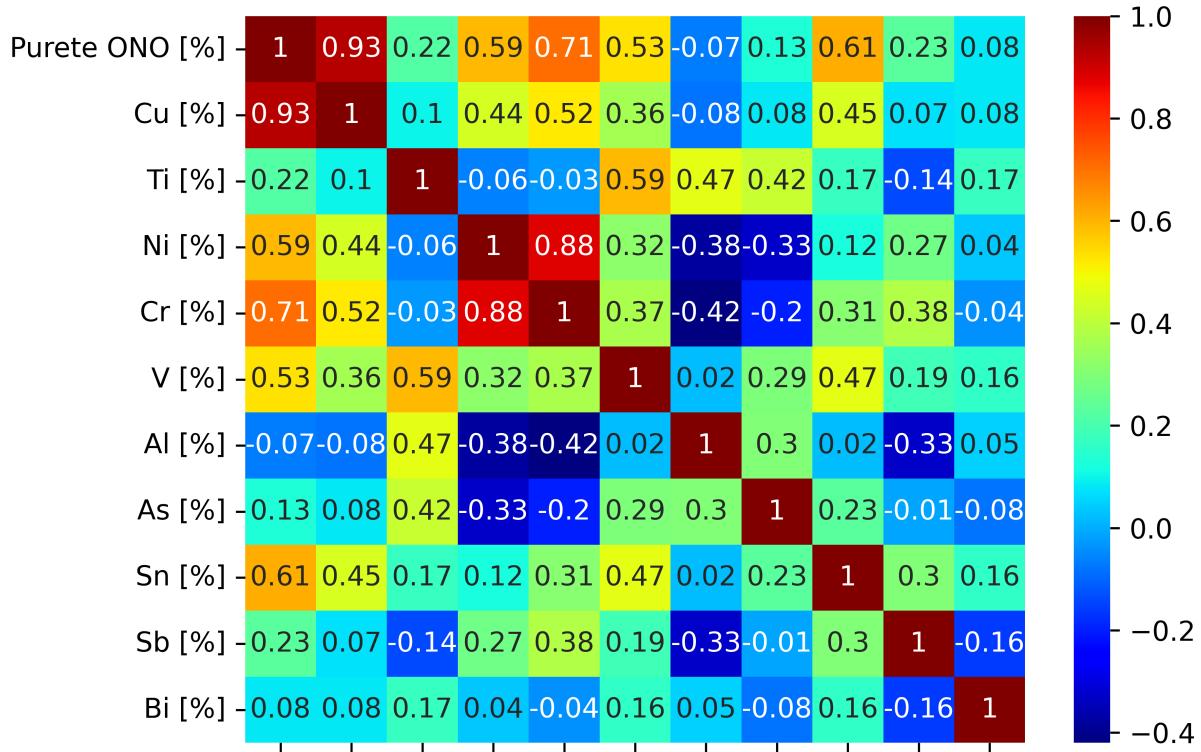


FIGURE 9 – Corrélation entre la pureté ONO et les éléments chimiques

La pureté ONO [%] présente une forte corrélation positive avec le cuivre (Cu [%], 0.93) et le titane (Ti [%], 0.92), suggérant leur impact majeur sur cette pureté. Des corrélations modérées existent avec le nickel (Ni [%], 0.59) et le chrome (Cr [%], 0.53). En revanche, des éléments comme le stibium (Sb [%]), le bismuth (Bi [%]), et l'aluminium (Al [%]) montrent des corrélations faibles ou négligeables, indiquant un impact limité sur la pureté ONO.

2.5 Les valeurs extrêmes

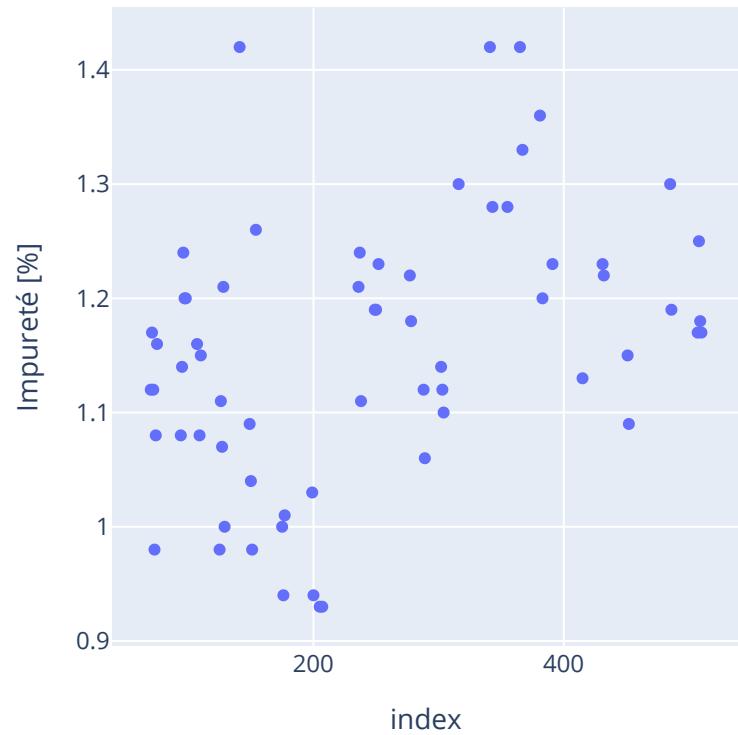
Avant de procéder à la prédiction de la résistance mécanique et de l'allongement de la fonte à partir des mesures d'impureté et de pureté ONO, nous éliminons les valeurs extrêmes. Cette étape permet de réduire la variabilité des données et d'améliorer la fiabilité de notre modèle de régression linéaire.

Une valeur est considérée comme extrême si elle se situe en dehors de l'intervalle défini par $[\bar{x} - 1.5(Q_3 - Q_1), \bar{x} + 1.5(Q_3 - Q_1)]$, où Q_1 et Q_3 , le premier et le troisième quartile de la distribution des données, et \bar{x} la moyenne des données.

La suppression des valeurs extrêmes est effectuée de manière itérative jusqu'à ce qu'il n'en reste plus dans l'ensemble de données.

Les graphiques suivants illustrent l'effet de ce traitement sur les deux principaux indicateurs : l'impureté et la pureté ONO.

Impureté [%] sans ses valeurs extrêmes



Impureté [%] avec ses valeurs extrêmes

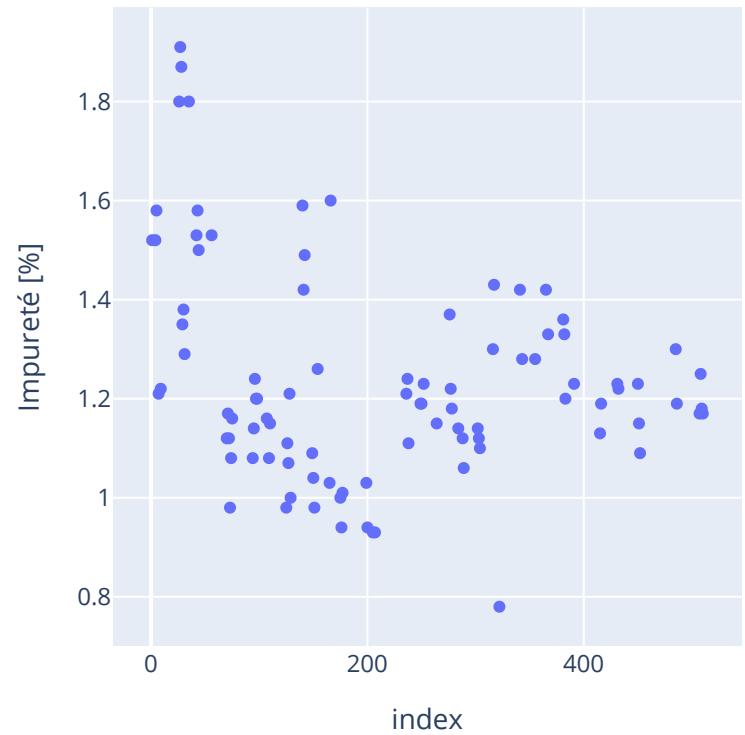
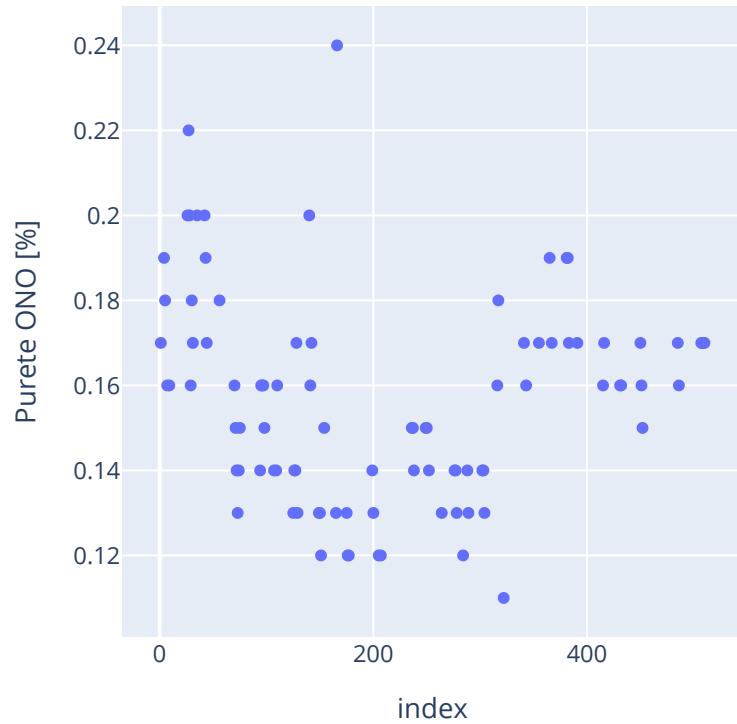


FIGURE 10 – L’impureté avant et après le traitement des valeurs extrêmes.

Purete ONO [%] avec ses valeurs extrêmes



Purete ONO [%] sans ses valeurs extrêmes

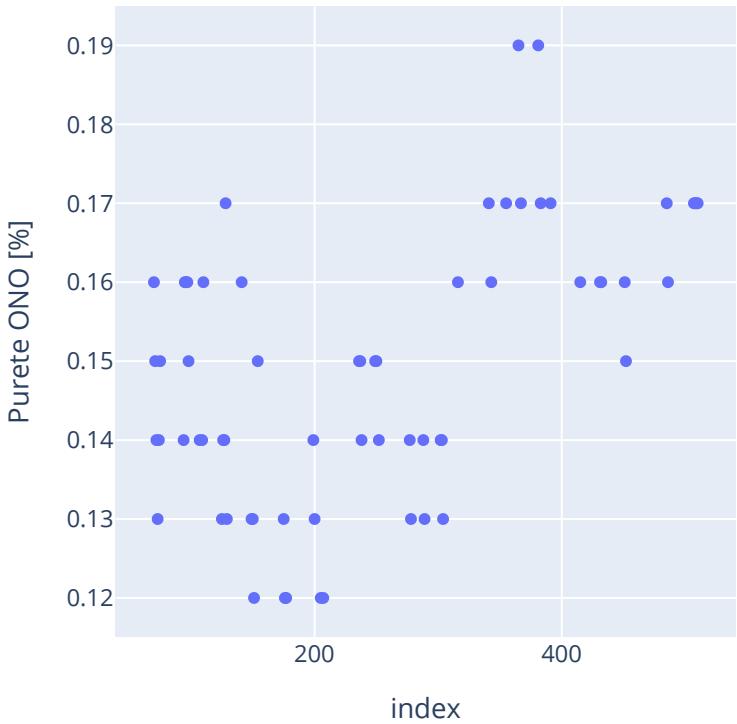


FIGURE 11 – La pureté ONO avant et après le traitement des valeurs extrêmes.

Les figures 10 et 11 montrent la réduction de la dispersion des données après l'élimination des valeurs extrêmes. Ce traitement rend les distributions un peu plus compactes : pour l'impureté, la plage de valeurs passe de 0,78-1,91 à 0,93-1,42, tandis que pour la pureté ONO, elle se resserre de 0,11-0,24 à 0,12-0,19.

Au total, 28 données ont été supprimées, laissant un ensemble de 64 données. Bien que ce nettoyage améliore la qualité des données, les points restants montrent encore une certaine dispersion.

2.6 Régression Linéaire

Dans cette section, nous réalisons une régression linéaire pour analyser les relations entre certains éléments chimiques et les indicateurs pertinents, tels que l'impureté et la pureté ONO. L'objectif est de comprendre comment ces variables influencent les 2 indicateurs ainsi que les 2 mesures normatives Resistance mecanique et l'allongement, et de calculer les intervalles de confiance et puis l'intervale de prédiction pour les valeurs prédictes.

La formule utilisée pour calculer les intervalles de prédition est la suivante :

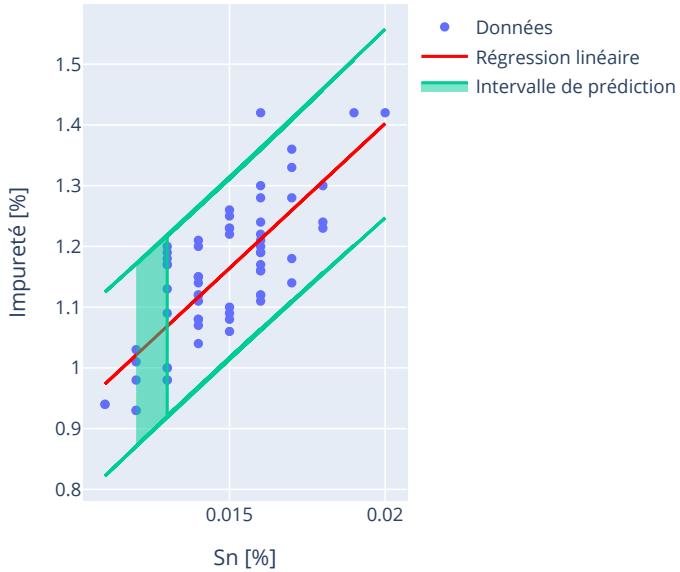
$$IP(y_{\text{pred}}) = [y_{\text{pred}} - n \cdot \text{predict_se}, y_{\text{pred}} + n \cdot \text{predict_se}]$$

où :

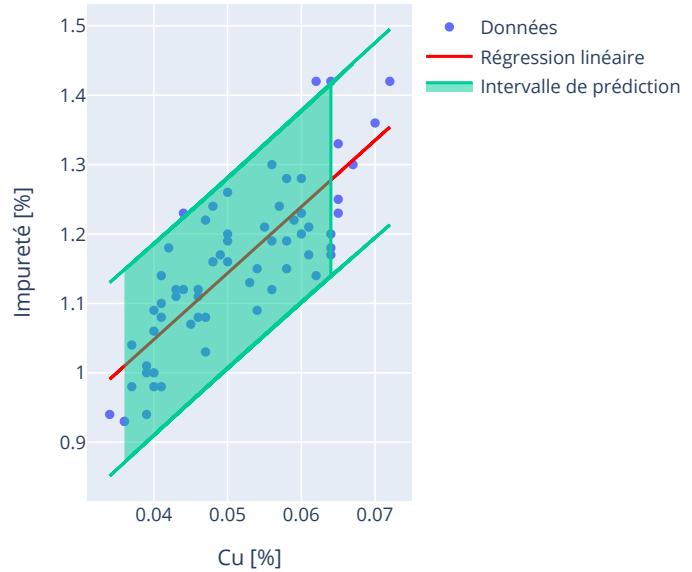
- y_{pred} est la valeur prédite par le modèle de régression linéaire.
- predict_se est l'écart-type associé à la prédition.
- n est un entier naturel qui détermine la largeur de l'intervalle de prédition.

Les figures suivantes illustrent les résultats de la régression linéaire entre l'impureté et les éléments chimiques Sn et Cu, ainsi qu'entre la pureté ONO et les éléments Cr et Cu. Ces graphiques permettent de visualiser l'évolution des valeurs prédites pour l'impureté et la pureté ONO en fonction des concentrations de certains éléments chimiques, ainsi que les intervalles de prédition associés.

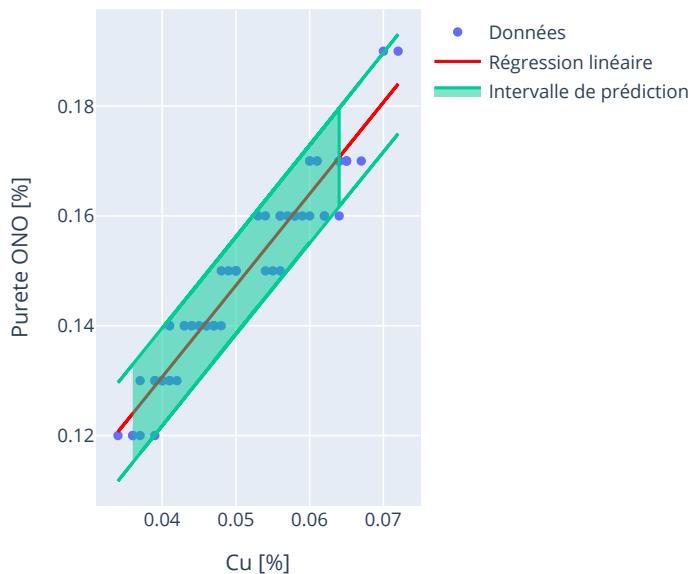
L'évolution de l'Impureté [%] en fonction de Sn [%]



L'évolution de l'Impureté [%] en fonction de Cu [%]



L'évolution de la Pureté ONO [%] en fonction de Cu [%]



L'évolution de la Pureté ONO [%] en fonction de Cr [%]

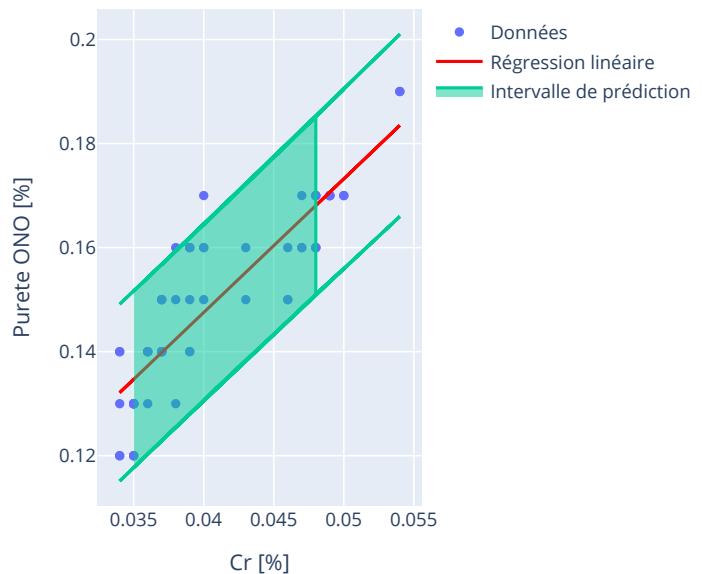
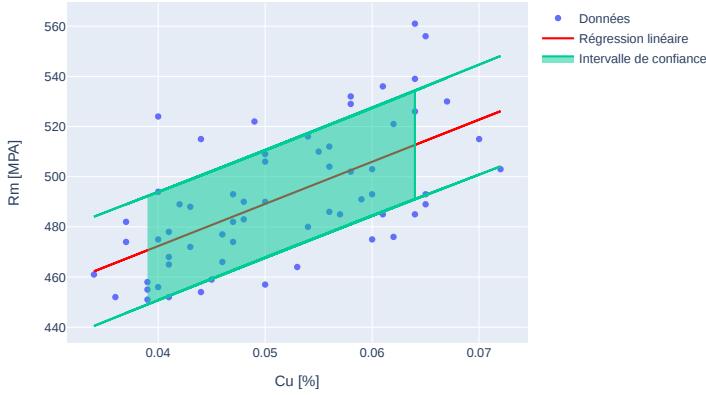
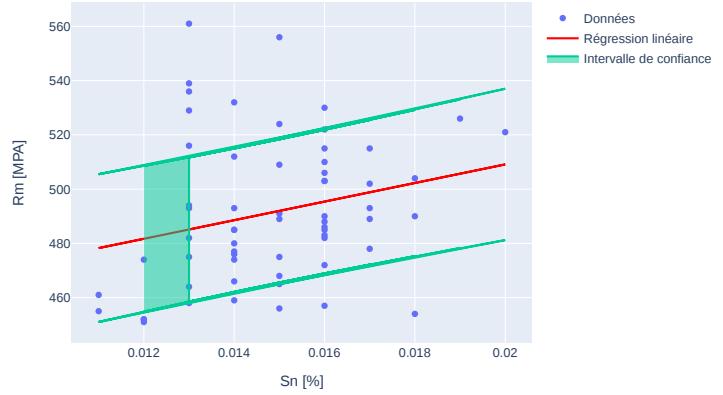


FIGURE 12 – Régression linéaire et intervalle de prédiction de l'impureté et de la pureté ONO en fonction de divers éléments chimiques.

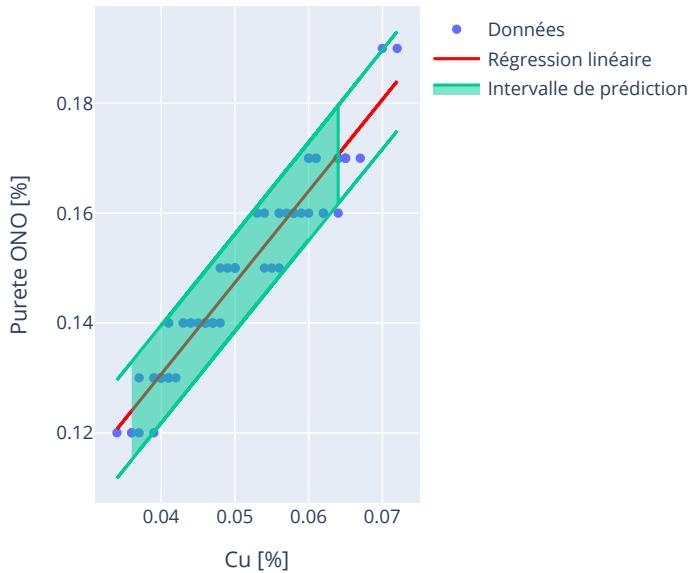
Régression linéaire avec intervalle de confiance



Régression linéaire avec intervalle de confiance



L'évolution de la Pureté ONO [%] en fonction de Cu [%]



L'évolution de la Pureté ONO [%] en fonction de Cr [%]

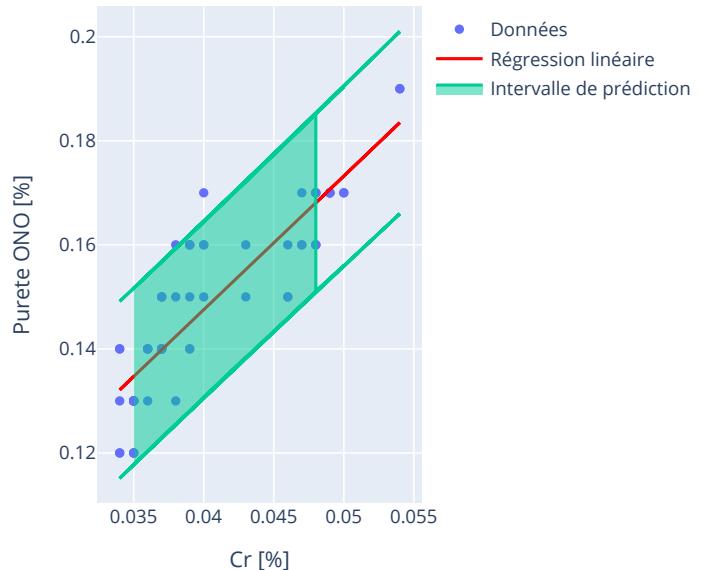


FIGURE 13 – Régression linéaire et intervalle de prédition de l'impureté et de la pureté ONO en fonction de divers éléments chimiques.

2.7 Conclusion

Nous constatons une corrélation linéaire entre le cuivre et la résistance mécanique, ainsi qu'entre le cuivre et l'allongement. En revanche, pour les autres éléments, la linéarité n'est

pas évidente.

Intervalles de confiance des indicateurs :

- Impureté : [1.13, 1.19]
- Pureté ONO : [0.145, 0.153]

Intervalles de confiance des éléments chimiques :

- Sn (Étain) : [0.0143, 0.0153]
- Cu (Cuivre) : [0.0488, 0.0538]
- Cr (Chrome) : [0.0392, 0.0422]
- V (Vanadium) : [0.00092, 0.00111]

3 La recette Optimale

3.1 Présentation du problème

Dans le cadre du processus de fabrication de 5 tonnes de fontes, l'une des étapes préliminaires fondamentales réside dans la détermination du lit de fusion, c'est-à-dire la proportion des matières premières nécessaires à la fusion. Dans notre cas, on souhaite produire 5 tonnes de fonte de haute qualité.

Pour ce faire, nous disposons d'une trentaine de matières premières, chacune possédant sa propre composition chimique distinctive. Chaque matière première est disponible ou non en quantité limitée et leurs prix varient tout au long de l'année. Ces matières sont issues de diverses sources, comprenant des matériaux métalliques et de construction, ainsi que des retours, c'est-à-dire des résidus provenant des précédents cycles de production.

Par exemple, parmi ces matériaux, on trouve les sabots de freins SNCF, les rails de chemin de fer de 40 cm et de la fonte GS recyclée, dont les prix respectifs sont de 435 euros, 423,90 euros et 374 euros.

La qualité de la fonte dépend de sa composition chimique, qui doit se situer dans des intervalles spécifiques adaptés au type de fonte recherché, tout en respectant des critères de qualité tels que le niveau d'impuretés et la pureté ONO. Le niveau d'impuretés et la pureté ONO sont déterminés par des combinaisons linéaires des pourcentages d'éléments chimiques présents dans les matières premières.

Par conséquent, l'objectif principal est de déterminer les proportions optimales des matières premières, en vue de minimiser les coûts de production tout en préservant la qualité de la fonte.

3.2 Modélisation du problème

Pour modéliser ce problème de manière optimale, nous avons proposer deux formulation du problème. Dans la première formulation, on cherche à résoudre le problème suivante :

$$\min_{\mathbf{x}} \mathbf{C} \cdot \mathbf{x}$$

sous les contraintes :

$$\begin{cases} \mathbf{A}_{eq} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{b}_{eq} & (\text{Contraintes d'égalité}) \\ \mathbf{A}_{ub} \cdot \mathbf{x} \leq \mathbf{b}_{ub} & (\text{Contraintes d'inégalité}) \end{cases}$$

Variables et Paramètres

- $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^m$: Vecteur représentant les coûts des matières premières. Chaque élément \mathbf{C}_i du vecteur correspond au coût de la matière première i .
- $\mathbf{x} \in [0, 1]^m$: Vecteur représentant les proportions des matières premières utilisées dans la recette. Sa dimension est m , correspondant au nombre total de matières premières disponibles. Chaque élément \mathbf{x}_i du vecteur représente la proportion de la matière première i utilisée dans la recette.
- $\mathbf{A}_{eq} \in \mathbb{R}^{k \times m}$: Matrice des contraintes d'égalité, où k représente le nombre de contraintes d'égalité. Cette matrice sert à imposer les contraintes liées à la composition chimique, aux deux indicateurs de qualité (la pureté Ono et l'impureté), ainsi qu'aux proportions des matières premières souhaitées.
- $\mathbf{b}_{eq} \in \mathbb{R}^k$: Vecteur des termes constants associés aux contraintes d'égalité.
- $\mathbf{A}_{ub} \in \mathbb{R}^{r \times m}$: Matrice des contraintes d'inégalité. Elle inclut les contraintes sur les limites supérieures et inférieures des proportions de certains éléments chimiques et sur les deux indicateurs de qualité la pureté Ono et l'immpureté.
- $\mathbf{b}_{ub} \in \mathbb{R}^r$: Vecteur des termes constants associés aux contraintes d'inégalité.

Explications supplémentaires

Pour imposer des contraintes de qualité, telles que la pureté Ono, l'impureté, ainsi que des contraintes spécifiques sur les éléments chimiques, nous effectuons les calculs suivants : $\mathbf{O} \cdot \mathbf{A}$ pour la pureté Ono, $\mathbf{I} \cdot \mathbf{A}$ pour l'impureté, et $\mathbf{E} \cdot \mathbf{A}$ pour les contraintes sur un élément chimique particulier. Ici, $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times m}$ représente une matrice contenant les pourcentages des n éléments chimiques présents dans les m matières premières disponibles. Chaque élément a_{ij} $i \in 0, \dots, n$ correspond au pourcentage d'un élément chimique dans la matière première $j \in 0, \dots, m$. Les vecteurs \mathbf{I} et $\mathbf{O} \in \mathbb{R}^{1 \times n}$ contiennent les coefficients associés aux formules de l'impureté et de la pureté Ono, respectivement. Le vecteur $\mathbf{E} \in \mathbb{R}^{1 \times n}$ est principalement composé de zéros, sauf à la position correspondant à l'élément chimique ciblé, où il prend la valeur 1.

En fonction du type de contrainte, le vecteur résultant est ajouté à \mathbf{A}_{ub} pour les contraintes d'inégalité, ou à \mathbf{A}_{eq} pour les contraintes d'égalité.

De plus, pour garantir que la somme des proportions des matières premières $\sum x_i$ soit égale à 1, nous fixons tous les éléments de la dernière ligne de \mathbf{A}_{eq} à 1, et définissons également la dernière valeur de \mathbf{b}_{eq} à 1.

Enfin, les contraintes d'inégalité inférieure sont transformées en contraintes de limite supérieure en multipliant par -1 l'inégalité concernée.

On veut résoudre :

$$\min_x C \cdot x - \sum s_i$$

sous les contraintes :

$$\begin{cases} A_{eq}x = b_{eq} \\ A_{ub}x + s = b_{ub} \end{cases}$$

où :

- $x \in [0, 1]^m$, les proportions de la matière première et $s_i \geq 0$.
- m : nombre de matières premières
- n : nombre d'éléments chimiques
- r : nombre de contraintes
- $A_{ub}, A_{eq} \in \mathbb{R}^{n \times r}$: matrices des contraintes
- $b_{ub}, b_{eq} \in \mathbb{R}^{n \times r}$: vecteurs des contraintes

Nous avons utilisé l'algorithme du simplex de linprog sur python car il nous fournit les meilleurs résultats à présent regardons de près ce algorithme.

3.3 L'algorithme du simplexe

L'algorithme du simplexe, développé par George Dantzig en 1947, est une méthode itérative de résolution des problèmes d'optimisation linéaire. Ces problèmes consistent à maximiser ou minimiser une fonction linéaire sous contraintes linéaires. À partir des formulations mathématiques proposées, l'algorithme du simplexe est capable de résoudre efficacement le problème de détermination du lit de fusion.

L'algorithme du simplexe peut également être utilisé pour résoudre un problème d'optimisation linéaire de minimisation. Le problème prend alors la forme suivante :

$$\text{Minimiser } \mathbf{c}^\top \mathbf{x} \quad \text{sous les contraintes } A\mathbf{x} \geq \mathbf{b}, \quad \mathbf{x} \geq 0$$

où :

- $\mathbf{c} \in \mathbb{R}^n$ est le vecteur des coefficients de la fonction objective,
- $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$ est la matrice des contraintes,
- $\mathbf{b} \in \mathbb{R}^m$ est le vecteur des termes constants dans les contraintes,
- $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^n$ est le vecteur des variables décisionnelles.

Le problème est d'abord mis sous forme canonique, c'est-à-dire que toutes les contraintes sont exprimées sous forme d'égalités. Cela est réalisé en ajoutant des variables d'écart aux inégalités. Le problème canonique devient alors :

$$\text{Minimiser } \mathbf{c}^\top \mathbf{x} \quad \text{sous les contraintes } A\mathbf{x} - \mathbf{s} = \mathbf{b}, \quad \mathbf{x}, \mathbf{s} \geq 0$$

où $\mathbf{s} \in \mathbb{R}^m$ est le vecteur des variables d'excès.

1. Calcul des variables de base réalisables :

- L'algorithme du simplexe sépare la matrice A en deux sous-matrices :

- A_B : Les colonnes associées aux variables de base, formant une matrice carrée inversible.
 - A_H : Les colonnes associées aux variables hors-base.
- On définit l'ensemble des indices $B \subset \{1, \dots, n\}$ pour les variables de base, avec $\text{card}(B) = m$, et H comme son complémentaire pour les variables hors-base.
- Les variables de base X_B sont obtenues en résolvant le système linéaire suivant :

$$X_B = A_B^{-1}b.$$

Pour que la solution soit faisable, il est nécessaire que $X_B \geq 0$, c'est-à-dire que toutes les variables de base soient non négatives.

2. Calcul des coûts réduits :

- Les coûts réduits λ_H mesurent l'impact de l'introduction d'une variable hors-base dans la solution actuelle. Ils sont calculés par $\lambda_H = c_H - c_B A_B^{-1} A_H$, où c_H et c_B sont les coefficients de la fonction objective correspondant aux variables hors-base et de base, respectivement.
- Si tous les coûts réduits sont négatifs ou nuls ($\lambda_H \leq 0$), alors la solution actuelle est optimale, car aucune autre variable ne peut améliorer la fonction objective. Dans ce cas, l'algorithme s'arrête.

3. Choix de la variable entrante :

- Si des coûts réduits sont positifs, cela signifie qu'il est possible d'améliorer la fonction objective. La variable associée au coût réduit le plus élevé est choisie comme variable entrante. Cela correspond à l'indice $e = \arg \max_i \{\lambda_H\}_i$ tel que $\lambda_H > 0$.

4. Choix de la variable sortante :

- Une fois la variable entrante déterminée, il faut choisir une variable de base à remplacer pour conserver la faisabilité de la solution.
- On calcule $z = A_B^{-1} A^e$, qui représente la direction dans laquelle nous allons ajuster la solution en introduisant la nouvelle variable.
- La variable sortante est celle qui atteint sa limite en premier, ce qui est déterminé par l'indice $s = \arg \min_i \left\{ \frac{(X_B)_i}{z_i} \right\}$ tel que $z_i > 0$.

5. Mise à Jour de la Base :

- Après avoir déterminé les variables entrante et sortante, la nouvelle base B^* est formée en remplaçant la colonne A^s par la colonne A^e dans la matrice A_B .
- On recalcule ensuite A_B^{-1} avec cette nouvelle base, et on retourne à l'étape 1 pour poursuivre l'optimisation.

3.4 Implémentation et Résultats

Pour résoudre le problème d'optimisation de la recette de fonte, nous avons recours à des solveurs de programmation linéaire tels que linprog de la bibliothèque SciPy en Python. Le code Python ci-dessous illustre l'approche utilisée pour déterminer la recette optimale :

```
1  def create_optimal_recipe(recette, table_mp, mp_constraints,
2      elmt_quality_constraints, dossier_data):
3      df_mp, df_elmt_and_quality = mp_constraints[recette],
4          elmt_quality_constraints[recette]
5      df_constraints_element, df_constraints_qualite, df_mp_dispo,
6          df_mp_indispo = Separate_data(table_mp, df_mp,
7              df_elmt_and_quality)
8      # Suppression des matières premières indisponibles
9      table_mp = clean_table_mp(table_mp, df_mp_indispo)
10     # Construction de la matrice A et du vecteur C
11     A, C = create_matrix_A_and_C(table_mp, df_mp_dispo)
12     # Initialisation des listes pour les contraintes
13     constraints = {'A^eq': {}, 'b_eq': {}, 'A_sup': {}, 'b_sup': {}}
14     # contraintes concernant les éléments chimiques
15     constraints = format_constraints_elements(df_constraints_element,
16         A, constraints)
17     # contraintes concernant la qualité
18     constraints = format_constraints_qualite(df_constraints_qualite, A
19         , constraints)
20     # contraintes concernant les matières premières disponibles
21     constraints, bounds = format_constraints_MP(df_mp_dispo,
22         constraints)
23     # Résoudre le problème d'optimisation linéaire
24     method = 'simplex'
25     res, erreurs = solve_linear_program(C, constraints, bounds,
26         method)
27     # Gestion du résultat
28     gestion_resultats(erreurs, res, df_mp_dispo, table_mp,
29         constraints, dossier_data, recette)
30
31     return
```

Listing 1 – Extrait de code générant une recette optimale

Chaque nuance de fonte GS possède des spécificités en termes de matières premières utilisées et de contraintes de qualité à respecter. Par exemple, les retours bleus sont exclusivement utilisés pour les nuances GS 450-10 et GS 400-15, tandis que les retours jaunes sont réservés aux deux autres nuances. Les figures ci-dessous présentent les contraintes pour les nuances GS 400-15 et GS 450-10 :

Code Article	Article	C	Si	Mn	Cu	Cr						
10	Retour GL 200	3,400	2,000	0,450	0,160	0,140						
11	Retour GL 250	3,350	1,950	0,650	0,160	0,110						
12	Retour Jaune	3,650	2,620	0,400	0,300	0,090						
13	Retour Bleu	3,650	2,640	0,220	0,060	0,050						
P	Ni	Mo	Sn	Sb	Al	S	Mg	Pb	Ti	As	Bi	V
0,150	0,020	0,020	0,020	0,000	0,010	0,050	0,000	0,000	0,020	0,010	0,000	0,010
0,070	0,060	0,020	0,020	0,000	0,000	0,050	0,000	0,000	0,010	0,010	0,000	0,000
0,050	0,040	0,010	0,020	0,010	0,010	0,010	0,050	0,000	0,010	0,001	0,000	0,010
0,030	0,010	0,010	0,020	0,010	0,010	0,010	0,050	0,000	0,010	0,001	0,000	0,010

FIGURE 14 – Illustration du tableau matières premières

GS 400-15	Composant	Impurité	ONO	C	Si	Mn	Cu	Cr				
	Valeur Min par four	1,100	0.145	3,550	1,900							
	Valeur visée				0,150							
	Valeur Max par four	1,220	0.20	3,650	2,100	0,200	0,100	0,050				
P	Ni	Mo	Sn	Sb	Al	S	Mg	Pb	Ti	As	Bi	V
0,030	0,020	0,010	0,015									

GS 450-10	Composant	Impurité	ONO	C	Si	Mn	Cu	Cr				
	Valeur Min par four	1,100	0.145	3,550	2,100	0,150						
	Valeur visée											
	Valeur Max par four	1,220	0.20	3,650	2,200	0,250	0,070	0,050				
P	Ni	Mo	Sn	Sb	Al	S	Mg	Pb	Ti	As	Bi	V
0,030	0,015	0,006	0,015	0,005	0,018	0,030	0,050	0,030	0,015	0,005	0,002	0,005

FIGURE 15 – Les contraintes qualités de la fonte GS 400-15 et GS 450-10

GS 400-15

Code Article	Article	Price	Available?	Metallic?	Min Share	Share to Consume	Max Share
Code Article	Article	Prix	Disponible ?	Métallique ?	Part Min	Part à consommer	Part Max
10	Retour GL 200	460,00	0	1	0,00		1,00
11	Retour GL 250	460,00	0	1	0,00		1,00
12	Retour Jaune	510,00	0	1	0,00		1,00
13	Retour Bleu	530,00	1	1	0,00		0,35
14	Retour GL200 EMAIL	460,00	0	0	0,00		1,00
15	Retours GL200 CTP	450,00	0	0	0,00		1,00
92655248	ferro silicium 75 en vrac	1 520,00	1	1	0,00		1,00

FIGURE 16 – Les contraintes matières premières

Article	Prix	Proportion	Valeur (/T)	C	Si	Mn	Cu	Cr
13. Retour Bleu	530,00 €	40,00%	212,00 €	3,650	2,640	0,220	0,060	0,050
FDN0609. FONTE D'AFFINAGE	530,00 €	22,00%	116,60 €	4,250	0,763	0,038	0,001	0,019
FDN1204. FRITE HAUT SILICIUM	500,00 €	10,00%	50,00 €	0,100	3,000	0,150	0,125	0,035
FDN0172. Frites Mn	507,00 €	20,00%	101,40 €	0,100	0,016	0,350	0,020	0,032
FDN1089. CARBONE 99.05 5-10MM	954,00 €	1,00%	9,54 €	96,04	0,000	0,000	0,000	0,000
92655248. ferro silicum 75 en vrac	1 520,00 €	0,65%	9,88 €	0,000	71,25	0,000	0,000	0,000
FDN0184. Disque	430,00 €	8,00%	34,40 €	3,500	1,900	0,450	0,200	0,160

Somme 101,65% 533,82 € 3,665 2,142 0,217 0,057 0,047

P	Ni	Mo	Sn	Sb	Al	S	Mg	Pb	Ti	As	Bi	V
0,030	0,010	0,010	0,020	0,010	0,010	0,010	0,050	0,000	0,010	0,001	0,000	0,010
0,027	0,002	0,007	0,001	0,003	0,003	0,014	0,004	0,005	0,011	0,001	0,004	0,000
0,010	0,013	0,001	0,058	0,007	0,036	0,017	0,001	0,002	0,004	0,005	0,002	0,000
0,007	0,010	0,001	0,000	0,007	0,046	0,006	0,001	0,002	0,003	0,003	0,002	0,000
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,040	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,160	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,024	0,008	0,006	0,014	0,007	0,017	0,023	0,021	0,002	0,007	0,002	0,001	0,004

Article	Prix	Proportion	Valeur (/T)	C	Si	Mn	Cu	Cr
FDN0184. Disque	430,00 €	25,00%	107,50 €	3,500	1,900	0,450	0,200	0,160
12. Retour Jaune	510,00 €	25,00%	127,50 €	3,650	2,620	0,400	0,300	0,090
FDN1089. CARBONE 99.05 5-10MM	954,00 €	1,15%	10,97 €	96,04	0,000	0,000	0,000	0,000
FDN0172. Frites Mn	507,00 €	25,00%	126,75 €	0,100	0,016	0,350	0,020	0,032
FDN1204. FRITE HAUT SILICIUM	500,00 €	5,00%	25,00 €	0,100	3,000	0,150	0,125	0,035
92655248. ferro silicum 75 en vrac	1 520,00 €	0,45%	6,84 €	0,000	71,25	0,000	0,000	0,000
13. Retour Bleu	530,00 €	20,00%	106,00 €	3,650	2,640	0,220	0,060	0,050
FDN0263. Cuivre	8 900,00 €	0,14%	12,46 €	0,000	0,000	0,000	100,0	0,000

Somme 101,74% 523,02 € 3,652 2,133 0,351 0,288 0,082

P	Ni	Mo	Sn	Sb	Al	S	Mg	Pb	Ti	As	Bi	V
0,040	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,160	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,050	0,040	0,010	0,020	0,010	0,010	0,010	0,050	0,000	0,010	0,001	0,000	0,010
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,007	0,010	0,001	0,000	0,007	0,046	0,006	0,001	0,002	0,003	0,003	0,002	0,000
0,010	0,013	0,001	0,058	0,007	0,036	0,017	0,001	0,002	0,004	0,005	0,002	0,000
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,030	0,010	0,010	0,020	0,010	0,010	0,010	0,050	0,000	0,010	0,001	0,000	0,010
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,031	0,015	0,005	0,012	0,007	0,018	0,047	0,023	0,001	0,005	0,001	0,001	0,004

Article	Prix	Proportion	Valeur (/T)	C	Si	Mn	Cu	Cr
13. Retour Bleu	530,00 €	40,00%	212,00 €	3,650	2,640	0,220	0,060	0,050
FDN0609. FONTE D'AFFINAGE	530,00 €	22,00%	116,60 €	4,250	0,763	0,038	0,001	0,019
FDN1204. FRITE HAUT SILICIUM	500,00 €	10,00%	50,00 €	0,100	3,000	0,150	0,125	0,035
FDN0172. Frites Mn	507,00 €	20,00%	101,40 €	0,100	0,016	0,350	0,020	0,032
FDN1089. CARBONE 99.05 5-10MM	954,00 €	1,00%	9,54 €	96,04	0,000	0,000	0,000	0,000
92655248. ferro silicum 75 en vrac	1 520,00 €	0,65%	9,88 €	0,000	71,25	0,000	0,000	0,000
FDN0184. Disque	430,00 €	8,00%	34,40 €	3,500	1,900	0,450	0,200	0,160

Somme 101,65% 533,82 € 3,665 2,142 0,217 0,057 0,047

P	Ni	Mo	Sn	Sb	Al	S	Mg	Pb	Ti	As	Bi	V
0,030	0,010	0,010	0,020	0,010	0,010	0,010	0,050	0,000	0,010	0,001	0,000	0,010
0,027	0,002	0,007	0,001	0,003	0,003	0,014	0,004	0,005	0,011	0,001	0,004	0,000
0,010	0,013	0,001	0,058	0,007	0,036	0,017	0,001	0,002	0,004	0,005	0,002	0,000
0,007	0,010	0,001	0,000	0,007	0,046	0,006	0,001	0,002	0,003	0,003	0,002	0,000
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,040	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,160	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,024	0,008	0,006	0,014	0,007	0,017	0,023	0,021	0,002	0,007	0,002	0,001	0,004

Article	Prix	Proportion	Valeur (/T)	C	Si	Mn	Cu	Cr
FDN0184. Disque	430,00 €	25,00%	107,50 €	3,500	1,900	0,450	0,200	0,160
12. Retour Jaune	510,00 €	25,00%	127,50 €	3,650	2,620	0,400	0,300	0,090
FDN1089. CARBONE 99.05 5-10MM	954,00 €	1,15%	10,97 €	96,04	0,000	0,000	0,000	0,000
FDN0172. Frites Mn	507,00 €	25,00%	126,75 €	0,100	0,016	0,350	0,020	0,032
FDN1204. FRITE HAUT SILICIUM	500,00 €	5,00%	25,00 €	0,100	3,000	0,150	0,125	0,035
92655248. ferro silicum 75 en vrac	1 520,00 €	0,45%	6,84 €	0,000	71,25	0,000	0,000	0,000
13. Retour Bleu	530,00 €	20,00%	106,00 €	3,650	2,640	0,220	0,060	0,050
FDN0263. Cuivre	8 900,00 €	0,14%	12,46 €	0,000	0,000	0,000	100,0	0,000

Somme 101,74% 523,02 € 3,652 2,133 0,351 0,288 0,082

P	Ni	Mo	Sn	Sb	Al	S	Mg	Pb	Ti	As	Bi	V
0,040	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,160	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,050	0,040	0,010	0,020	0,010	0,010	0,010	0,050	0,000	0,010	0,001	0,000	0,010
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,007	0,010	0,001	0,000	0,007	0,046	0,006	0,001	0,002	0,003	0,003	0,002	0,000
0,010	0,013	0,001	0,058	0,007	0,036	0,017	0,001	0,002	0,004	0,005	0,002	0,000
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,030	0,010	0,010	0,020	0,010	0,010	0,010	0,050	0,000	0,010	0,001	0,000	0,010
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,031	0,015	0,005	0,012	0,007	0,018	0,047	0,023	0,001	0,005	0,001	0,001	0,004

Article	Prix	Proportion	Valeur (/T)	C	Si	Mn	Cu	Cr
13. Retour Bleu	530,00 €	40,00%	212,00 €	3,650	2,640	0,220	0,060	0,050
FDN0609. FONTE D'AFFINAGE	530,00 €	22,00%	116,60 €	4,250	0,763	0,038	0,001	0,019
FDN1204. FRITE HAUT SILICIUM	500,00 €	10,00%	50,00 €	0,100	3,000	0,150	0,125	0,035
FDN0172. Frites Mn	507,00 €	20,00%	101,40 €	0,100	0,016	0,350	0,020	0,032
FDN1089. CARBONE 99.05 5-10MM	954,00 €	1,00%	9,54 €	96,04	0,000	0,000	0,000	0,000
92655248. ferro silicum 75 en vrac	1 520,00 €	0,65%	9,88 €	0,000	71,25	0,000	0,000	0,000
FDN0184. Disque	430,00 €	8,00%	34,40 €	3,500	1,900	0,450	0,200	0,160

Somme 101,65% 533,82 € 3,665 2,142 0,217 0,057 0,047

P	Ni	Mo	Sn	Sb	Al	S	Mg	Pb	Ti	As	Bi	V
0,030	0,010	0,010	0,020	0,010	0,010	0,010	0,050	0,000	0,010	0,001	0,000	0,010
0,027	0,002	0,007	0,001	0,003	0,003	0,014	0,004	0,005	0,011	0,001	0,004	0,000
0,010	0,013	0,001	0,058	0,007	0,036	0,017	0,001	0,002	0,004	0,005	0,002	0,000
0,007	0,010	0,001	0,000	0,007	0,046	0,006	0,001	0,002	0,003	0,003	0,002	0,000
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,040	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,160	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,024	0,008	0,006	0,014	0,007	0,017	0,023	0,021	0,002	0,007	0,002	0,001	0,004

Article	Prix	Proportion	Valeur (/T)	C	Si	Mn	Cu	Cr
FDN0184. Disque	430,00 €	25,00%	107,50 €	3,500	1,900	0,450	0,200	0,160
12. Retour Jaune	510,00 €	25,00%	127,50 €	3,650	2,620	0,400	0,300	0,090
FDN1089. CARBONE 99.05 5-10MM	954,00 €	1,15%	10,97 €	96,04	0,000	0,000	0,000	0,000
FDN0172. Frites Mn	507,00 €	25,00%	126,75 €	0,100	0,016	0,350	0,020	0,032
FDN1204. FRITE HAUT SILICIUM	500,00 €	5,00%	25,00 €	0,100	3,000	0,150	0,125	0,035
92655248. ferro silicum 75 en vrac	1 520,00 €	0,45%	6,84 €	0,000	71,25	0,000	0,000	0,000
13. Retour Bleu	530,00 €	20,00%	106,00 €	3,650	2,640	0,220	0,060	0,050
FDN0263. Cuivre	8 900,00 €	0,14%	12,46 €	0,000	0,000	0,000	100,0	0,000

Somme 101,74% 523,02 € 3,652 2,133 0,351 0,288 0,082

P	Ni	Mo	Sn	Sb	Al	S	Mg	Pb	Ti	As	Bi	V
0,040	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,160	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,050	0,040	0,010	0,020	0,010	0,010	0,010	0,050	0,000	0,010	0,001	0,000	0,010
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,007	0,010	0,001	0,000	0,007	0,046	0,006	0,001	0,002	0,003	0,003	0,002	0,000
0,010	0,013	0,001	0,058	0,007	0,036	0,017	0,001	0,002	0,004	0,005	0,002	0,000
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,030	0,010	0,010	0,020	0,010	0,010	0,010	0,050	0,000	0,010	0,001	0,000	0,010
0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
0,031	0,015	0,005	0,012	0,007	0,018	0,047	0,023	0,001	0,005	0,001	0,001	0,004

4 Le Traitement au Magnésium de la fonte GS

4.1 Présentation du problème

Cette section est consacrée à l'optimisation de la production de fonte à graphite sphéroïdal (GS) réalisée sur la ligne de moulage DISAMATIC, en particulier au processus de sphéroïdisation. Cette étape critique consiste à introduire du magnésium (Mg) dans la fonte avant la coulée, sous forme d'alliage, à l'aide d'un fil fourré d'un prix de 1,12 € le mètre.

Avant d'ajouter le fil fourré, la fonte doit d'abord être produite. La fonderie dispose de deux fours de fusion d'une capacité de 5 tonnes chacun. La préparation du lit de fusion, qui consiste à charger les matières premières, prend 25 minutes, tandis que la fusion elle-même dure 45 minutes. Il est supposé que la fonte produite par les fours de fusion ne contient pas de magnésium.

Une fois la fonte créée, elle est versée dans des poches pour être transportée. Deux types de poches sont utilisés : la poche de traitement et la poche de coulée, chacune ayant une capacité de 1250 kg de fonte. La fonte est ensuite reçue dans le four de coulée.

Concernant le four de coulée, certaines règles spécifiques doivent être respectées. Ce four, qui a une capacité maximale de 5 tonnes, doit toujours contenir au moins 2500 kg de fonte. Si cette quantité minimale n'est pas respectée, le four pourrait être endommagé. Par conséquent, la production des moules ne commence qu'après l'ajout de la troisième poche de fonte.

Le pourcentage de magnésium dans la fonte doit être maintenu entre $Mg \text{ min} = 0,035\%$ et $Mg \text{ max} = 0,045\%$. Cette contrainte sur la teneur en magnésium est essentielle pour garantir la qualité des pièces finales tout en minimisant le coût du fil fourré.

Le programme de production journalier varie en fonction du type, de la taille et de la quantité des pièces à réaliser. Cela entraîne des fluctuations dans le nombre de mottes à produire, la masse des grappes et le nombre de moules fabriqués par heure.

En général, une perte de magnésium de $eC = 0,0005\%$ par minute est observée dans le four de coulée. En outre, lors du transfert de la fonte entre la cabine de fil fourré et le four de coulée, une perte supplémentaire de $0,001\%$ par minute est estimée. Le traitement au magnésium dure environ 10 minutes, ce qui signifie que la fonte met 10 minutes pour passer du processus de fusion au four de coulée.

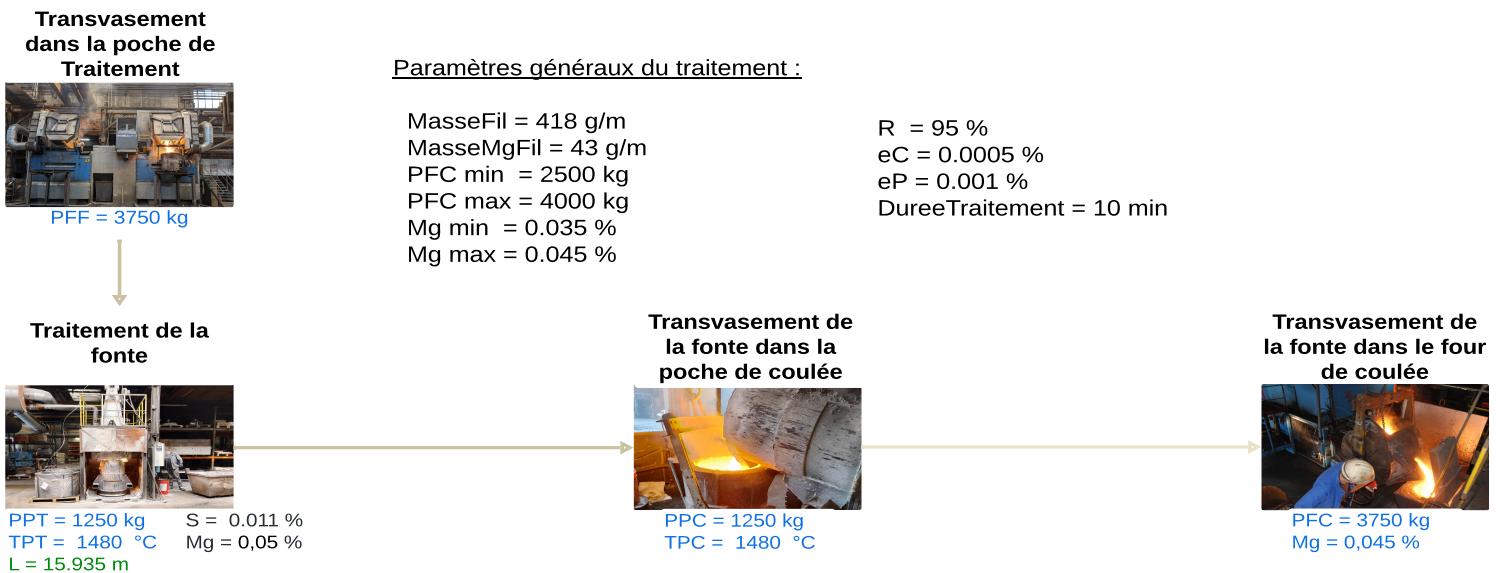
L'objectif principal est de déterminer la longueur de fil fourré à utiliser pour chaque poche de traitement, de manière à ce que le four de coulée atteigne le pourcentage maximal de magnésium fixé à $0,045\%$. Le second objectif est d'optimiser le moment du lancement de la prochaine poche de traitement, en fonction du rythme de production des moules.

Les figures ci-dessous illustrent le processus de traitement de la fonte GS pour les trois premières poches.

Processus de traitement de la poche 1

Paramètres sur la production :

Durée de la fusion des matières premières : 45 min



Processus de traitement de la poche 2

Paramètres sur la production :

Durée de la fusion des matières premières : 45 min

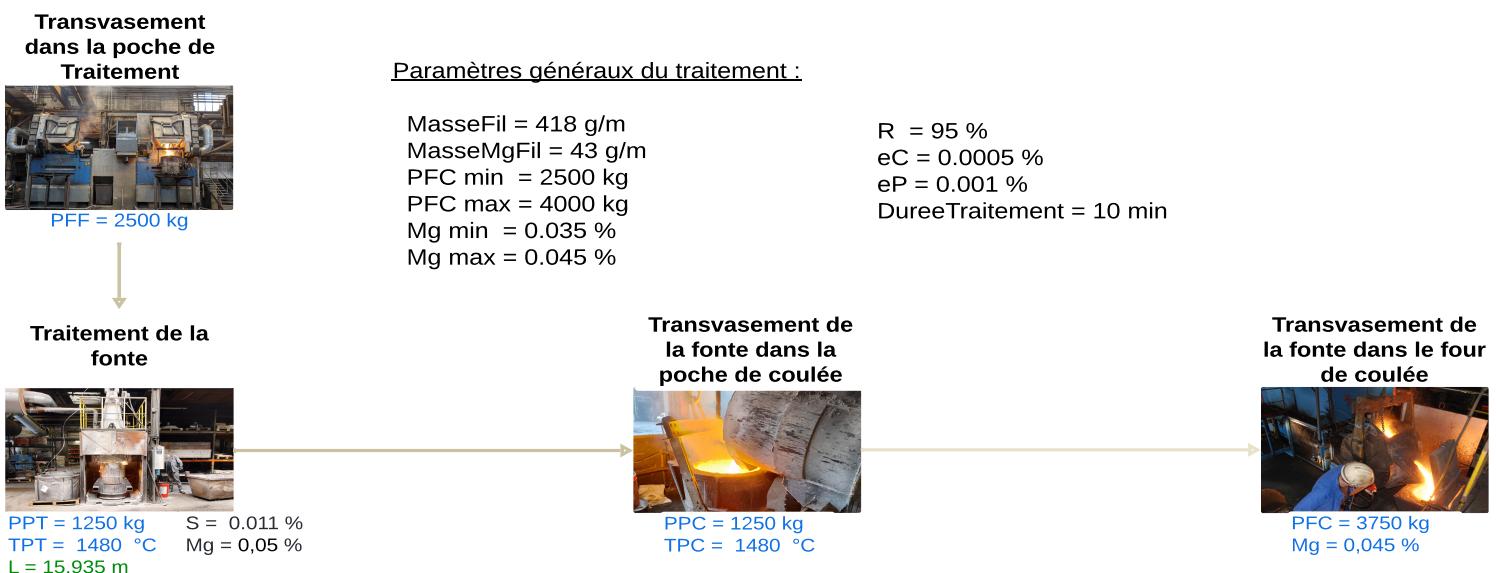


FIGURE 20 – Le Traitement au MG des Poche 1 et Poche 2

Processus de traitement de la poche 3

Paramètres sur la production :

Durée de la fusion des matières premières : 45 min

Transvasement dans la poche de Traitement



PFF = 1250 kg

Traitemen^t de la fonte



PPT = 1250 kg S = 0.011 %
TPT = 1480 °C Mg = 0,05 %
L = 15.935 m

Paramètres généraux du traitement :

MasseFil = 418 g/m
MasseMgFil = 43 g/m
PFC min = 2500 kg
PFC max = 4000 kg
Mg min = 0.035 %
Mg max = 0.045 %

R = 95 %
eC = 0.0005 %
eP = 0.001 %
DureeTraitement = 10 min

Paramètres sur la consommation :

Quantités de mottes à réaliser : 200
Masse des grappes : 35 kg
Nombre de Moules par heure : 160

Transvasement de la fonte dans la poche de coulée



PPC = 1250 kg
TPC = 1480 °C

Transvasement de la fonte dans le four de coulée



PFC = 3750 kg
Mg = 0,045 %

Production de moules



Légende :

PFF : Masse fonte disponible dans le four de Fusion (en Kg).

PPT, PPC : Masse fonte dans la poche de traitement et dans la poche de coulée (en Kg).

TPT, TPC : Température de la fonte dans la poche de traitement et dans la poche de coulée (en °C).

PFC : Masse de la fonte dans le four de coulée au moment du calcul (en Kg).

Mg : Pourcentage de Magnésium dans le four de coulée (en %).

L : Longueur théorique du fil fourré à utiliser (en m).

S : Taux de soufre de la fonte au moment du traitement GS (en %).

Mg : Pourcentage de Magnésium résiduel souhaité dans la poche de traitement (en %).

MasseFil : Masse métrique de fil fourré (en g/m).

MasseMgFil : Masse métrique de magnésium dans le fil fourré (en g/m).

Mg min, Mg max : Pourcentage de Magnésium minimal et maximal dans le four de coulée (en %).

PFC min, PFC max : Masse fonte minimal et maximale dans le four de coulée (en Kg).

R : Rendement en magnésium de l'opération (en %).

eC : Pourcentage de perte de magnésium par minute dans le four de coulée (en %).

eP : Pourcentage de perte de magnésium par minute dans la poche (en %).

DureeTraitement : Durée total du traitement (en minutes).

FIGURE 21 – Le Traitement au MG de la Poche 3

4.2 Implémentation et Résultats

Ce problème peut être divisé en deux phases distinctes :

1. **Régime transitoire** : Cette phase correspond à l'ajout des trois premières poches de fonte dans le four de coulée. L'objectif est d'atteindre un pourcentage de magnésium (Mg) de 0,045 % après l'ajout de la troisième poche. Il s'agit donc de déterminer la longueur de fil fourré à introduire dans chaque poche de traitement pour atteindre cette cible.
2. **Régime établi** : Une fois le régime transitoire terminé, la production des pièces commence. Durant cette phase, il est crucial de déterminer le moment optimal pour lancer le traitement des poches suivantes, tout en calculant la longueur de fil fourré à ajouter à chaque fois pour maintenir la teneur en magnésium dans les limites fixées.

Pour déterminer la quantité d'alliage au magnésium (ou de fil fourré dans notre cas) à introduire dans chaque poche, on utilise la relation empirique suivante :

$$Q = P \cdot \frac{0.76(S - 0.01) + K + t \cdot eP}{\frac{R \cdot Mg}{100}} \cdot \left(\frac{T}{1450} \right)^2$$

Variables et paramètres :

- **Q** : Quantité d'alliage au magnésium à utiliser (en kg)
- **P** : Poids de fonte à traiter (en kg)
- **S** : Taux de soufre de la fonte de base (en %)
- **t** : Temps de séjour prévu pour la fonte après traitement (en minutes)
- **eP** : Pourcentage de perte de magnésium par minute dans la poche (%)
- **T** : Température de la fonte au moment du traitement (en degrés Celsius)
- **R** : Rendement en magnésium de l'opération (en %)
- **Mg** : Taux de magnésium dans l'alliage (en %)
- **K** : Quantité de magnésium résiduel nécessaire pour que le graphite soit sous forme sphéroïdal (en %)

Dans la phase transitoire, l'objectif est de déterminer les paramètres **K₁**, **K₂** et **K₃** afin d'assurer que la teneur en magnésium (Mg) dans le four de coulée respecte les seuils souhaités après l'ajout de la troisième poche. Pour garantir cela, nous imposons la condition suivante :

$$K_{\max} \cdot (P_1 + P_2 + P_3) = K_1 \cdot P_1 - P_1 \cdot 2 \cdot mg_{\text{perdu}} + K_2 \cdot P_2 - P_2 \cdot mg_{\text{perdu}} + K_3 \cdot P_3$$

où : $mg_{\text{perdu}} = \text{DureeTraitement} \times eC$ Les variables P_1 , P_2 , P_3 sont les masses de fonte des trois poches, et $K_{\max} = 0.045$

Pour utiliser la même longueur de fil fourré dans chaque poche, on ajoute les conditions supplémentaires : $Q_1 = Q_2$ et $Q_1 = Q_3$. Cela génère un système de trois équations avec trois inconnues.

Dans le cadre du régime établi, il est nécessaire d'ajouter de la fonte pour deux raisons principales :

1. Le pourcentage de magnésium (Mg) devient insuffisant pour maintenir la qualité de la production.
2. La quantité de fonte disponible dans le four de maintien approche du minimum critique.

Afin d'anticiper ces situations, nous avons calculé le temps disponible avant qu'une intervention ne soit nécessaire, à partir du taux de perte de magnésium par minute dans le four de coulée et du rythme de production des moules.

Le calcul du temps avant que la fonte disponible ne devienne insuffisante est basé sur la consommation de fonte par minute, liée au nombre de moules produits par heure et à la masse de fonte par moule. Voici les étapes détaillées :

```

1 # Temps admissible avant l'ajout de fonte dans le four de maintien,
2 # pour éviter d'atteindre la quantité minimale de fonte (en kg).
3 consommation_fonte_min = nb_moules_heure * masse_grappe / 60 # kg/min
4 fonte_four_consommable = masse_fonte_coulée - masse_fonte_coulée_min
5 temps_epuis_fonte = fonte_four_consommable / consommation_fonte_min
6 délai_avt_traitement_fonte_four = temps_epuis_fonte - temps_traitement

```

Listing 2 – Calcul du temps avant épuisement de la fonte

- **consommation_fonte_min** : Consommation de fonte en kg par minute, basée sur le rythme de production des moules.
- **fonte_four_consommable** : Quantité de fonte disponible avant d'atteindre le seuil critique.
- **temps_epuis_fonte** : Temps estimé avant que la fonte ne soit épuisée.
- **délai_avt_traitement_fonte_four** : Délai disponible avant de devoir ajouter de la fonte, en tenant compte du temps de traitement.

Le pourcentage de magnésium dans la fonte diminue progressivement au cours du processus de production. Le temps avant que ce pourcentage atteigne un seuil critique est calculé de la manière suivante :

```

1 # Temps admissible avant l'ajout de magnésium dans le four de maintien,
2 # pour éviter d'atteindre le pourcentage minimal de Mg.
3 pct_mg_four_consommable = pct_mg_fonte_coulée - pct_mg_fonte_coulée_min
4 temps_epuis_mg = pct_mg_four_consommable / pct_perdu_mg_coulée_min
5 délai_avt_traitement_mg_four = temps_epuis_mg - temps_traitement

```

Listing 3 – Calcul du temps avant épuisement du magnésium

- **pct_mg_four_consommable** : Pourcentage de magnésium consommable avant d'atteindre le seuil minimal.

- **temps_epuis_mg** : Temps estimé avant que le pourcentage de magnésium ne devienne insuffisant.
- **delai_avt_traitement_mg_four** : Délai disponible avant de devoir ajouter du magnésium.

Le moment optimal pour lancer le traitement est déterminé en prenant le minimum entre le délai avant que la fonte ne soit épuisée et le délai avant que le pourcentage de magnésium ne devienne insuffisant. Cela garantit que l'intervention se fait au moment opportun pour éviter tout dysfonctionnement du processus de production.

```
1 delai_avt_traitement = min(temps_epuis_fonte,
    delai_avt_traitement_mg_four)
```

Listing 4 – Calcul du délai avant traitement optimal

Conclusion et Perspectives

Pour conclure cette partie, il est notable qu'une grande différence a été observée entre le calcul théorique de la longueur de fil fourré, estimée entre 15 et 20 mètres, et la longueur mesurée en pratique, qui s'élève à 68 mètres. Cette écart significatif suggère que les estimations théoriques pourraient être améliorées en affinant les paramètres utilisés dans les calculs et/ou la démarche suivie pour répondre au problème.

Pour les travaux futurs, il serait bénéfique d'intégrer des variables supplémentaires afin de mieux modéliser le système. En particulier, il serait pertinent de prendre en compte :

- La durée du changement de moules pour chaque pièce.
- La durée des pannes indéterminées qui peuvent survenir.

5 Conclusion Générale

Références

- [1] Alain Reynaud. *Oligo-éléments & fontes*. ETIF, 2009.
- [2] Centre Technique des Industries de la Fonderie. *Fabrication de la fonte à graphite sphéroïdal par les procédés au magnésium (Addition à la poche d'alliages au magnésium)*, juin 1972.