

Rapport de Stage de Fin d'Études

Sujet du stage :
Optimisation des coûts de production

Présenté par :
Congo Job

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

Encadrant universitaire :
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 L'objectif du stage	8
1.5 Le plan du rapport	8
2 L'étude statistique	8
2.1 Contexte et Objectifs	8
2.2 Les données	9
2.3 Les indicateurs	10
2.4 Les éléments chimiques	13
2.5 Les valeurs extrêmes	15
2.6 La régression linéaire	16
2.7 Conclusion	18
3 La recette Optimale	18
3.1 Présentation du problème de la Recette	18
3.2 L'algorithme du simplexe	18
3.3 Modélisation du problème	20
3.4 Résolutions et Résultats du problème	21
4 Le Traitement au Magnésium de la fonte GS	23
4.1 Présentation du problème	23
4.2 Résolutions du problème	27
4.3 Résultats	27

1 Contexte

1.1 Introduction rapide

La fonderie est un secteur qui fabrique des pièces moulées en métal. Elle couvre une variété d'alliages, du fer à l'aluminium en passant par le cuivre.

Dans ce document, nous avons le rapport de stage qui a eu lieu dans l'équipe d'Informatique de la Fonderie de Niederbronn. Il s'est déroulé sur une période de quatre mois, entre le 11 mars et le 26 juillet 2024. On retrouvera tous les documents du stage dans ce lien : <https://github.com/jobinhio/congo/tree/Fonderie>.

Le présent rapport couvre les éléments suivants : la présentation de la fonderie de Niederbronn, la description du processus de production et de l'objectif du stage, l'étude statistique,

mandat du stage la méthodologie utilisée durant le stage, et les résultats du stage. Enfin une conclusion boucle ce rapport de stage.

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

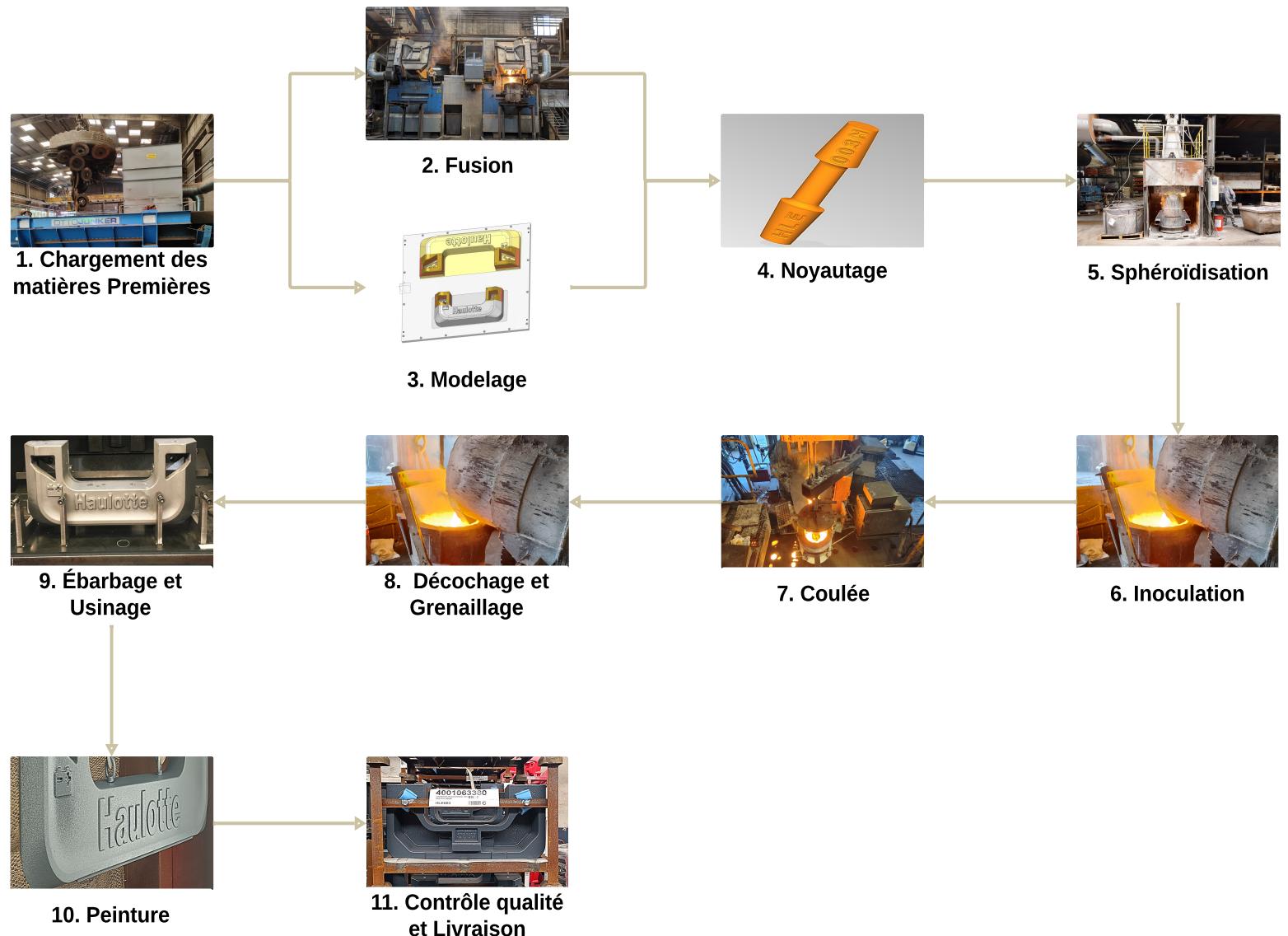


FIGURE 2 – Flux de production des pièces en fonte.

- 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** : Dans cette étape, des agents d'inoculation sont ajoutés au métal fondu pour contrôler la structure et les propriétés finales de la fonte GS. Ces agents favorisent la formation de sphéroïdes de graphite de taille et de forme uniformes.
L'inoculation est réalisée après la sphéroïdisation pour contrôler la structure et les propriétés finales de la fonte. Des agents inoculants, tels que le ferrosilicium, sont ajoutés pour favoriser une précipitation uniforme et fine du graphite.
Le Degrassage consiste à enlever la grasse dans la fonte
7. **Moulage ou Coulée** : La fonte est versé dans le moule à travers les conduits de coulée pour prendre la forme finale de la pièce. Une fois coulé, le métal liquide refroidit et se solidifie à l'intérieur du moule, prenant la forme de la cavité créée par le modèle et les noyaux.
8. **Décochage et Grenaillage** :
Après la coulée, une fois le métal solidifié, le moule est démonté pour extraire la pièce coulée. Les moules en sable sont souvent détruits au cours de ce processus, tandis que les moules permanents peuvent être réutilisés. Les noyaux en sable sont retirés, souvent à l'aide de vibrations ou de lavage, pour révéler les cavités internes de la pièce. Grenaillage : La pièce est ensuite nettoyée par projection de billes d'acier (ou d'autres matériaux abrasifs) pour enlever la calamine, les restes de sable et améliorer la surface.
9. **Ebarbage et Usinage** : La pièce obtenue après démolage n'est pas encore prête pour une utilisation directe. Elle doit subir plusieurs opérations de finition. Les

pièces sont ébarbées pour enlever les bavures et les excès de métal laissés par les joints du moule ou les conduits de coulée. Les pièces peuvent être usinées pour atteindre des dimensions précises et une surface lisse.

10. **Peinture** : La peinture et le revêtement sont appliqués à la pièce pour la protéger de la corrosion et lui donner un aspect esthétique. La surface de la pièce est nettoyée et préparée pour une meilleure adhérence de la peinture. Des peintures ou des revêtements spécifiques sont appliqués par pulvérisation, trempage ou brossage.
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 est analysée pour s'assurer qu'elle correspond aux spécifications. Des tests de traction, de dureté, et d'impact peuvent être effectués pour valider les propriétés mécaniques de la pièce.

1.4 L'objectif du stage

L'objectif principal de ce stage est d'optimiser l'utilisation des matières premières recyclées dans la production de fonte à hautes caractéristiques mécaniques. Le projet s'inscrit dans le cadre d'un crédit d'impôt recherche et vise à modéliser et automatiser les processus liés au choix et aux quantités des différentes matières premières. Voici les missions confiées :

- Modéliser le système via des équations.
- Contribuer à l'optimisation des coûts de revient en automatisant les processus.
- Participer à d'autres sujets d'optimisation en parallèle.

1.5 Le plan du rapport

Le présent rapport couvre les éléments suivants : la présentation de la fonderie de Niederbronn, la description du processus de production et de l'objectif du stage,

mandat du stage la méthodologie utilisée durant le stage, et les résultats du stage. Enfin une conclusion boucle ce rapport de stage.

2 L'étude statistique

2.1 Contexte et Objectifs

Nous disposons de 2 mesures normatives la résistance mécanique en MPA et l'allongement en pourcentage , de la composition chimique de la fonte étudiée obtenus grâce au spectromètre et de 5 indicateurs de qualités, qui sont des combinaisons d'éléments chimiques. L'objectif est d'évaluer la pertinence des 5 indicateurs de qualités à la vue des 2 mesures normatives et de sélectionner les meilleurs indicateurs de qualité et donner leurs intervalle de prédictions.

2.2 Les données

Les données utilisées dans ce projet proviennent de deux sources principales : une machine de Traction et d'un Spectromètre . D'abord, la résistance mécanique et l'allongement sont mesurées à l'aide d'une machine de traction. Ensuite, Les données concernant les éléments chimiques dans la fonte sont obtenus à l'aide de spectromètres.

Les données sont au format Données au format Windev extraites dans un fichier Excel. Le Type de Données est la Base de données. Nous disposons d'une de données et de features

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

Les variables quantitatives :

- Rm : Résistance mécanique à la traction.
- Rp0.2 : Limite d'élasticité à 0,2
- 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

Avant d'utiliser les données dans l'étude, elles ont été soumises aux prétraitements suivants :

- Nettoyage des données :
 - Suppression des colonnes : Date, Rp0.2, A%, Contre-essai A%, Pièces, Observations, Comment. RQ, PJ, Ca, Ba.
 - Suppression des lignes incomplètes (celles avec des colonnes vides).
- Ajout de l'indicateur Pureté MAYER.
- Mise en forme des données :
 - Renommage des colonnes.
 - Séparation des données en fonction du type de recette.
 - Séparation des données en fonction de la conformité de l'échantillon.

Recette	Numéro de four	Conforme ?	Rm [MPa]	Moyenne allongement [%]	Impureté [%]	Ferrite [%]	Purete ONO [%]	Purete THIELMANN [%]	Purete MAYER [%]	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

- Evaluer la pertinence des cinq indicateurs de qualité à la vue des deux mesures normatives.

- Dans le but d'évaluer l'influence globale des différents éléments sur la matrice ou la forme du graphite, plusieurs formules ont été proposées par divers auteurs.
Voici les 5 formules, qui consistent en une somme pondérée des éléments chimiques :

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

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

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

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

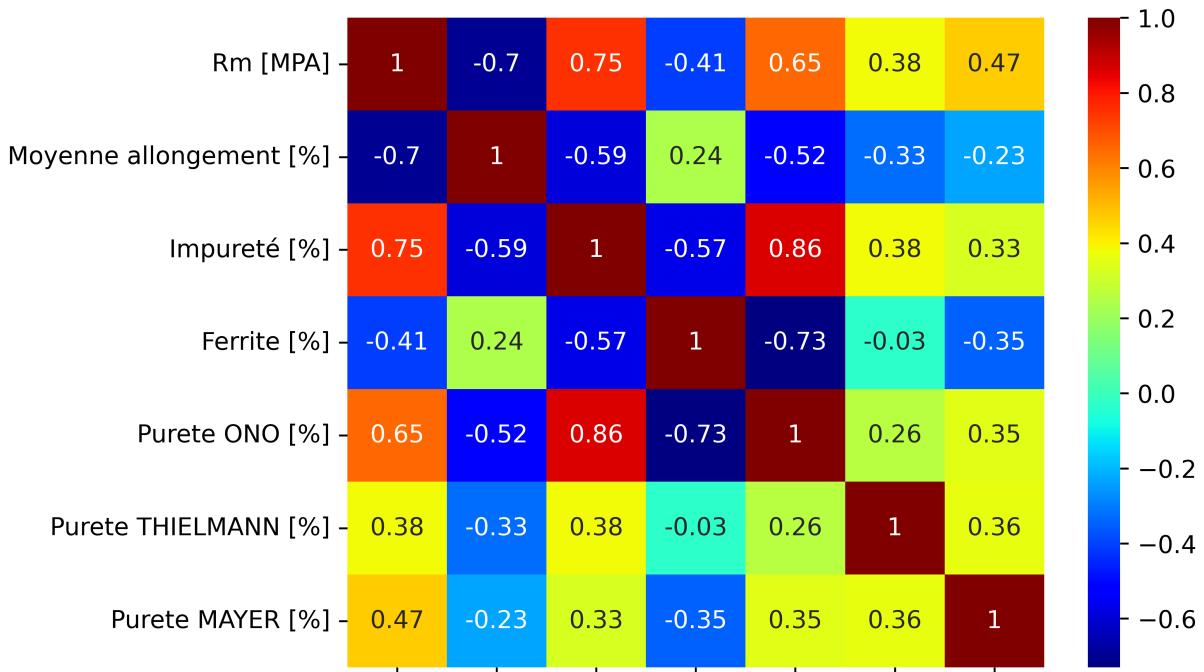
$$\begin{aligned}\text{Pureté THIELMANN \%} = & 4.4(\text{Ti \%}) + 2.0(\text{As \%}) + 2.3(\text{Sn \%}) + 5.0(\text{Sb \%}) \\ & + 290(\text{Pb \%}) + 370(\text{Bi \%}) + 1.6(\text{Al \%})\end{aligned}$$

Pour évaluer nos indicateurs, nous utilisons la corrélation de Pearson afin de quantifier la relation linéaire entre ces derniers et les mesures d'allongement et de résistance mécanique.

Les étapes de l'évaluation sont les suivantes :

1. Calcul des coefficients de corrélation.
2. Classement des indicateurs en fonction de leur corrélation avec l'allongement et la résistance mécanique.
3. Conservation des indicateurs présentant la dépendance linéaire la plus significative avec les deux mesures normatives.

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

La matrice de corrélations fournit des informations précieuses sur les relations entre différentes variables de notre jeu de données. Ces corrélations peuvent non seulement aider à prédire une variable en fonction d'une autre, mais aussi à comprendre les interactions et les influences entre les variables. Voici les principales observations :

Une forte corrélation positive (0.65) a été observée entre "Rm [MPa]" et "Moyenne alignement [%]". Cela indique que lorsque la résistance à la traction (Rm) augmente, la moyenne d'alignement a également tendance à augmenter. De même, une forte corrélation positive (0.62) entre "Rm [MPa]" et "Pureté ONO [%]" montre que l'augmentation de la pureté ONO est généralement associée à une résistance à la traction plus élevée.

Une très forte corrélation positive (0.86) a été identifiée entre "Moyenne alignement [%]" et "Ferrite [%]". Cette relation suggère que les niveaux de ferrite augmentent parallèlement à l'amélioration de l'alignement moyen, ce qui pourrait indiquer des mécanismes sous-jacents communs influençant ces deux variables. Une corrélation négative (-0.41) entre "Rm [MPa]" et "Ferrite [%]" indique que des niveaux plus élevés de ferrite sont associés à une diminution de la résistance à la traction. Cela pourrait impliquer que la présence de ferrite a un effet affaiblissant sur le matériau.

Une corrélation négative notable (-0.52) entre "Rm [MPa]" et "Pureté THIELMANN [%]" suggère qu'une pureté THIELMANN plus élevée est liée à une réduction de la résis-

tance à la traction.

2.4 Les éléments chimiques

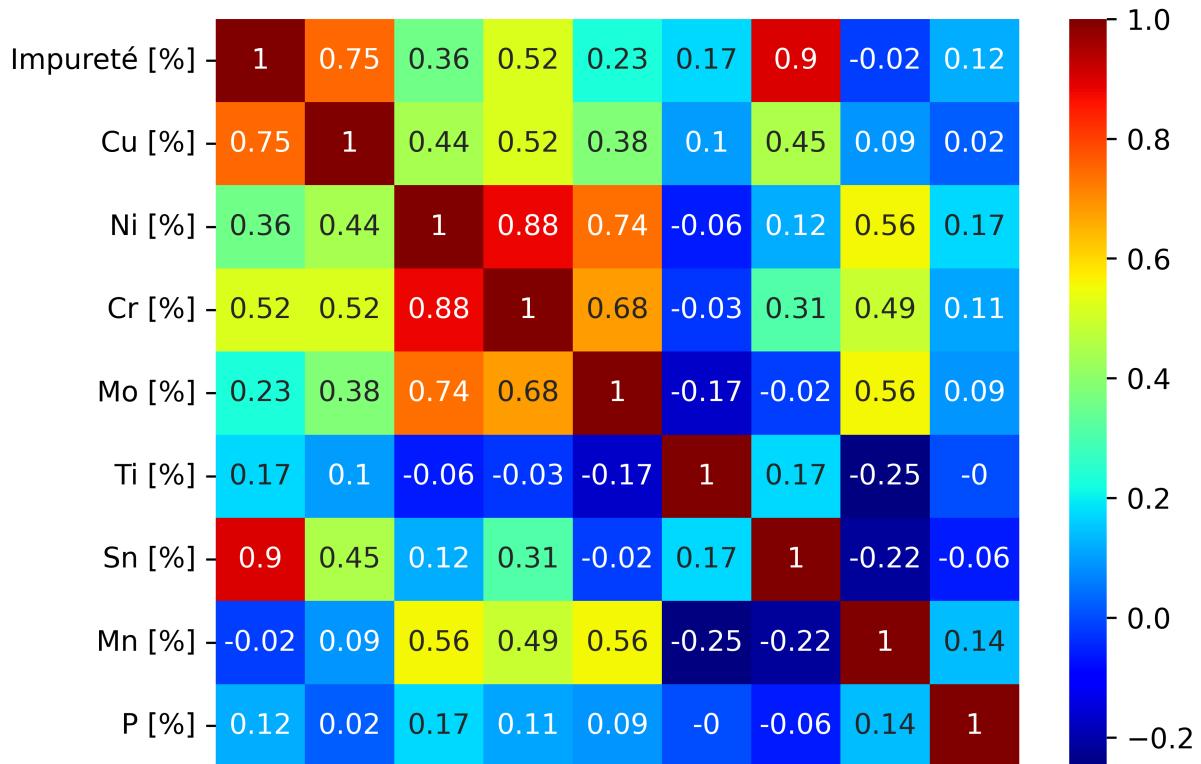
Examinons de près les éléments chimiques qui composent l'impureté, la pureté ONO et le taux de ferrite.

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

Dans la formule de la pureté ONO, on retrouve les 4 types d'éléments. Quant à l'impureté, elle quantifie des éléments poisons, des éléments polluants et des éléments d'alliage.

Corrélation entre l'impureté et les éléments chimiques



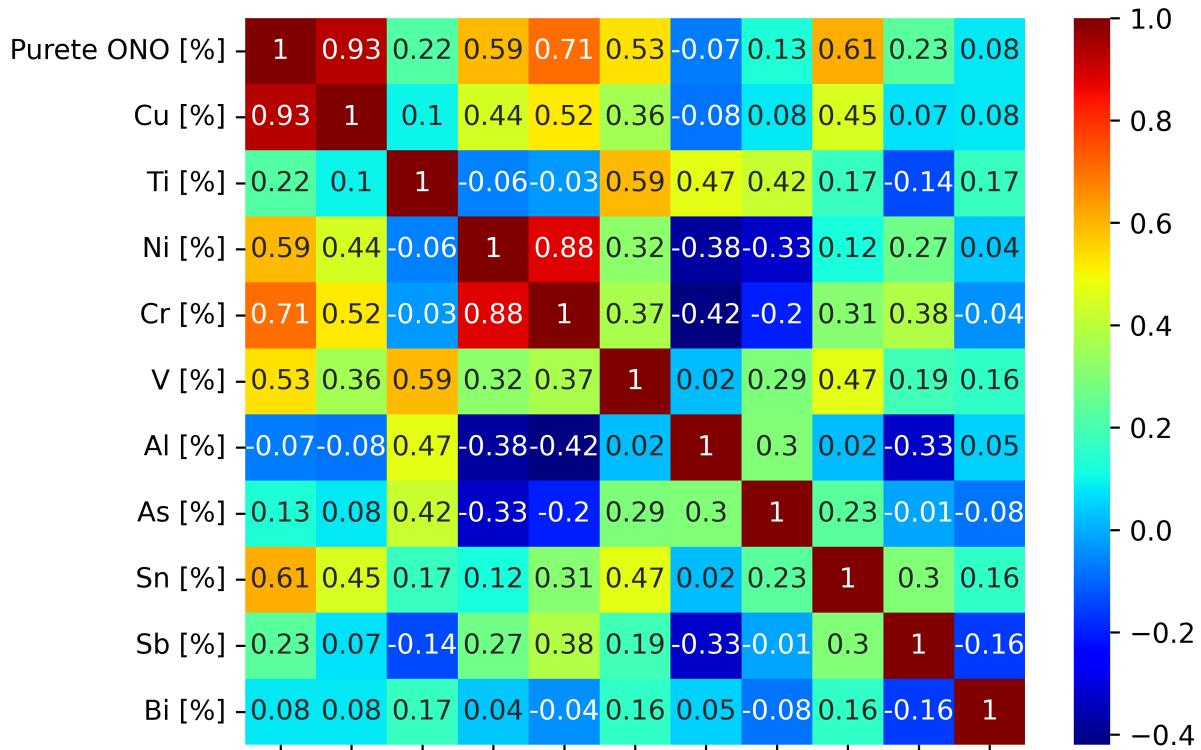
Classement des éléments chimiques :

- Sn (Étain) [%] : 0.902219
- Cu (Cuivre) [%] : 0.753903
- Cr (Chrome) [%] : 0.522274

Une forte corrélation positive (0.88) est observée entre le Chrome (Cr) et le Molybdène (Mo). Les impuretés montrent une corrélation modérément positive avec le Nickel (Ni)

et le Titane (Ti), toutes deux à 0.36. Cela indique que les niveaux de ces impuretés ont tendance à augmenter modérément lorsque la concentration de Ni ou de Ti augmente. Les corrélations entre les impuretés et des éléments tels que le Cuivre (Cu), le Manganèse (Mn), et le Phosphore (P) sont faibles, avec des valeurs proches de 0. Cela suggère qu'il n'y a pas de relation significative entre ces éléments et les impuretés dans le contexte étudié.

Corrélation entre la pureté ONO et les éléments chimiques



Classement des éléments chimiques :

- Cu (Cuivre) [%] : 0.934031
- Cr (Chrome) [%] : 0.707962
- Sn (Étain) [%] : 0.606912
- Ni (Nickel) [%] : 0.590721
- V (Vanadium) [%] : 0.527861

La pureté ONO [Il y a des corrélations positives modérées avec Ni [Les éléments comme Sb [

Les indicateurs les plus pertinants

- Impureté : 0.673506
- Pureté ONO : 0.583101

Les éléments chimiques conservés

- Sn (Étain)
- Cu (Cuivre)
- Cr (Chrome)

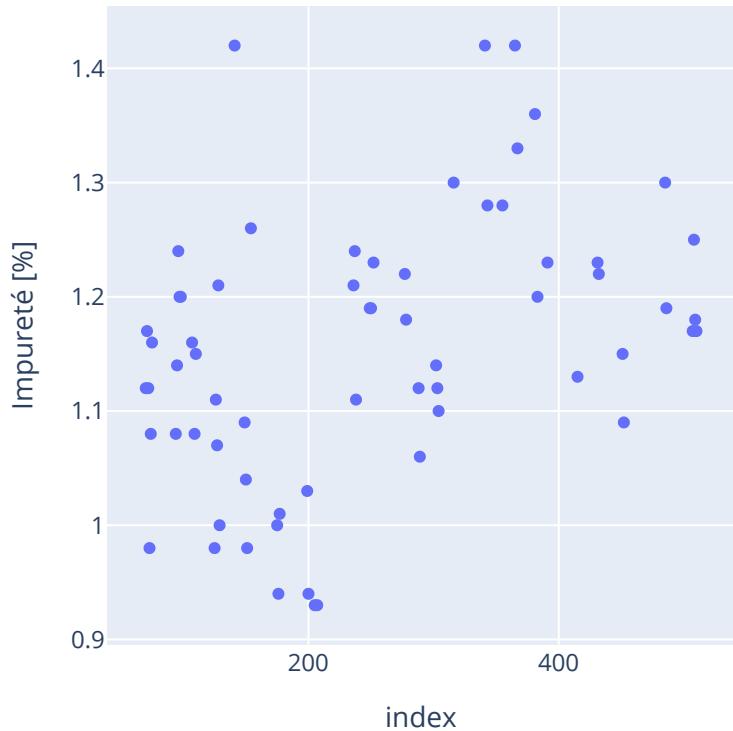
— V (Vanadium)

2.5 Les valeurs extrêmes

Pour améliorer la performance de la régression linéaire, nous procédons à la suppression des valeurs extrêmes basées sur les mesures d'impureté, de pureté ONO et de taux de ferrite. Voici la procédure suivie :

- **Objectif** : Réduire la variabilité des données pour une meilleure performance de la régression linéaire.
- **Critère de suppression** : 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.
- Cette suppression est réalisée de manière itérative jusqu'à ce qu'il n'y ait plus de valeurs extrêmes dans l'ensemble de données.

Impureté [%] sans ses valeurs extrêmes



Impureté [%] avec ses valeurs extrêmes

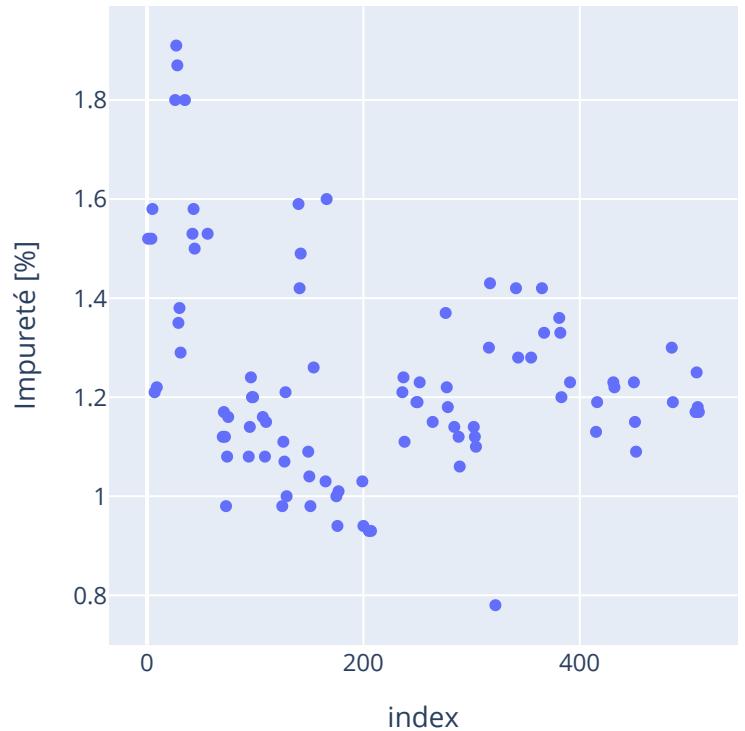
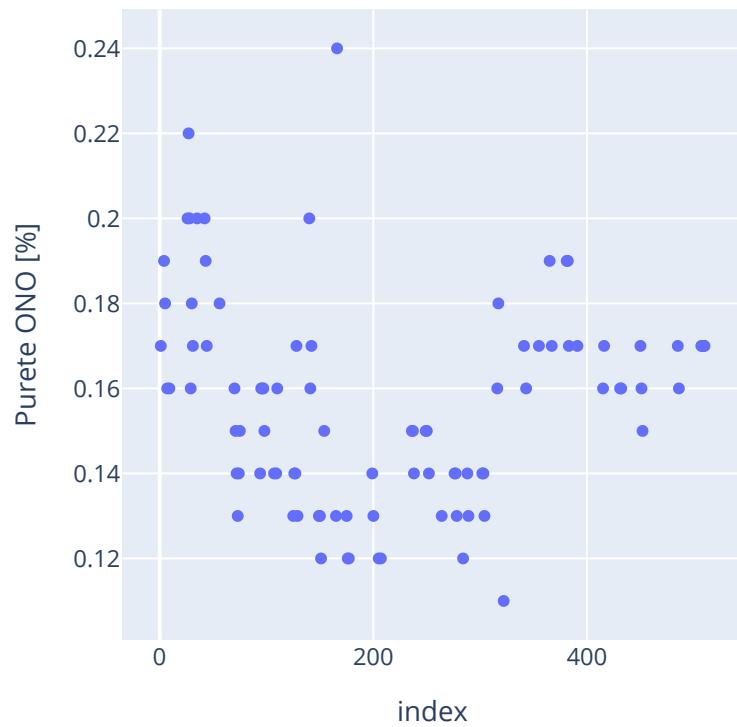


FIGURE 7 – L'impureté avant et après le traitement des valeurs extrêmes.

Purete ONO [%] avec ses valeurs extrêmes



Purete ONO [%] sans ses valeurs extrêmes

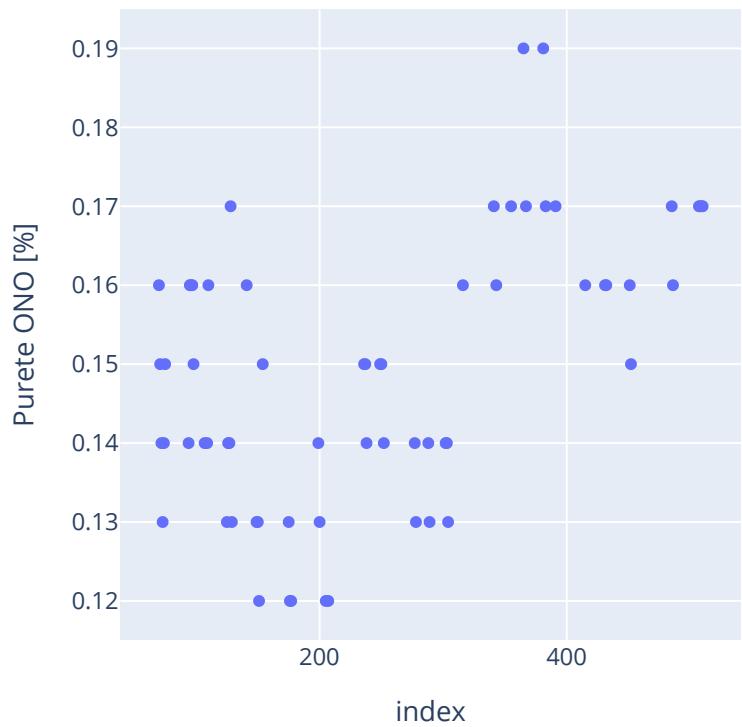


FIGURE 8 – La pureté ONO avant et après le traitement des valeurs extrêmes.

On peut alors discuter des bornes mininum et maximal de l’impurité et de ONO, qui permet de garantir un bon lit de fusion.

Les données sont assez distantes l’une des autres, ce qui n’est pas idéal pour avoir un intervalle de confiance et de prediction fine

2.6 La régression linéaire

Effectuons une régression linéaire et calculons les intervalles de prédictions suivant les éléments chimiques et les indicateurs les plus pertinants.

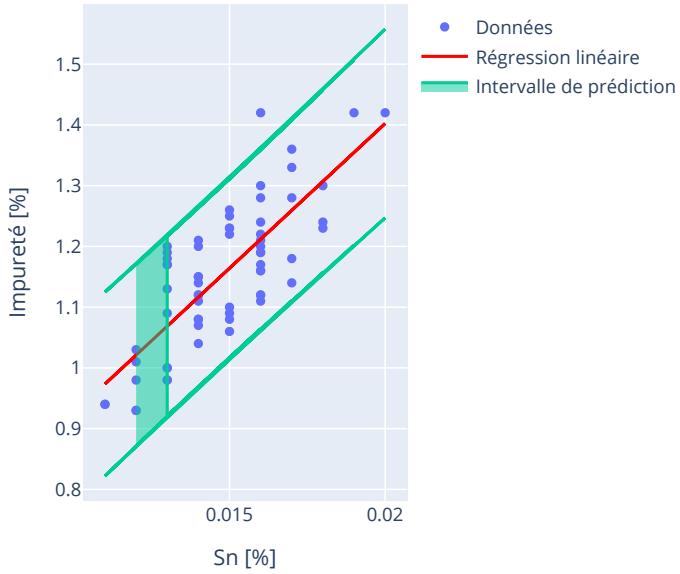
La formule des intervalles de prédition est donnée par :

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

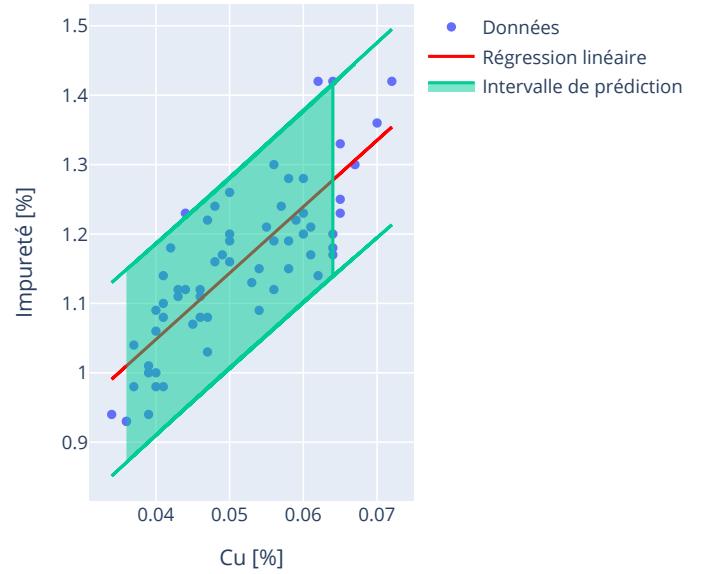
Où :

- y_{pred} est la valeur prédite.
- $predict_se$ est l’écart-type de prédition.
- n est un entier naturel.

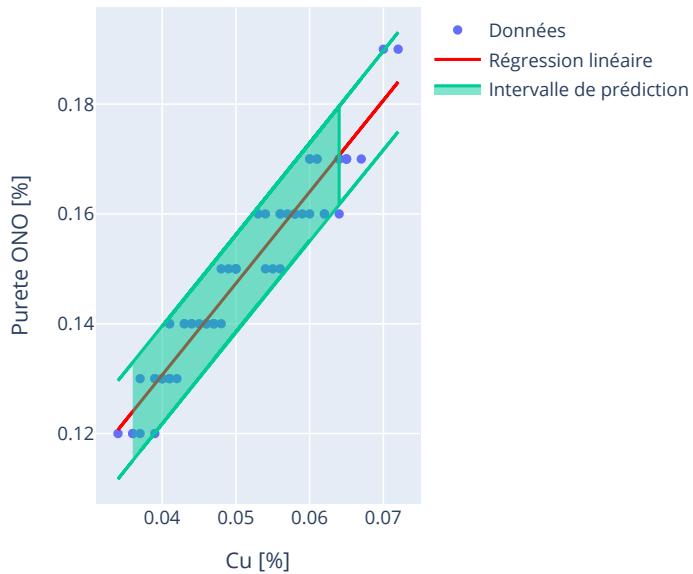
L'évolution de l'Impureté [%] en fonction de Sn [%]



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 [%]

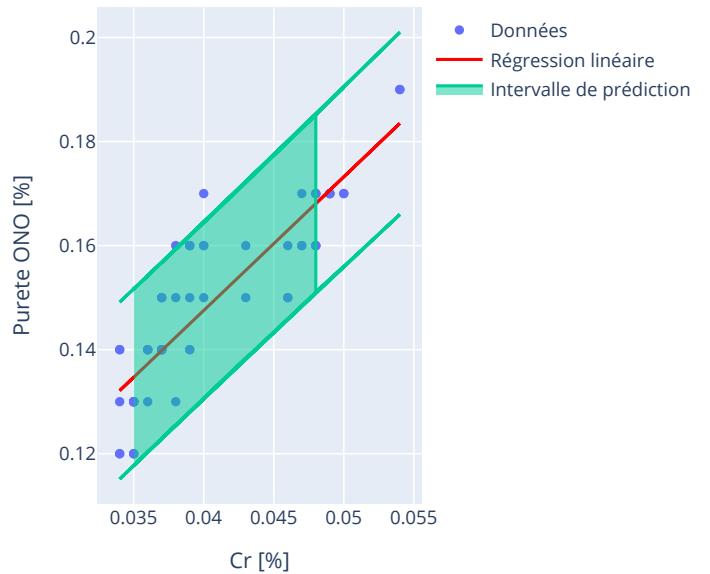


FIGURE 9 – L'évolution de la pureté Ono et l'impureté

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 de la Recette

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 tonne 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 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. L'algorithme exploite la structure géométrique des problèmes linéaires, en se déplaçant d'une solution de

base faisable à une autre le long des sommets du polytope de solutions, jusqu'à atteindre une solution optimale.

Phase 1 :

Résumé de la phase d'initialisation du simplexe (phase 1)

On note F_{aux} la valeur de la fonction objectif du problème auxiliaire (PLA) à la fin du simplexe, c'est-à-dire

$$F_{aux} = \min \sum_{j=1}^n x_j$$

1. Si $F_{aux} = 0$ et $x_0 = 0$, on passe à la phase 2 du simplexe.
2. Si $F_{aux} = 0$ et $x_0 > 0$, on supprime les lignes et colonnes associées aux x_i , et on passe à la phase 2 avec q .
3. Si $F_{aux} > 0$, alors pas de solution réalisable pour le DPL (phase).

Définition 4.2

Soit $B \subset \{1, \dots, n\}$ un ensemble d'indices avec $\text{card}(B) = m$ tel que les colonnes A_j , $j \in B$, de A sont linéairement indépendantes. Autrement dit, la matrice carrée A_B formée des colonnes A_j , $j \in B$, est inversible. On dit que l'ensemble B des indices est une base.

Les variables $X_B = (x_j)_{j \in B}$ sont appelées variables de base.

Les variables $X_H = (x_j)_{j \notin B}$ sont appelées variables hors-base.

On notera $H = \{j \in \{1, \dots, n\}, j \notin B\}$ l'ensemble des indices correspondants aux variables hors-base.

Résumé de la méthode du simplexe en phase 2 (progression)

1. **Variables de base réalisables et coûts réduits :**
 - Calcul des variables de base réalisables : étant donné $A = (A_B | A_H)$, on calcule les variables de base réalisables $X_B = A_B^{-1}b \geq 0$.
 - Calcul des coûts réduits : $\lambda_H = c_H - c_B A_B^{-1} A_H$.
 - Si $\lambda_H \leq 0$ alors X_p est une solution optimale (arrêt de l'algorithme).
2. **Variable entrante e :** détermination de l'indice $e = \arg \max_i \{\lambda_H\}_i$ tel que $\lambda_H > 0$.
3. **Variable sortante s :**
 - Calcul de $z = A_B^{-1} A_e$.
 - Détermination de l'indice $s = \arg \min_i \left\{ \frac{(X_B)_i}{z_i} \right\}$ tel que $z_i > 0$.

4. On obtient une nouvelle base B^* et une nouvelle matrice A_B^* dans laquelle la colonne A_e remplace la colonne A_s . Calcul de A_B^{-1} et retour à l'étape 1 avec la base B^* au lieu de B .

Input: Matrice A , vecteurs b et c (fonction objectif)

Output: Solution optimale X^* ou indication que le problème est non borné

Initialiser une solution de base réalisable $X_B = A_B^{-1}b$;

while Il existe une variable hors-base avec un coût réduit positif **do**

 | Calculer les coûts réduits $\lambda_H = c_H - c_B A_B^{-1} A_H$;

 | Sélectionner la variable entrante x_e avec le plus grand $\lambda_H > 0$;

 | Calculer la direction de déplacement $z = A_B^{-1} A_e$;

 | Calculer le ratio pour chaque variable de base $x_i = \frac{(X_B)_i}{z_i}$ où $z_i > 0$;

 | Sélectionner la variable sortante x_s correspondant au plus petit ratio;

 | Mettre à jour la base en remplaçant x_s par x_e ;

 | Recalculer A_B^{-1} et mettre à jour X_B ;

end

if Toutes les variables hors-base ont des coûts réduits négatifs ou nuls **then**

 | La solution courante est optimale;

end

else

 | Le problème est non borné;

end

Algorithm 1: Algorithme du simplexe (Phase 2)

3.3 Modélisation du problème

On veut résoudre :

$$\min_x C \cdot x$$

sous les contraintes :

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

où :

- $x \in [0, 1]^m$, les proportions de la matière première.
- 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
- $b_{ub}, b_{eq} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$: vecteurs des contraintes

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

3.4 Résolutions et Résultats du problème

- Les matières premières que l'on utilise sont spécifiques à chaque Nuance par exemple les retours bleu sont utiliser uniquement pour la GS 450-10 et GS 400-15 et les retours jaune pour les 2 autres nuances

- Au cours de mon stage, je me suis focalisé uniquement sur la GS. L'ensemble du code est réalisé en python et en jupyter.

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 10 – Illustration du tableau matières premières

	Composant		Impurité	ONO	C	Si	Mn	Cu	Cr				
GS 400-15	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									

	Composant		Impurité	ONO	C	Si	Mn	Cu	Cr				
GS 450-10	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 11 – 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 12 – Les contraintes matières premières

```

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)

```

```

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

```

4 Le Traitement au Magnésium de la fonte GS

4.1 Présentation du problème

- On cherche

Voici une reformulation plus claire et lisible de votre texte :

Dans cette partie, nous nous concentrerons sur la production de fonte à graphite sphéroïdal (GS) réalisée par le processus DISAMATIC, en particulier sur l'étape de sphéroïdisation. Cette étape consiste principalement à ajouter du magnésium (Mg) à la fonte avant la coulée. Le magnésium est introduit sous forme d'alliage en utilisant un fil fourré.

À la fonderie, le coût du fil fourré est de 6,68 € par kilogramme de poudre, avec une masse de 418 g par mètre de fil. La quantité de magnésium contenue dans ce fil est de 43 g par mètre.

Avant d'ajouter le fil fourré à la fonte, il est nécessaire de produire cette dernière. La fonderie dispose de deux fours de fusion d'une capacité de 5 tonnes chacun. Le processus de préparation du lit de fusion, qui consiste à charger les matières premières, prend 25 minutes, tandis que la fusion des matières premières dure 45 minutes. On suppose le pourcentage de Mg est nul dans la fonte fournis par le four de Fusion.

Une fois la fonte créée, elle est versée et transportée dans des poches. Il existe deux types de poches utilisées : une poche de traitement et une poche de coulée, chacune pouvant contenir jusqu'à 1250 kg de fonte. La fonte sera ensuite reçue dans le Four de Coulée.

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

Le pourcentage de magnésium (Mg) doit être compris entre 0,035 % et 0,045 %. Cette contrainte sur la teneur en magnésium garantit la qualité de la pièce finale tout en minimisant le coût du fil fourré.

En général, dans le programme des pièces à réaliser dans la journée, le type, la taille et la quantité des pièces varient. Cela entraîne des variations dans le nombre de mottes à réaliser, la masse des grappes et le nombre de moules produits par heure.

On a une donnée d'entrée : la candence et la poids de motte. On sait ce que l'on consomme, c'est ça la fonction de consommation. Cette consommation de fonte permet de savoir combien de temps l'on met pour passer de 3500 kg à 2500 kg de fonte dans le four de Coulée. On veut savoir à quel moment, on doit lancer la prochaine poche de traitement. Cette poche doit arriver avant que la fonte dans le Four de Coulée atteigne son minimum 2500. Si le minimum est dépassé cela peut endommager le four de Coulée.

On a une fonction de perte du Mg en fonction du temps. Dans le Four de Coullée, le pourcentage de Mg doit être compris entre à 0.035 - 0.045 % cette contrainte sur le mg permet de garantir la qualité de la pièce finale tout en limitant le prix du fil Fourre.

But : Trouver la quantité de Mg à mettre dans chaque poche de traitement qui permettra au Four de Coullée de retrouver le pourcentage maximale de Mg fixée à 0.045. La durée du Traitement MG est d'environ 10 minutes, c'est-à-dire la fonte met 10 minutes de la Fusion au Four de coulée.

L'un des objectifs de ce problème est de trouver la longueur en mettre optimal de fil fourré utiliser.

Processus de traitement de la poche 1

Paramètres sur la production :

Durée de la fusion des matières premières : 45 min

Transvasement dans la poche de Traitement



PFF = 3750 kg

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

Traitement de la fonte



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

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 %

Processus de traitement de la poche 2

Paramètres sur la production :

Durée de la fusion des matières premières : 45 min

Transvasement dans la poche de Traitement



PFF = 2500 kg

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

Traitement de la fonte



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

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 %

FIGURE 13 – 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 14 – Le Traitement au MG de la Poche 3

4.2 Résolutions du problème

Pour calculer la quantité d'alliages au magnésium à introduire dans la 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 %)

Phase Tansitoire

- Explication de cette phase
- Obtention des images inputs, outputs Optimisation de la Presentations Dans le drive , exporter en pdf avec parametre Paysage, Statement, dessus puis bas

4.3 Résultats

Références

- [1] Gianluigi Rozza. *An introduction to reduced basis method for parametrized PDEs*, ResearchGate
 - [2] B. Haasdonk. *Reduced Basis Methods for Parametrized PDEs – A Tutorial Introduction for Stationary and Instationary Problems*, University of Stuttgart
 - [3]
 - [4] Bopeng RAO, *Méthodes Numériques des Equations aux Dérivées Partielles*. UFR de Mathématique et d'Informatique Université de Strasbourg, 2021-2022
 - [5] Gwenol Grandperrin. *Introduction à la méthode des bases réduites*, ResearchGate Janvier 2008
- Dantzig, George B. Linear Programming and Extensions. Princeton University Press, 1963.