

Congo Job  
Stage Master 2  
IRMA, Université de Strasbourg, France



# Table des matières

<b>1 Contexte</b>	<b>3</b>
1.1 Introduction rapide . . . . .	3
1.2 Présentation de la Fonderie de Niederbronn . . . . .	3
1.3 Description du processus de production des pièces en fonte . . . . .	5
1.4 L'objectif du stage . . . . .	8
1.5 Le plan du rapport . . . . .	8
<b>2 L'étude statistique</b>	<b>8</b>
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 . . . . .	16
2.6 La régression linéaire . . . . .	19
2.7 Conclusion . . . . .	33
<b>3 La recette Optimale</b>	<b>34</b>
3.1 Présentation du problème d'Optimisation . . . . .	34
3.2 Modélisation du problème . . . . .	34
3.3 La méthode du simplexe . . . . .	38
3.4 Mise en oeuvre de la méthode du simplexe . . . . .	38

# 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/master-csmi/2022-stage-job-br>.

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

Voici un schéma décrivant les différents étapes de production d'une pièce en fonte :

#### Le processus de fabrication de la fonte

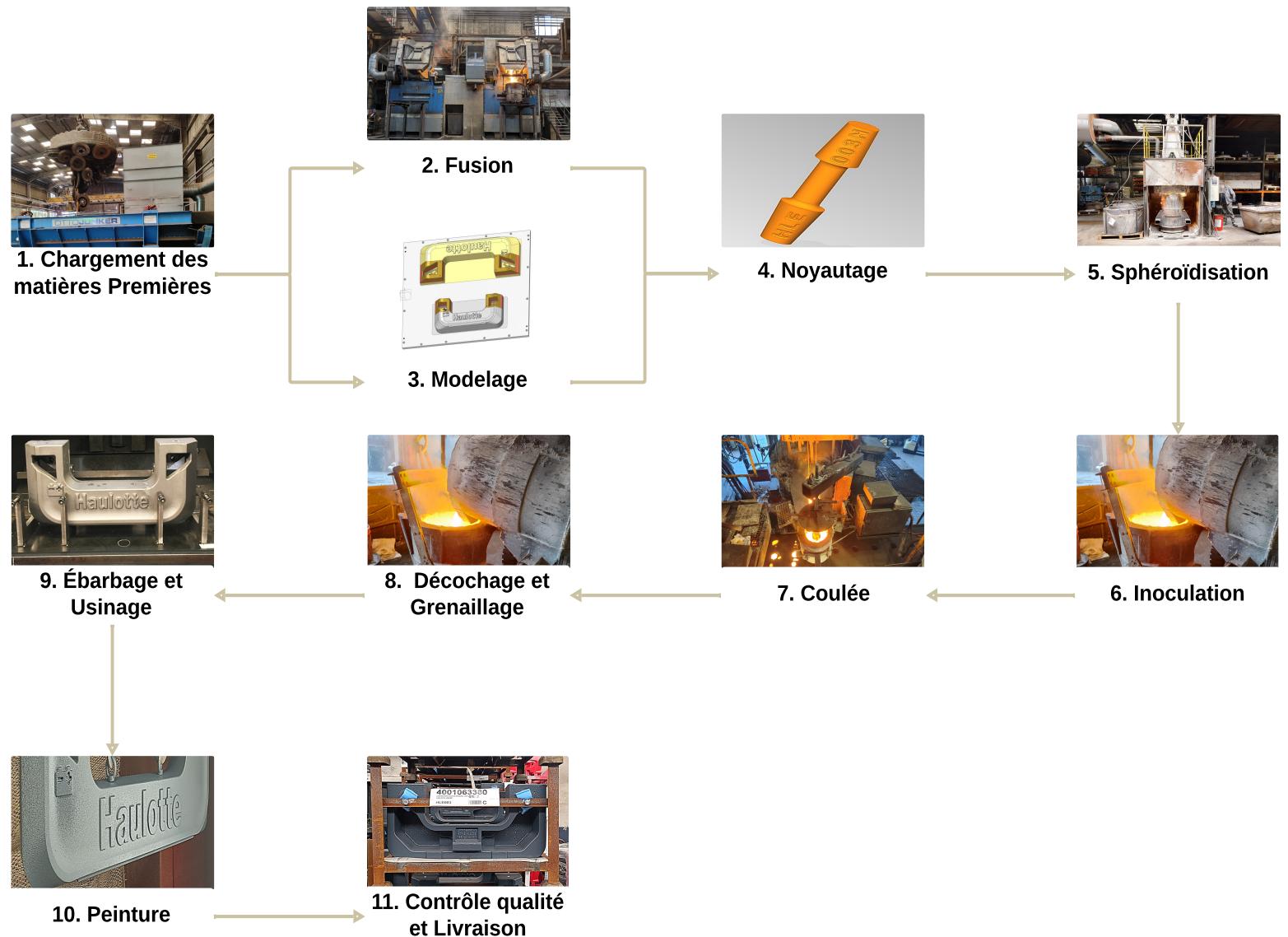


FIGURE 2 – Flux de production des pièces en fonte.

1. **Chargement des matières premières** : À cette étape, les matériaux de base

nécessaires à la production de la fonte sont préparés. Ce processus implique le tri, le nettoyage et la sélection des matières premières, telles que le fer, le cuivre, les déchets métalliques provenant d'autres industries, et les alliages comme le magnésium et le silicium. Pour obtenir les propriétés mécaniques souhaitées dans la fonte, il est crucial de choisir les matériaux en fonction de leur composition chimique, car certains éléments chimiques peuvent nuire à la qualité du produit final. Voici une illustration des matières premières utilisées au sein de la fonderie :



FIGURE 3 – Les retours et les Frite Haut Silicium



FIGURE 4 – Les retours et les Frite Haut Silicium

2. **Fusion** : Une fois les métaux sélectionnés, le métal est fondu dans un four à induction atteignant des températures suffisamment élevées pour le transformer en liquide.
3. **Modélage** :

Le modélage est l'une des premières étapes de la production en fonderie. Il s'agit de préparer le modèle et le moule nécessaires à la coulée. La pièce finale est d'abord conçue numériquement à l'aide de logiciels de CAO. Une fois la conception terminée,

le modèle physique est fabriqué en métal. Le moule est généralement réalisé à partir de sable (mélangé avec de l'argile et de l'eau) compacté autour du modèle. Le sable doit être suffisamment résistant pour supporter le poids du métal fondu sans se désagréger. Une fois le sable compacté, le modèle est retiré, et les parties du moule sont assemblées. Des conduits de coulée sont ajoutés pour permettre au métal fondu de remplir la cavité du moule.

4. **Noyautage** : Le noyautage est une étape essentielle pour créer des formes internes ou des cavités dans la pièce coulée. Comme le moule, les noyaux sont souvent fabriqués en sable. Ils sont formés à l'aide de boîtes à noyaux qui donnent aux noyaux la forme nécessaire. Les noyaux permettent de créer des canaux, des alésages, et d'autres détails internes. Une fois fabriqués, les noyaux sont placés avec précision dans le moule pour s'assurer qu'ils créent les cavités désirées. Ils doivent être solidement fixés pour éviter tout déplacement lors de la coulée.
5. **Sphéroïdisation** : Cette étape ne concerne que les fontes GS. La sphéroïdisation est un processus crucial pour améliorer les propriétés mécaniques de la fonte, notamment sa ductilité et sa résistance. Le magnésium est ajouté à la fonte liquide pour favoriser la formation de graphite sphéroïdal plutôt que lamellaire. Cela se fait souvent en ajoutant un alliage contenant du magnésium comme le fil fourrée. Les sphéroïdes de graphite augmentent la ductilité et la résistance de la fonte, ce qui la rend plus adaptée à des applications nécessitant une résistance élevée à la traction. Ce traitement modifie la microstructure de la fonte pour améliorer ses performances mécaniques et sa durabilité.
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.

7. **Moulage ou Coulée** : La fonte est versée 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 [%]	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

- 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 :

Pureté MAYER % = Ti% + Pb% + Bi% + Sb%

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

Pureté ONO % = Cu % + Ti % + Ni % + Cr % + V % + Al % + As % + Sn % + Pb % + Sb %  
+ Bi %

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

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

Pureté MAYER % = Ti% + Pb% + Bi% + Sb%

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

Pureté ONO % = Cu % + Ti % + Ni % + Cr % + V % + Al %  
+ As % + Sn % + Pb % + Sb % + Bi %

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

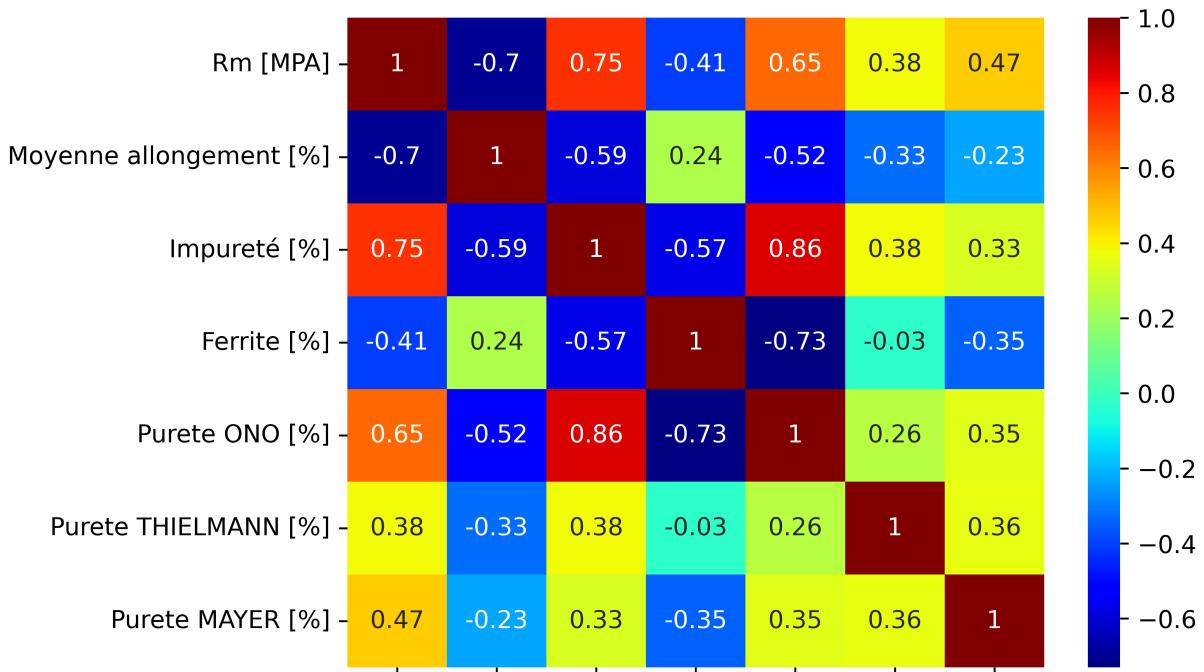
Pureté THIELMANN % =  $4.4(\text{Ti \%}) + 2.0(\text{As \%}) + 2.3(\text{Sn \%})$   
+  $5.0(\text{Sb \%}) + 290(\text{Pb \%}) + 370(\text{Bi \%})$   
+  $1.6(\text{Al \%})$

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

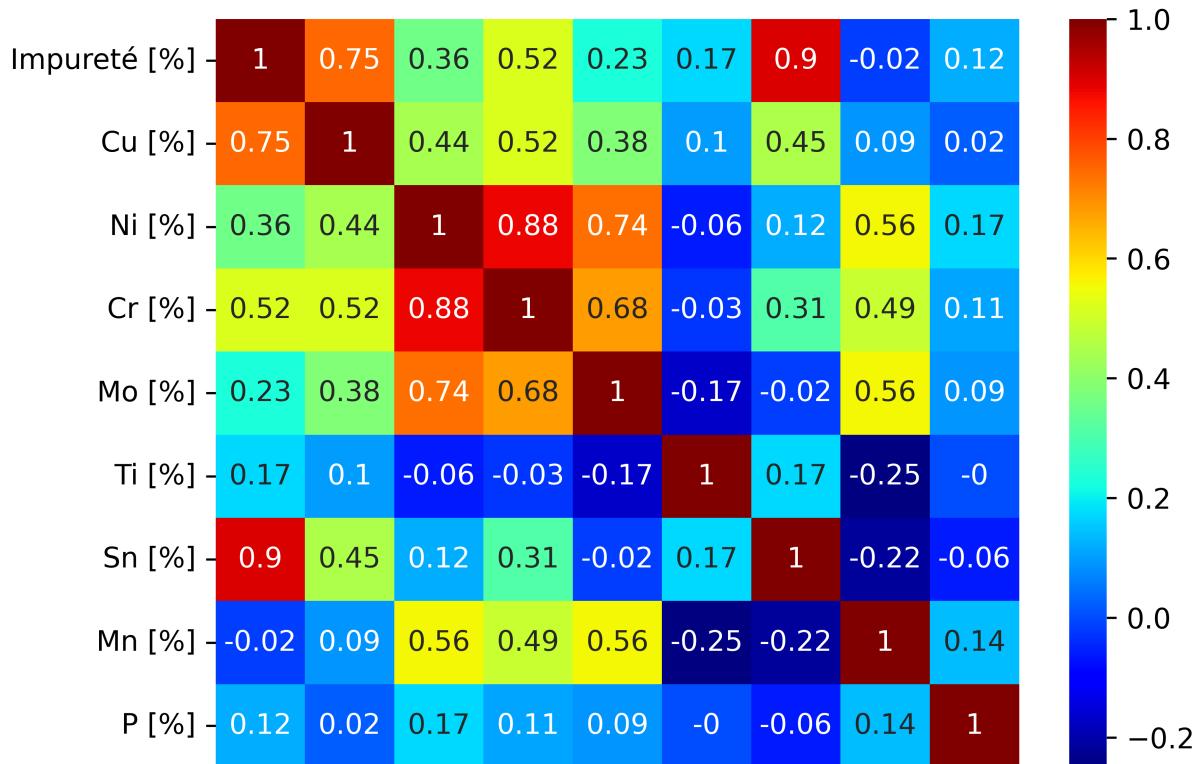
Examinons de près les éléments chimiques qui composent l'impureté, la pureté ONO et le taux de ferrite.

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



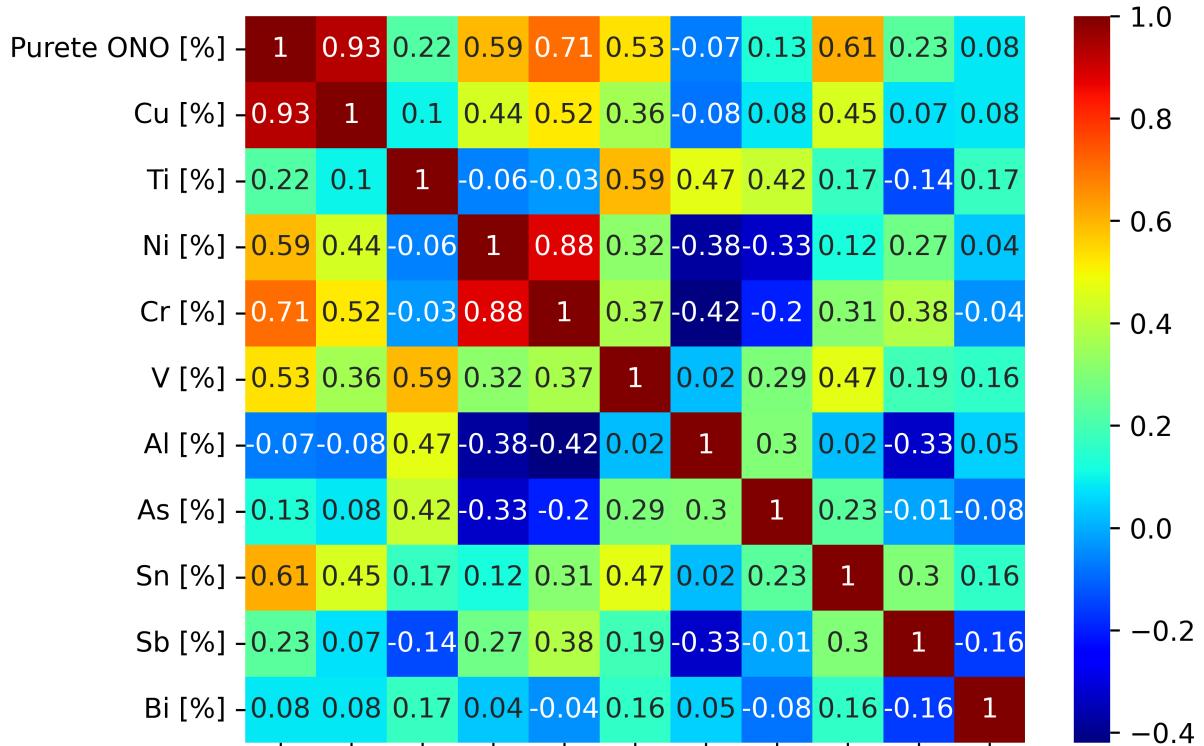
### Classement des éléments chimiques :

- 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 [

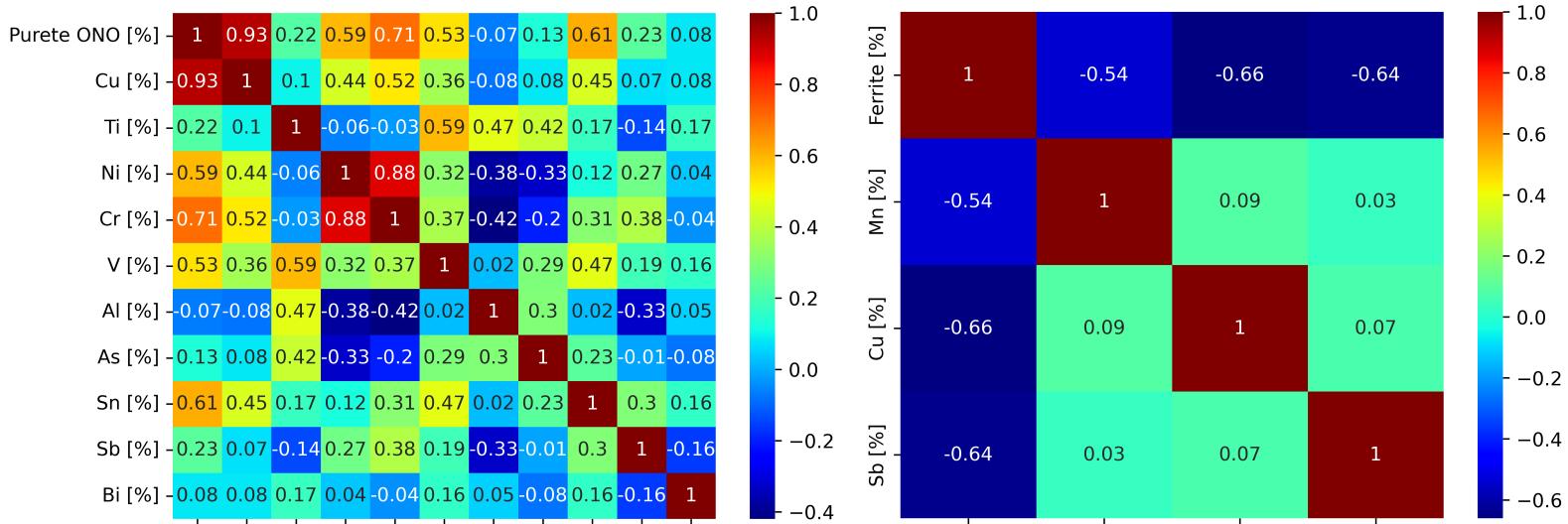


FIGURE 7 – Matrices de corrélation La Purete ONO et la ferrite avec leurs éléments chimique.

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

La Ferrite [Il y a une corrélation négative modérée avec Mn [Les autres éléments montrent des corrélations faibles ou négligeables avec la Ferrite, suggérant qu'ils n'ont pas un impact significatif sur celle-ci.

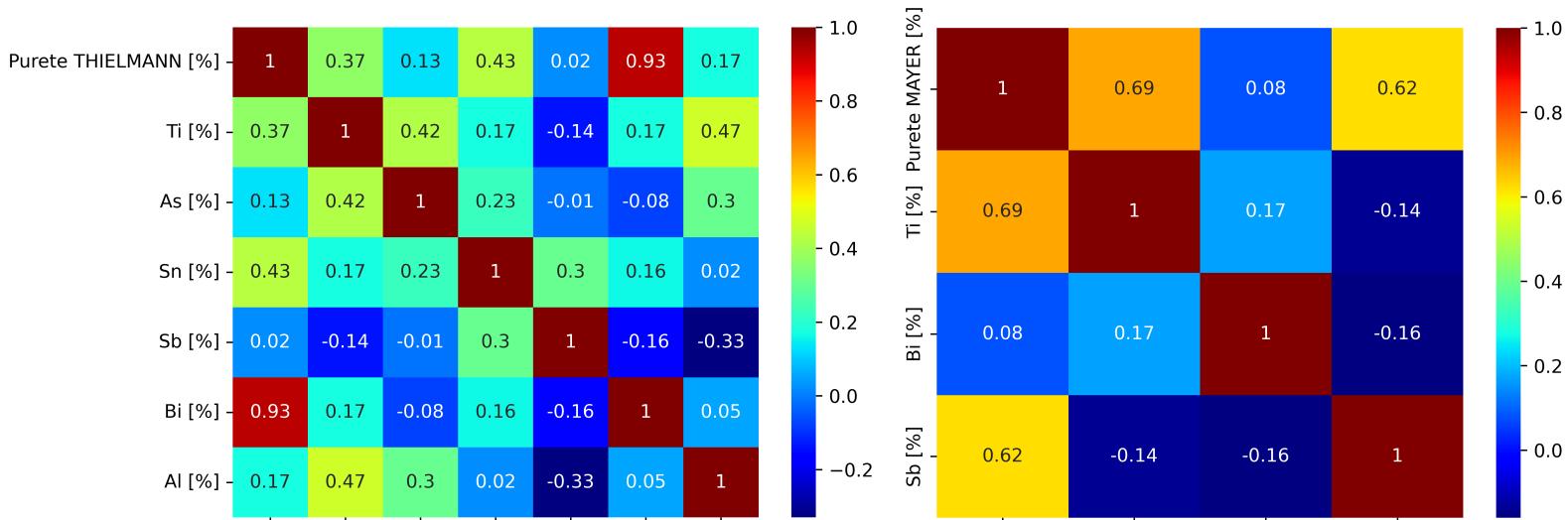


FIGURE 8 – Matrices de corrélation des éléments de la Pureté THIELMANN et de la Pureté MAYER.

La pureté THIELMANN [Il y a une corrélation positive modérée avec Sb [Les éléments comme Ti [

Sur Mayer : Il y a une forte corrélation positive entre Ti [Sur Mayer : Sb [

#### **Les indicateurs les plus pertinants**

- Impureté : 0.673506
- Pureté ONO : 0.583101

#### **Les éléments chimiques conservés**

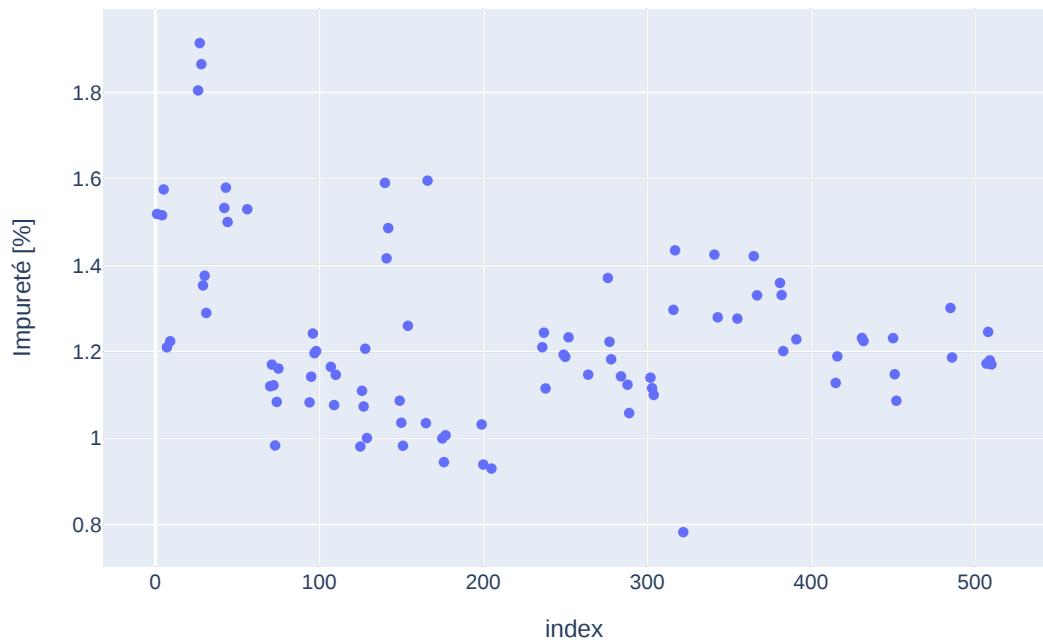
- Sn (Étain)
- Cu (Cuivre)
- Cr (Chrome)
- V (Vanadium)

## **2.5 Les valeurs extrêmes**

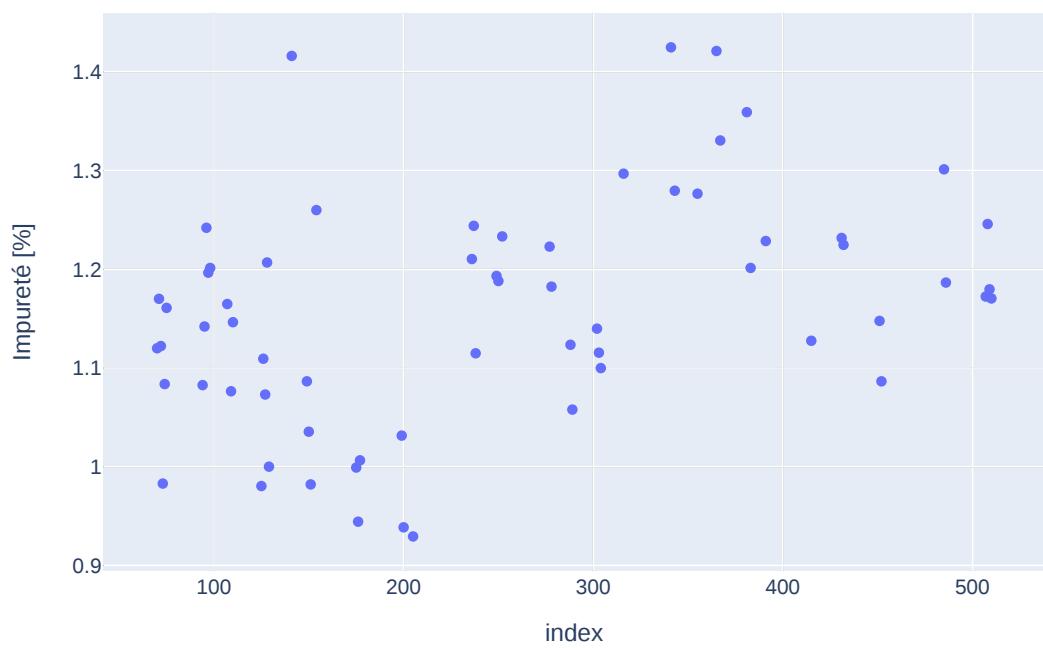
Pour améliorer la performance de la régression linéaire, nous procédons à la suppression des valeurs extrêmes basées sur les mesures d'impureté, de pureté ONO et de taux de ferrite. Voici la procédure suivie :

- **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.

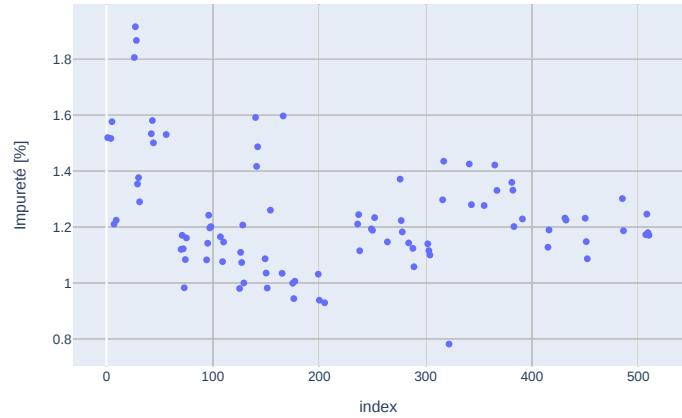
### L'impureté avec ses valeurs extrêmes



### L'impureté sans ses valeurs extrêmes



L'impureté avec ses valeurs extrêmes



L'impureté sans ses valeurs extrêmes

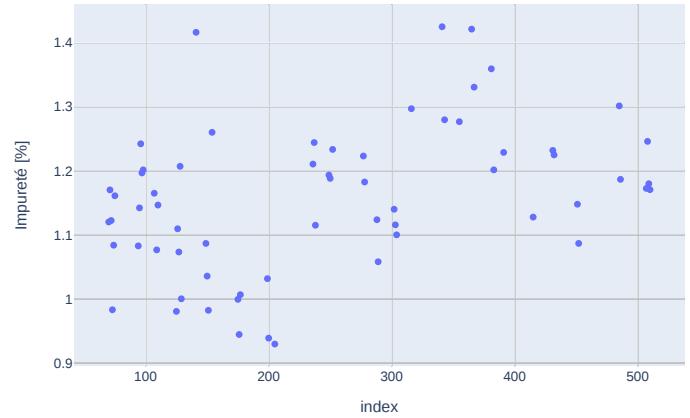


FIGURE 9 – Les valeurs extrêmes de l'impurité.

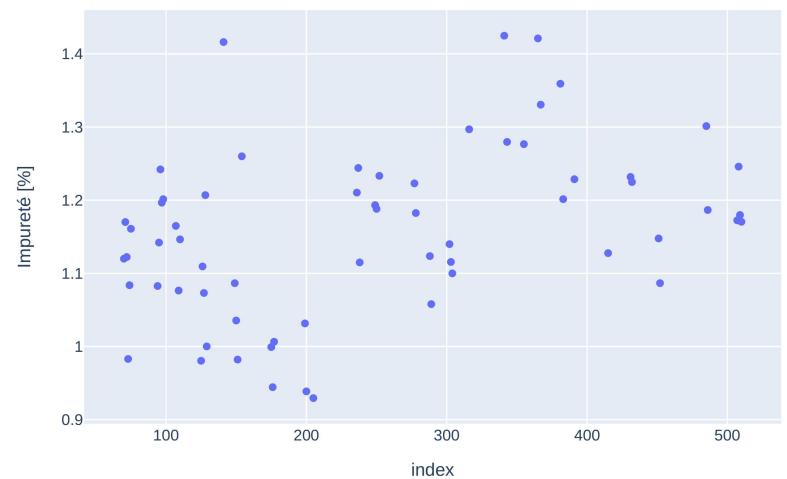
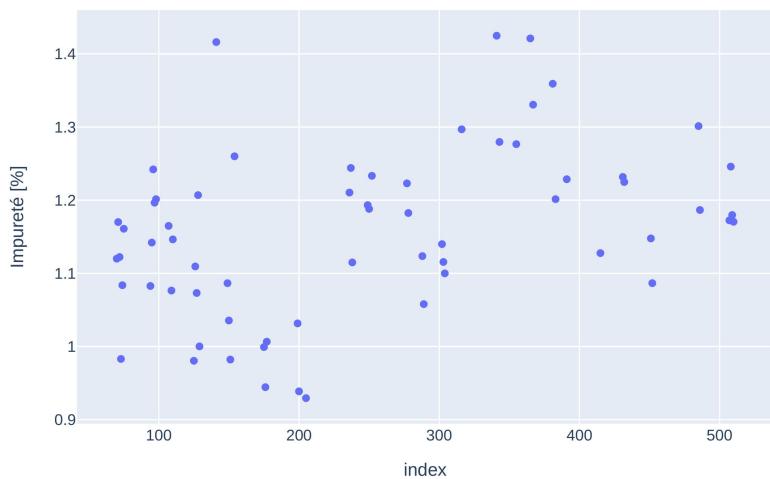
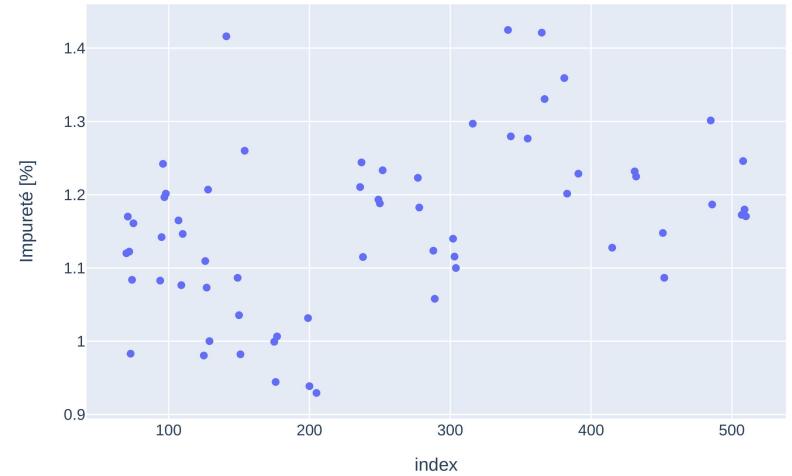
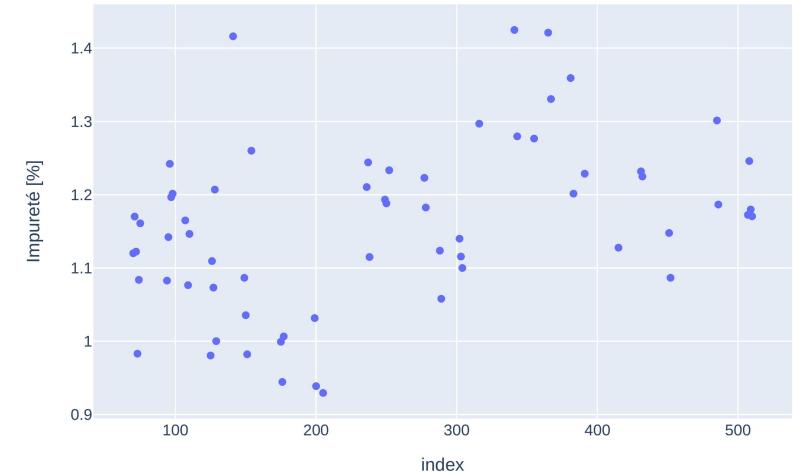


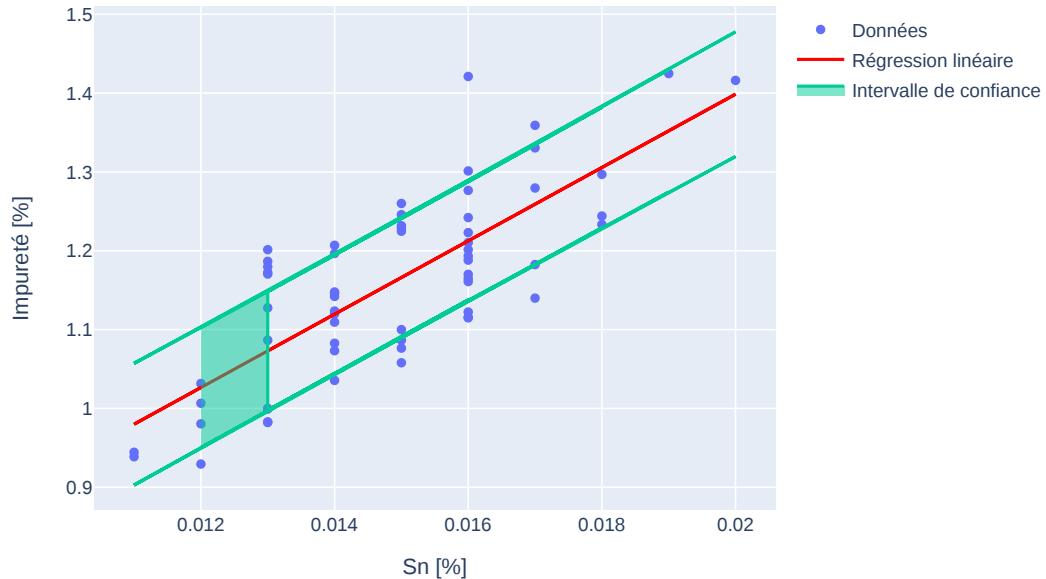
FIGURE 10 – Les valeurs extrêmes de l'impurité.



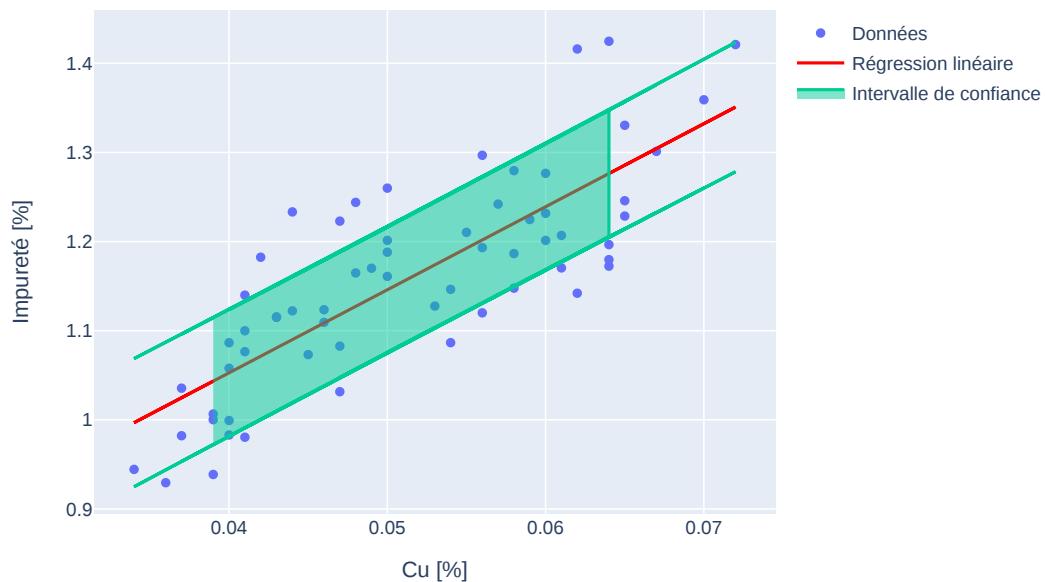
## 2.6 La régression linéaire

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

Régression linéaire avec intervalle de confiance



Régression linéaire avec intervalle de confiance



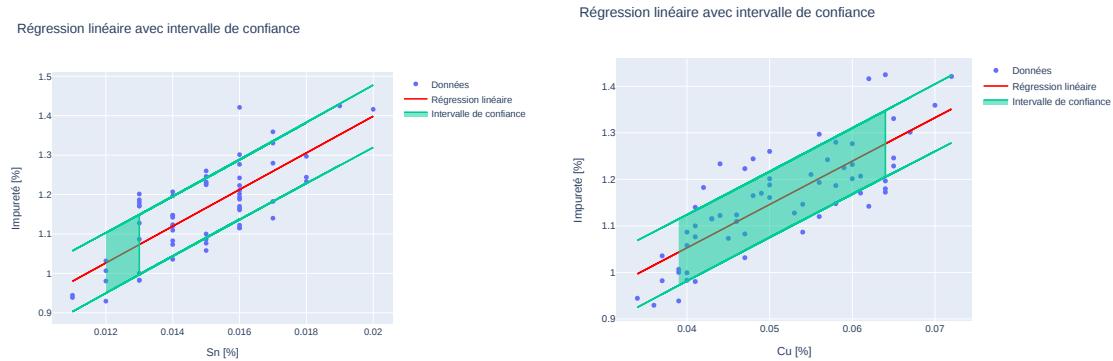


FIGURE 11 – Régressions des impuretés pour l’étain (Sn) et le cuivre (Cu).

La formule des intervalles de prédiction est donnée par :

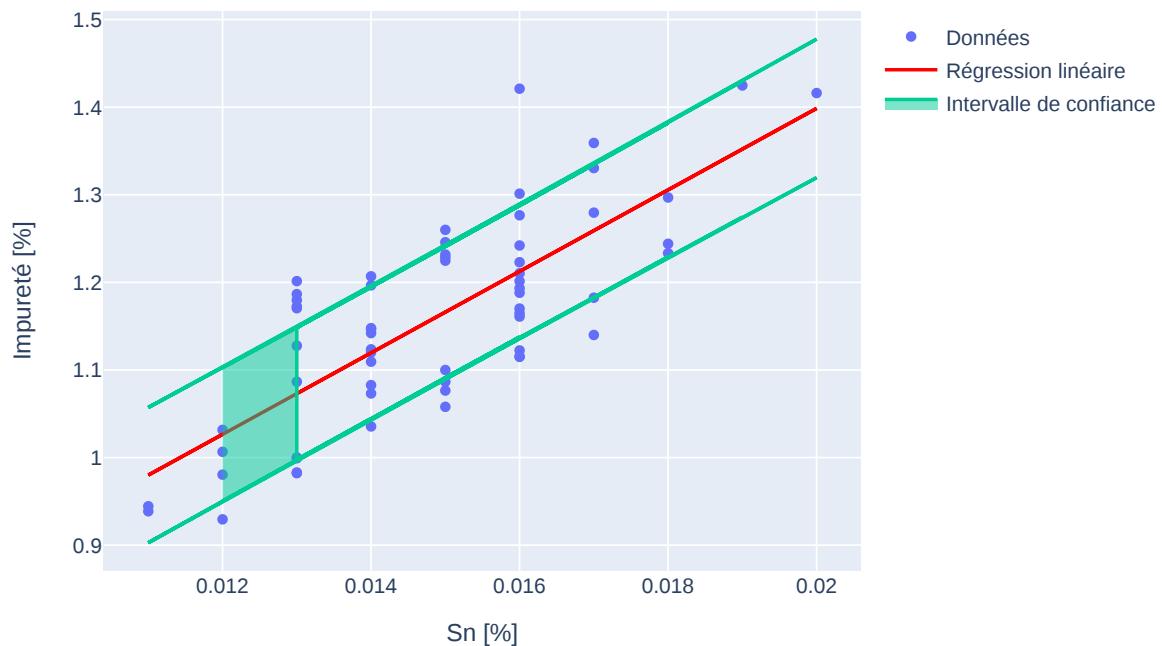
$$IP(y_{pred}) = [y_{pred} - n \cdot predict\_se, y_{pred} + n \cdot predict\_se]$$

Où :

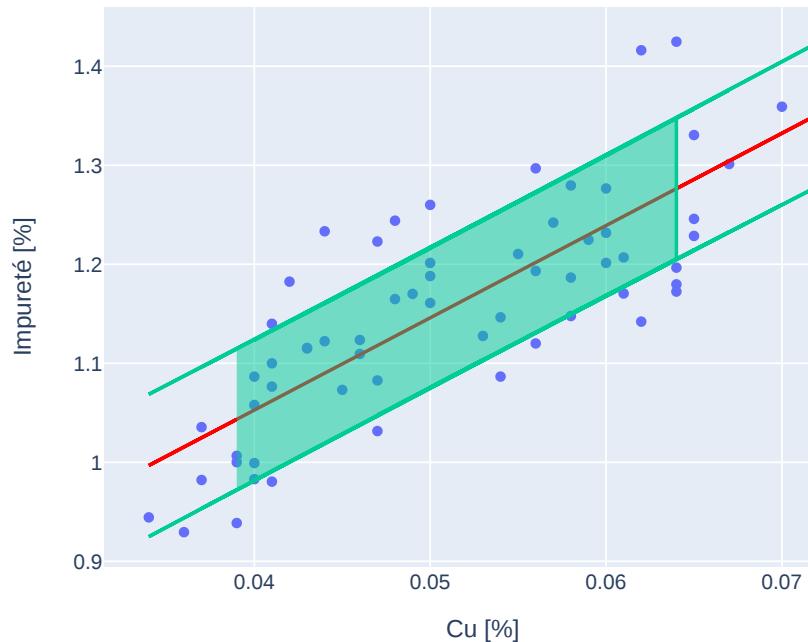
- $y_{pred}$  est la valeur prédictive.
- $predict\_se$  est l’écart-type de prédiction.
- $n$  est un entier naturel.

### L’impurité en fonction de l’étain (Sn)

## Régression linéaire avec intervalle de confiance



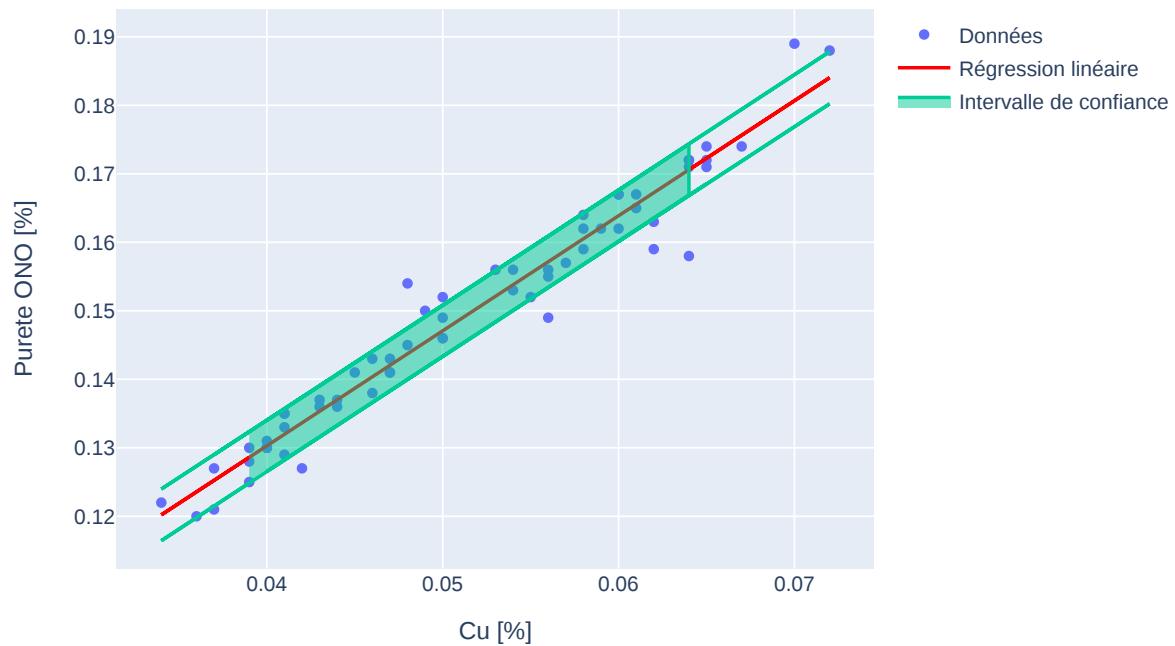
### Régression linéaire avec intervalle de confiance



L'impurité en fonction du cuivre (Cu)

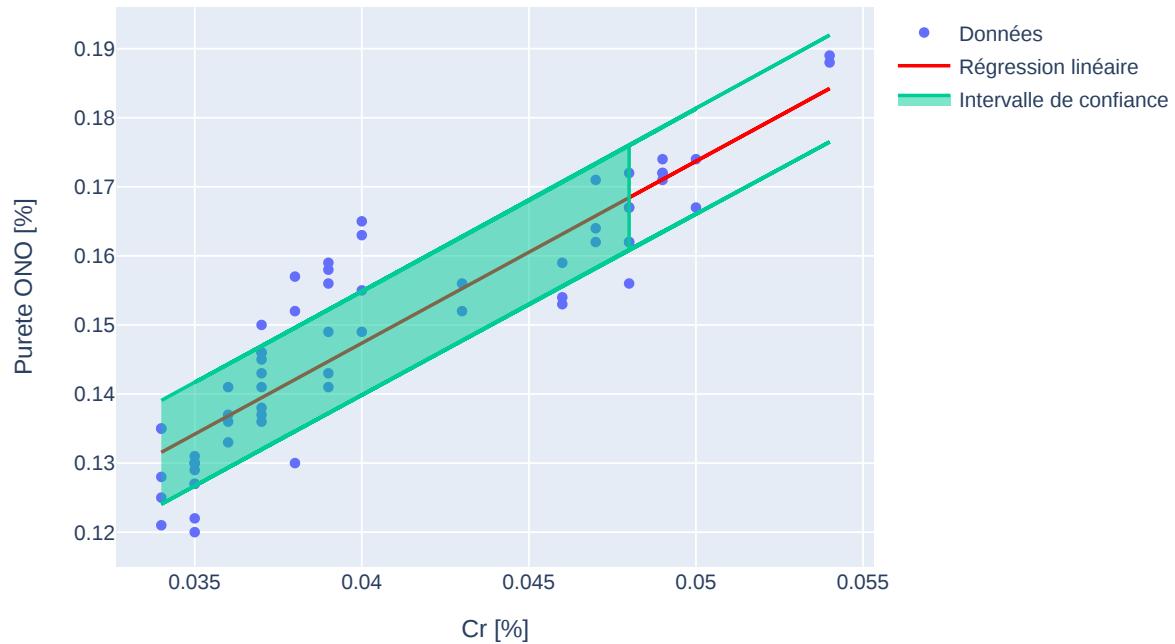
La pureté Ono en fonction du cuivre (Cu)

## Régression linéaire avec intervalle de confiance



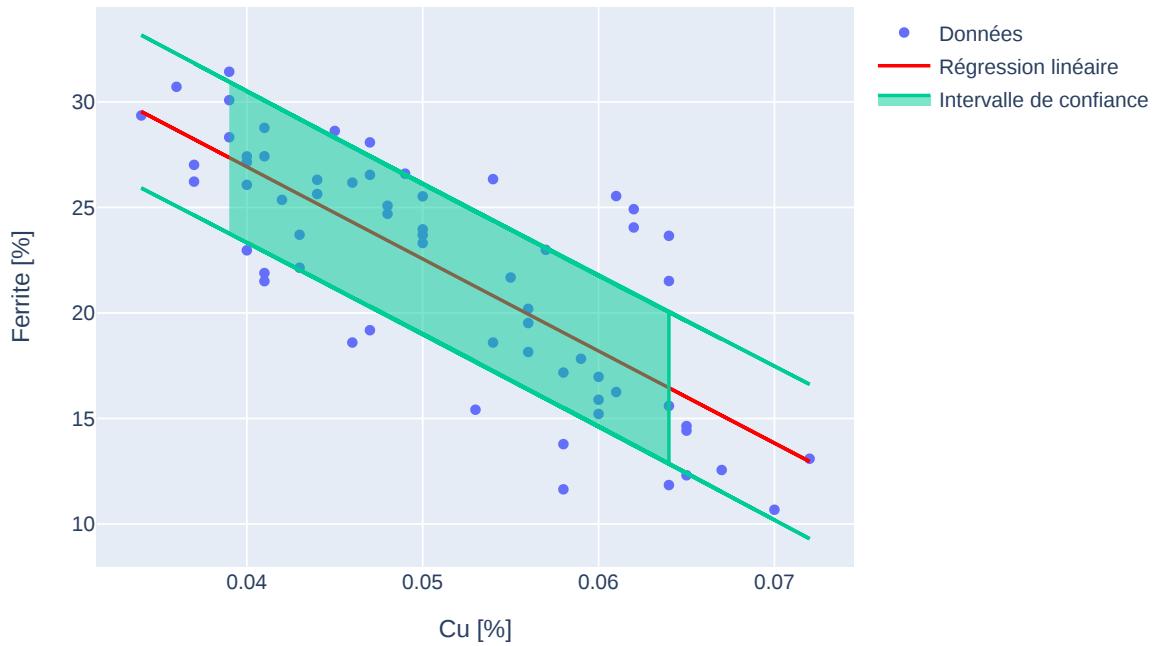
La pureté Ono en fonction du chrome (Cr)

## Régression linéaire avec intervalle de confiance



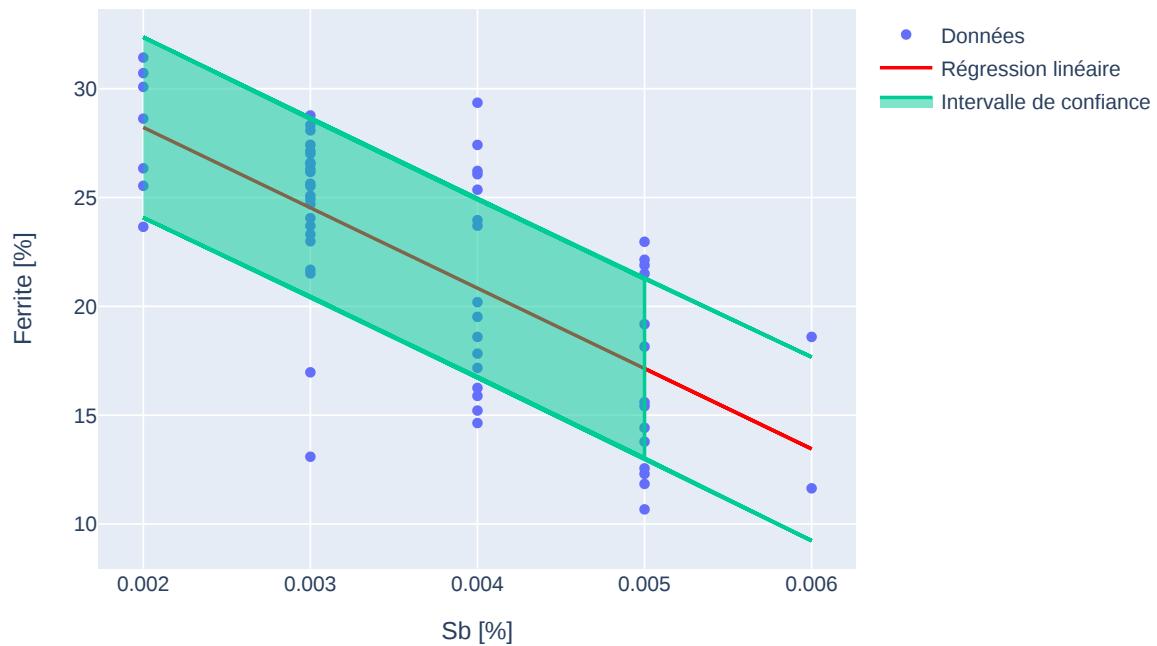
**La Ferrite en fonction du cuivre (Cu)**

## Régression linéaire avec intervalle de confiance



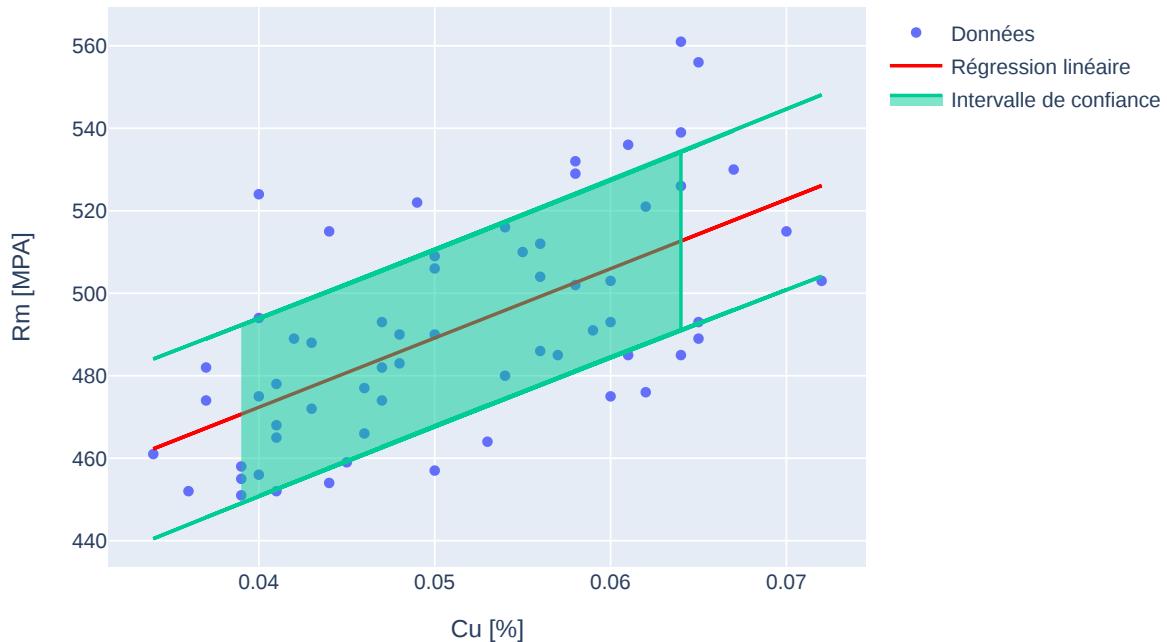
## La Ferrite en fonction de l'antimoine Sb

## Régression linéaire avec intervalle de confiance



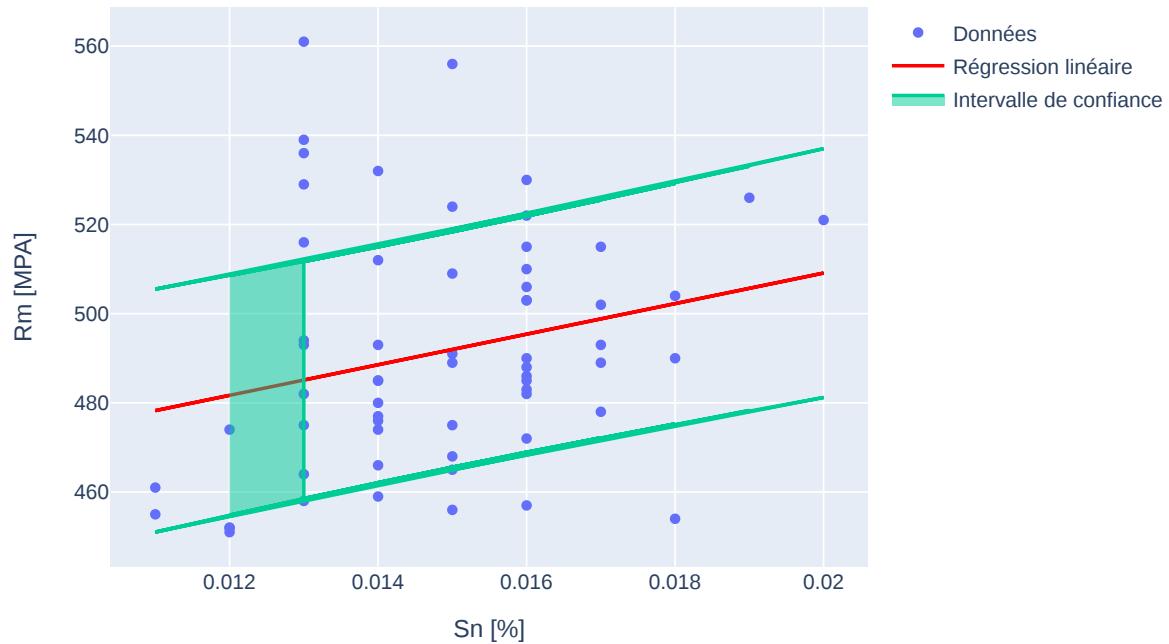
## La Résistance mécanique en fonction du Cuivre

## Régression linéaire avec intervalle de confiance



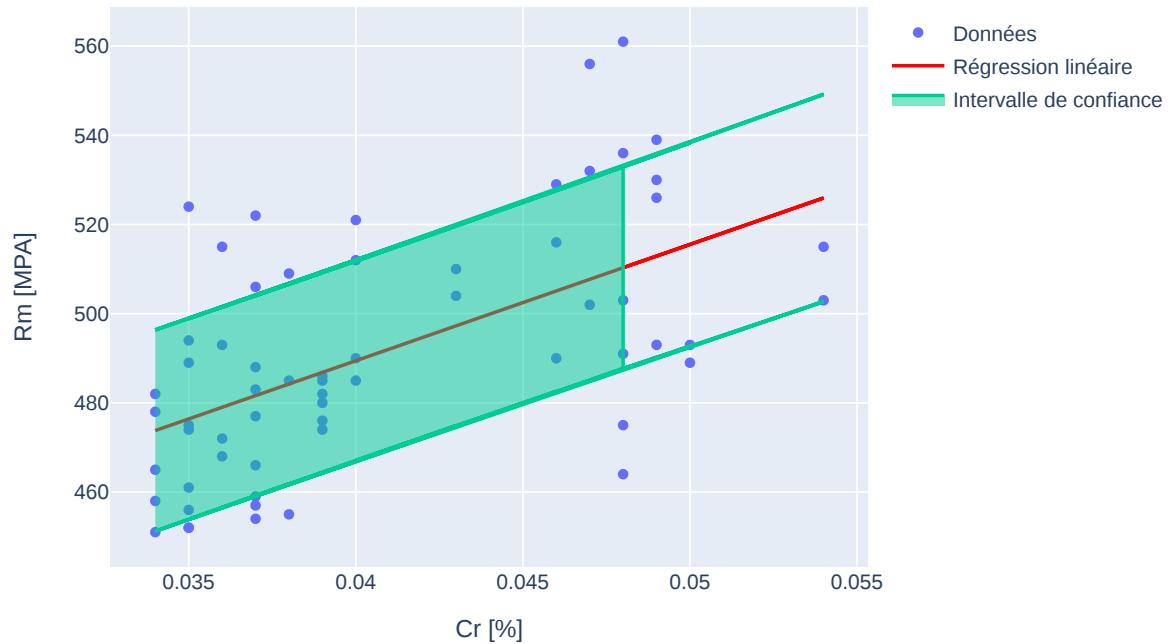
## La Résistance mécanique en fonction du Sn

## Régression linéaire avec intervalle de confiance



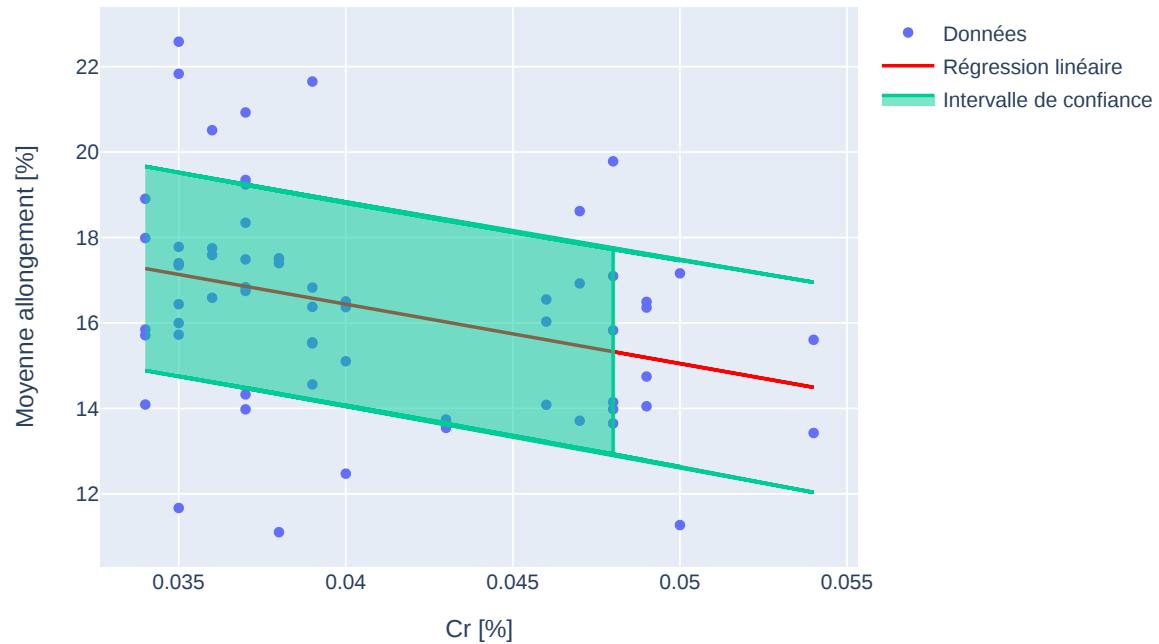
## La Résistance mécanique en fonction du Cr

## Régression linéaire avec intervalle de confiance



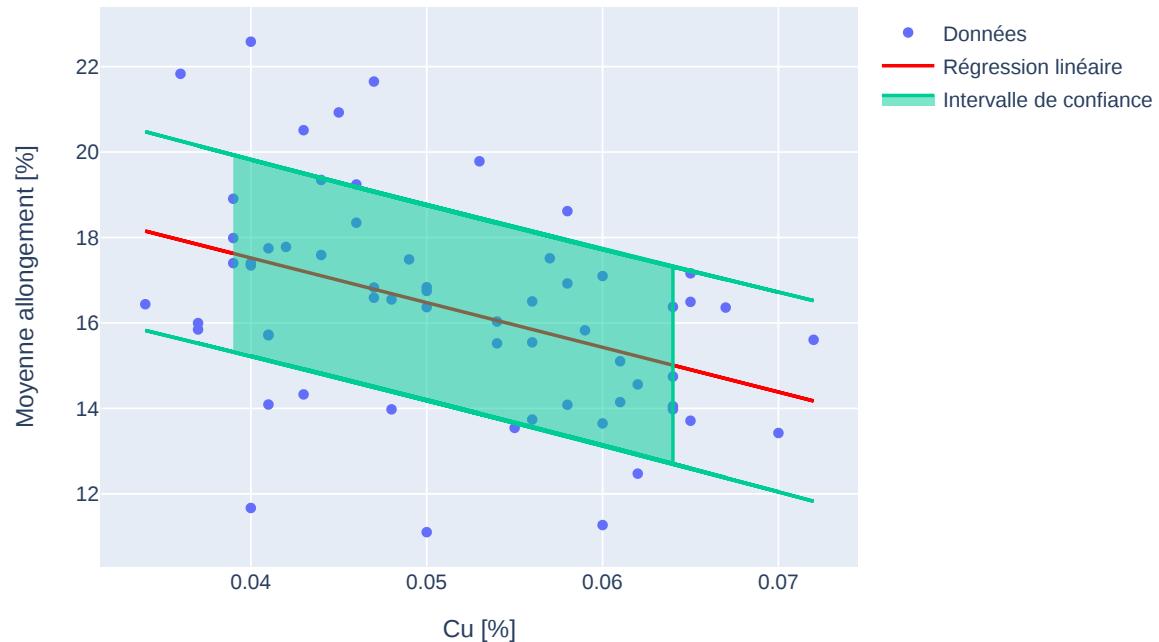
L'allongement en fonction du Cr

## Régression linéaire avec intervalle de confiance



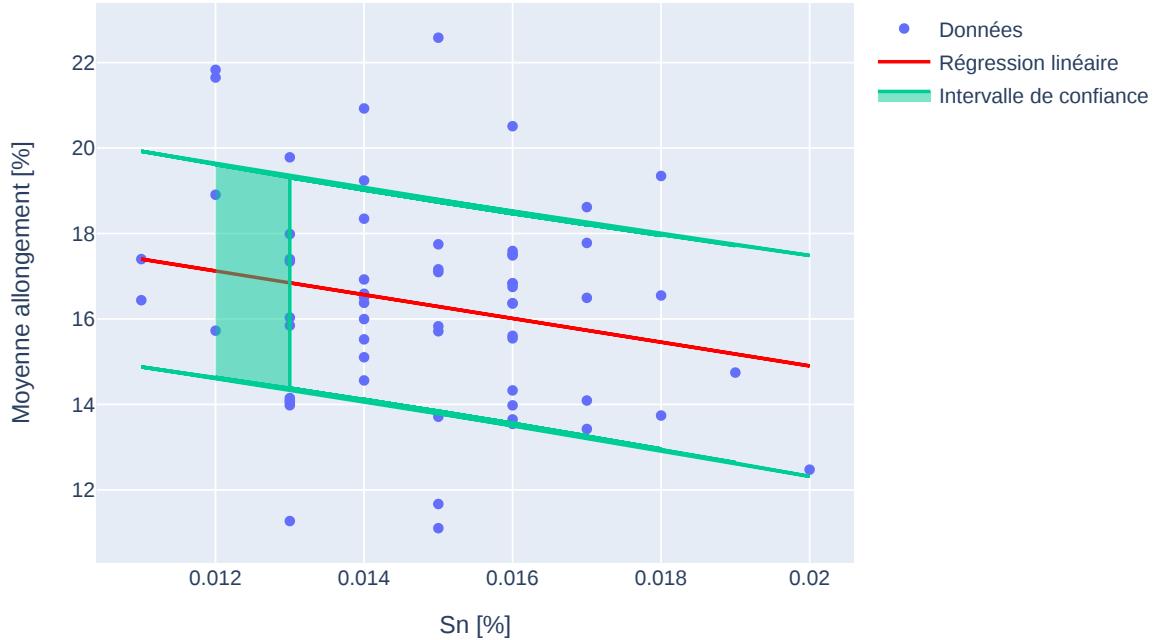
L'allongement en fonction du Cuivre

## Régression linéaire avec intervalle de confiance



L'allongement en fonction du Sn

## Régression linéaire avec intervalle de confiance



## 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 d'Optimisation

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 une 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 Modélisation du problème

Phase Tansitoire

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

Les différents étapes de la poche 1

## Processus de traitement de la poche 1

### Fours de Fusion



$F = 5000 \text{ kg}$

Durée total du traitement :  
10 minutes

Durée à partir du traitement GS :  
4 minutes

↓  
**Cabine de Fil fourrée**



$P1 = 1250 \text{ kg}$   
 $K1 = 0.0533 \%$

**Poche de coulée**



$P1 = 1250 \text{ kg}$   
 $K1 = 0.0533 \%$

**Fours de Coulée**



$C_{\max} = 5000 \text{ kg}$   
 $C_{\min} = 2500 \text{ kg}$   
 $K_{\min} = 0.035 \%$   
 $K_{\max} = 0.045 \%$

### Légende :

$F$  : Masse fonte disponible dans le four de Fusion.

$K1$  : Pourcentage de Magnésium dans la poche de traitement/coulée.

$K_{\min}, K_{\max}$  : Pourcentage de Magnésium minimal et maximal dans le four de coulée.

$P1$  : Masse fonte dans la poche de traitement/coulée.

$C_{\min}, C_{\max}$  : Masse fonte minimal et maximale dans le four de coulée.

## Processus de traitement de la poche 1

### Fours de Fusion



$F = 5000 \text{ kg}$

Durée total du traitement :  
10 minutes

Durée à partir du traitement GS :  
4 minutes

### Cabine de Fil fourrée



$P1 = 1250 \text{ kg}$   
 $K1 = 0.0533 \%$

### Poche de coulée



$P1 = 1250 \text{ kg}$   
 $K1 = 0.0533 \%$

### Fours de Coulée



$C_{\max} = 5000 \text{ kg}$   
 $C_{\min} = 2500 \text{ kg}$   
 $K_{\min} = 0.035 \%$   
 $K_{\max} = 0.045 \%$

### Légende :

$F$  : Masse fonte disponible dans le four de Fusion.

$K1$  : Pourcentage de Magnésium dans la poche de traitement/coulée.

$K_{\min}, K_{\max}$  : Pourcentage de Magnésium minimal et maximal dans le four de coulée.

$P1$  : Masse fonte dans la poche de traitement/coulée.

$C_{\min}, C_{\max}$  : Masse fonte minimal et maximale dans le four de coulée.

### Processus de traitement de la poche 3

#### Fours de Fusion



$F = 5000 \text{ kg}$

Durée total du traitement :  
10 minutes

Durée à partir du traitement GS :  
4 minutes

Cabine de Fil fourrée



$P1 = 1250 \text{ kg}$   
 $K1 = 0.0533 \%$

Poche de coulée



$P1 = 1250 \text{ kg}$   
 $K1 = 0.0533 \%$

Fours de Coulée



$C_{\max} = 5000 \text{ kg}$   
 $C_{\min} = 2500 \text{ kg}$   
 $K_{\min} = 0.035 \%$   
 $K_{\max} = 0.045 \%$

Coulée



$C = 1250 \text{ kg}$   
 $K = 0.049 \%$

#### Légende :

$F$  : Masse fonte disponible dans le four de Fusion.

$K1$  : Pourcentage de Magnésium dans la poche de traitement/coulée.

$K_{\min}, K_{\max}$  : Pourcentage de Magnésium minimal et maximal dans le four de coulée.

$C$  : Masse fonte dans le four de coulée.

$P1$  : Masse fonte dans la poche de traitement/coulée.

$K$  : Pourcentage de Magnésium dans le four de coulée.

$C_{\min}, C_{\max}$  : Masse fonte minimal et maximale dans le four de coulée.

TABLE 1 – Tableau 1.5 : Composition chimique des fontes GS (ADI) [26]

Nuance	Carbone [%]
GS 400-15	3.50-4.00
GS 450-10	3.50-4.00

### 3.3 La méthode du simplexe

### 3.4 Mise en oeuvre de la méthode du simplexe

LE prix du fil Fourre en metre est de ...

## 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