

Optimisation des coûts de production

30/08/2024

Présenté par
Congo Job

Encadrant industriel **Guy LUTRINGER**

Responsable universitaire **Christophe
PRUD'HOMME**



Mathématiques de l'Innovation

- 1 Introduction
- 2 L'étude statistique
- 3 La recette optimale
- 4 La sphéroïdisation
- 5 Conclusion

Outline

- 1 Introduction
- 2 L'étude statistique
 - Les données
 - Les indicateurs
 - La régression linéaire
- 3 La recette optimale
 - Présentation du problème
 - Modélisation du problème
 - Résultats
- 4 La sphéroïdisation
 - Présentation du problème
- 5 Conclusion

Objectifs du stage

Les missions confiées au cours du stage 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.

L'étude statistique

- Nous disposons de :
 - 2 mesures normatives :
 - La résistance mécanique en MPA.
 - L'allongement en pourcentage.
 - La composition chimique de la fonte obtenues grâce au spectromètre.
 - 5 indicateurs de qualité, qui sont des combinaisons d'éléments chimiques.
- Objectifs :
 - 1 Evaluer la pertinence des 5 indicateurs de qualité à la vue des 2 mesures normatives.
 - 2 Sélectionner les meilleurs indicateurs de qualité et donner leurs intervalles de prédiction.

Les données brutes

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

Les données nettoyées

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

Les indicateurs

- Evaluons 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 :

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

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

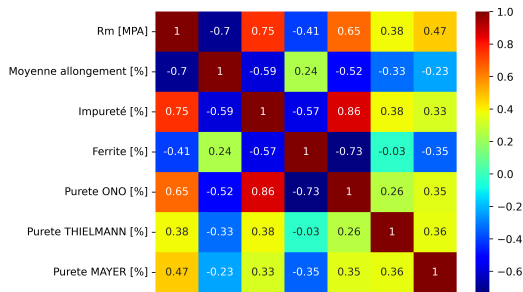
$$\begin{aligned} \text{Pureté ONO \%} = & \text{Cu \%} + \text{Ti \%} + \text{Ni \%} + \text{Cr \%} + \text{V \%} + \text{Al \%} + \text{As \%} + \text{Sn \%} + \text{Pb \%} + \text{Sb \%} \\ & + \text{Bi \%} \end{aligned}$$

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

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

Évaluation des indicateurs

Corrélation entre les indicateurs et les mesures normatives



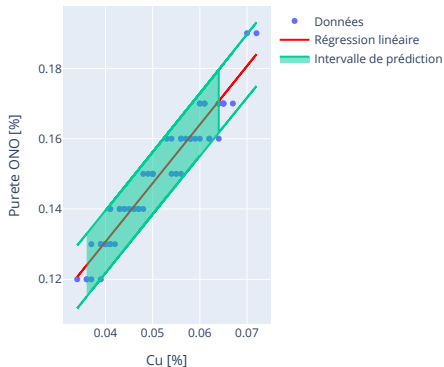
Classement des indicateurs :

- Impureté [%] : 0.673506
- Pureté ONO [%] : 0.583101
- Pureté THIELMANN [%] : 0.353988
- Pureté MAYER [%] : 0.346637
- Ferrite [%] : 0.327601

Impureté

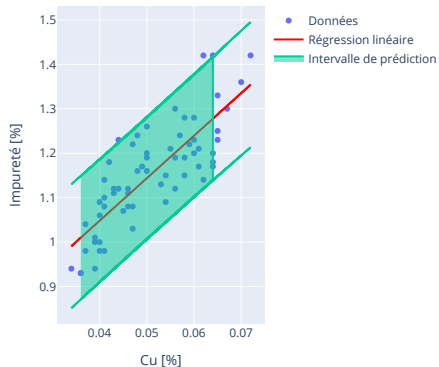
La pureté Ono en fonction du cuivre

Évolution de la pureté ONO [%] en fonction de Cu [%]



L'impureté en fonction du cuivre (Cu)

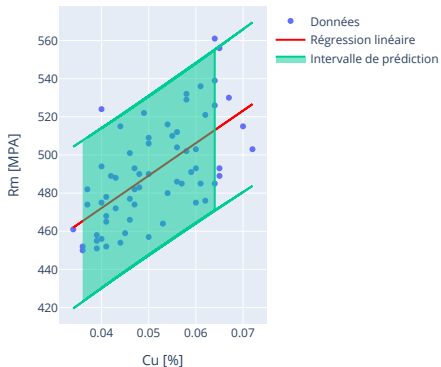
Évolution de l'impureté [%] en fonction de Cu [%]



Rm

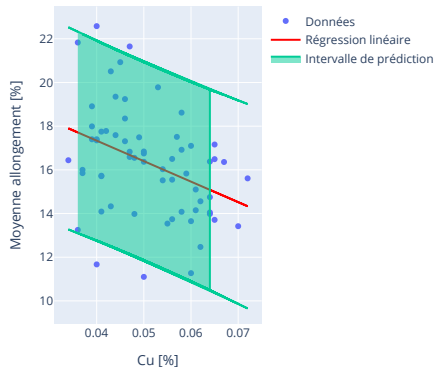
La résistance mécanique en fonction du Cuivre

Évolution de la Rm [MPa] en fonction de Cu [%]



L'allongement en fonction du Cuivre

Évolution de l'allongement [%] en fonction de Cu [%]



Conclusion

Nous constatons une corrélation linéaire entre le cuivre et la résistance mécanique. 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]

Outline

- 1 Introduction
- 2 L'étude statistique
 - Les données
 - Les indicateurs
 - La régression linéaire
- 3 **La recette optimale**
 - Présentation du problème
 - Modélisation du problème
 - Résultats
- 4 La sphéroïdisation
 - Présentation du problème
- 5 Conclusion

La recette optimale

- **Objectif** : Déterminer le lit de fusion qui minimise les coûts de production tout garantissant une fonte de qualité.
- **Matières premières** :
 - Environ une trentaine de matières premières sont utilisées pour la fusion.
 - Certaines matières premières sont disponibles en quantité limitée.
 - La quantité et le prix des matières premières varient souvent.
- **Composition chimique** :
 - Chaque matière première possède une composition chimique.
 - La qualité est évaluée en fonction du niveau d'impuretés et de la pureté ONO, obtenus à l'aide des pourcentages d'éléments chimiques.

Première formulation du problème

La première formulation consiste à résoudre le problème suivant :

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

sous les contraintes :

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

où :

- $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^m$: Vecteur des coûts des matières premières.
- $\mathbf{x} \in [0, 1]^m$: Vecteur des proportions des matières premières.
- $\mathbf{A}_{ub} \in \mathbb{R}^{r \times m}, \mathbf{A}_{eq} \in \mathbb{R}^{k \times m}$: Matrices des contraintes.
- $\mathbf{b}_{ub} \in \mathbb{R}^r, \mathbf{b}_{eq} \in \mathbb{R}^k$: Vecteurs des contraintes.

Deuxième formulation du problème

La deuxième formulation consiste à résoudre le problème suivant :

$$\min_{\mathbf{x}} \mathbf{C} \cdot \mathbf{x} - \sum \mathbf{s}_i$$

sous les contraintes :

$$\begin{cases} \mathbf{A}_{eq} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{b}_{eq} \\ \mathbf{A}_{ub} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{s} = \mathbf{b}_{ub} \end{cases}$$

où :

- $\mathbf{s}$: Vecteur des variables d'écart avec $\mathbf{s}_i \geq 0$.
- $\mathbf{x} \in [0, 1]^m$: Vecteur des proportions des matières premières.
- $\mathbf{A}_{ub} \in \mathbb{R}^{r \times m}, \mathbf{A}_{eq} \in \mathbb{R}^{k \times m}$: Matrices des contraintes.
- $\mathbf{b}_{ub} \in \mathbb{R}^r, \mathbf{b}_{eq} \in \mathbb{R}^k$: Vecteurs des contraintes.

Contraintes qualités de la GS 450-10

		Composant		Impurété	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

Recette de fonderie pour la GS 450-10

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

Recette du simplexe 1 pour la GS 450-10

Article	Prix	Proportion	Valeur (/T)	ONO	Impurete	C	Si	Mn	Cu
13. Retour Bleu	530,00 €	62,84%	333,05 €			3,650	2,640	0,220	0,060
FDN0609. FONTE D'AFFINAGE	530,00 €	18,20%	96,44 €			4,250	0,763	0,038	0,001
FDN0172. Frites Mn	507,00 €	17,07%	86,57 €			0,100	0,016	0,350	0,020
FDN0184. Disque	430,00 €	1,35%	5,80 €			3,500	1,900	0,450	0,200
FDN1089. CARBONE 99.05 5-10MM	954,00 €	0,44%	4,16 €			96,040	0,000	0,000	0,000
92655248. ferro silicum 75 en vrac	1 520,00 €	0,10%	1,57 €			0,000	71,250	0,000	0,000

Résultats 100,00% 527,60 € 0,1490 1,0671 3,5500 1,9000 0,2110 0,0440

Cr	P	Ni	Mo	Sn	Sb	Al	S	Mg	Pb	Ti	As	Bi	V
0,050	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
0,019	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
0,032	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
0,160	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
0,000	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	0,000
0,0425	0,0255	0,0084	0,0077	0,0128	0,0080	0,0147	0,0120	0,0323	0,0013	0,0088	0,0013	0,0011	0,0063

Recette du simplexe 2 pour la GS 450-10

Article	Prix	Proportion	Valeur (/T)	ONO	Impurete	C	Si	Mn	Cu
FDN0609. FONTE D'AFFINAGE	530,00 €	52,94%	280,57 €			4,250	0,763	0,038	0,001
FDN1204. FRITE HAUT SILICIUM	500,00 €	24,95%	124,75 €			0,100	3,000	0,150	0,125
FDN0184. Disque	430,00 €	19,15%	82,33 €			3,500	1,900	0,450	0,200
FDN0172. Frites Mn	507,00 €	1,80%	9,13 €			0,100	0,016	0,350	0,020
FDN1089. CARBONE 99.05 5-10MM	954,00 €	0,63%	5,99 €			96,040	0,000	0,000	0,000
92655248. ferro silicum 75 en vrac	1 520,00 €	0,54%	8,18 €			0,000	71,250	0,000	0,000

Résultats 100,00% 510,95 € 0,1692 1,2152 3,5500 1,9000 0,1500 0,0704

Cr	P	Ni	Mo	Sn	Sb	Al	S	Mg	Pb	Ti	As	Bi	V
0,019	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
0,035	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
0,160	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
0,032	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	0,000	0,000

0,0500 0,0246 0,0045 0,0040 0,0150 0,0035 0,0114 0,0424 0,0024 0,0032 0,0069 0,0018 0,0027 0,0000

Résultats

Table 1: Comparaison des prix des recettes

Recette	Fonderie	Simplexe 1	Simplexe 2
GS 400-15	530,79	533,38	529,09
GS 450-10	533,82	527,60	510,95
GS 500-7	504,24	532,16	523,58
GS 600-3	523,02	534,89	534,89

- Les prix obtenus par l'algorithme du simplexe montrent des différences notables par rapport aux prix actuels en fonderie.
- **Interprétation des résultats :**
 - **Simplexe 1 :** Privilégie une approche économique, réduisant les coûts tout en maintenant une qualité acceptable.
 - **Simplexe 2 :** Vise une qualité supérieure, ce qui entraîne des coûts légèrement plus élevés dans certains cas, mais optimise la performance des recettes.

Outline

- 1 Introduction
- 2 L'étude statistique
 - Les données
 - Les indicateurs
 - La régression linéaire
- 3 La recette optimale
 - Présentation du problème
 - Modélisation du problème
 - Résultats
- 4 La sphéroïdisation
 - Présentation du problème
- 5 Conclusion

Présentation du Problème

Contexte

- On souhaite optimiser la fonte à graphite sphéroïdal (GS) produite sur la ligne de moulage DISAMATIC.
- Le processus de sphéroïdisation implique l'ajout de magnésium (Mg) pour atteindre des propriétés spécifiques.

Objectifs Principaux

- 1 **Optimisation de la Longueur de Fil Fourré** : Déterminer la longueur de fil fourré optimale à mettre dans chaque poche de traitement.
- 2 **Gestion du Lancement des Poches de Traitement** : Planifier le lancement de chaque poche de traitement en fonction du rythme de production des moules.

Le traitement de la poche 1

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

**Traitement 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

**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 %

Outline

- 1 Introduction
- 2 L'étude statistique
 - Les données
 - Les indicateurs
 - La régression linéaire
- 3 La recette optimale
 - Présentation du problème
 - Modélisation du problème
 - Résultats
- 4 La sphéroïdisation
 - Présentation du problème
- 5 Conclusion

Conclusion du stage

Les principales conclusions de ce stage sont les suivantes :

- **Étude statistique** : Cette phase a permis d'identifier les critères pour évaluer la qualité de la fonte, malgré des résultats partiellement limités par le manque de données.
- **Optimisation des recettes** : L'algorithme du simplexe a été efficace pour automatiser la détermination des recettes optimales, ouvrant la voie à des applications futures axées sur la réduction des coûts et l'amélioration de la qualité.
- **Sphéroïdisation** : Une analyse plus approfondie est nécessaire pour combler l'écart observé entre les données théoriques et pratiques dans l'optimisation du processus de sphéroïdisation, notamment concernant la longueur du fil fourré et le timing de traitement.

Merci pour votre attention !

- [1] F. de Niederbronn, "Site web de la fonderie de niederbronn."
<https://www.fonderie-de-niederbronn.com/>.
- [2] A. Reynaud, *Oligo-éléments & fontes*.
ETIF, 2009.
- [3] S. Haddadi, *Programmation linéaire - Une approche mathématique et algorithmique*, vol. 1 of *Références sciences*.
Ellipses, 2021.
- [4] J.-F. Scheid, "Cours de graphes et recherche opérationnelle." https://scheid.perso.math.cnrs.fr/Enseignement/coursGRO_PL.pdf,
n.d.
- [5] C. T. 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)," tech. rep., June 1972.

- [6] Sorelmetal, *Principes et applications de l'analyse des fontes et Méthodes d'analyse des fontes*.
2005.
- [7] F. Kootz, "Les fours à induction, aspects métallurgiques au four," 2023.
- [8] Sorelmetal, "Fonte à graphite sphéroïdal (fonte gs)."
https://www.soudeurs.com/telechargements/130-sorelmetal_fonte_gs_Deddi-Fr.pdf.
- [9] R. Jday, *Caractérisation microstructurale du graphite sphéroïdal formé lors de la solidification et à l'état solide*.
PhD thesis, Université Toulouse, 2017.
Disponible en ligne : https://theses.hal.science/tel-04228112v1/file/JDAY_Rawen.pdf.