

PROJET IMP

Equipe 11-B

Clément DUMERIL
Louca DESRUES
Arthur BONVALET
Walim BARKALLAH
Tom CORMERY

SOMMAIRE

I. Introduction

II. Matériels et méthodes

1. Fonderie
2. Matériaux
3. Usinage
4. Métrologie
5. Plan d'expérience

III. Résultats et discussions

1. Fonderie
2. Matériaux
3. Usinage
4. Métrologie
5. Plan d'expérience

IV. Conclusion

V. Bibliographie

I. Introduction

L'interaction entre matériaux et procédés est un aspect crucial dans le domaine de la fabrication industrielle. Cette synergie est particulièrement pertinente lorsqu'il s'agit de sélectionner les matériaux et les techniques de fabrication adaptés pour répondre aux besoins spécifiques d'un produit. Dans l'industrie, cette interaction est exploitée pour optimiser la fonctionnalité des produits, comme dans le cas des composites.

Notre projet s'attache à explorer cette dynamique au sein des **alliages d'aluminium et de silicium**. Plus précisément, notre équipe, le TP11-B, se concentre sur l'étude de **l'alliage AlSi7 enrichi en strontium et soumis à un refroidissement rapide**. Nous examinerons comment les processus de fonderie et d'usinage interagissent avec cet alliage spécifique pour améliorer ses caractéristiques finales.

La question centrale de notre recherche est de déterminer comment les choix de matériaux et de procédés affectent les propriétés de la pièce finie. Nous visons à mesurer et analyser des paramètres tels que le **temps de refroidissement**, la composition de la **microstructure** et la **rugosité**, en observant leurs variations sous différentes conditions d'**usinage**. Ces données seront cruciales pour comprendre comment optimiser les paramètres de production industrielle.

Notre projet se distingue par la comparaison de notre **alliage AlSi7Sr en refroidissement rapide** avec d'autres alliages d'AlSi étudiés par différentes équipes. Cette approche collaborative met en lumière les caractéristiques uniques et les avantages de chaque alliage, offrant une vision globale de la performance de divers alliages dans différents processus de fabrication et d'usinage.

L'aluminium a connu une évolution remarquable depuis sa découverte. Initialement précieux au XIXe siècle en raison de sa rareté et de la complexité de sa production [1], il est tout d'abord extrait de la bauxite, sous forme d'alumine que l'on transforme en aluminium via électrolyse. Il est aujourd'hui largement utilisé dans divers secteurs, notamment dans l'automobile pour l'allègement des véhicules [3]. Cette transition est due en grande partie à ses propriétés uniques telles que la **légèreté**, la **résistance** à la **corrosion** et la **conductibilité**. Ces caractéristiques rendent l'aluminium et ses alliages, comme l'AlSi, indispensables dans les industries modernes, en particulier pour répondre aux exigences environnementales et d'efficacité énergétique.

L'introduction de l'alliage AlSi7 traité par refroidissement rapide est une avancée majeure dans l'optimisation des alliages Al-Si [3]. Le refroidissement rapide améliore considérablement la microstructure de l'alliage. Ces améliorations structurales se traduisent par une augmentation notable de la résistance mécanique et de la résistance à la fatigue, des qualités essentielles pour les composants soumis à des contraintes élevées dans des secteurs tels que **l'automobile et l'aéronautique** [1][2]. La combinaison de ces propriétés améliorées ouvre la voie à de nouvelles applications, tout en renforçant l'efficacité et la durabilité des composants fabriqués à partir de cet alliage.

En conclusion, les alliages Al-Si, en particulier l'AlSi7 traité par refroidissement rapide, représentent un jalon important dans le développement des matériaux pour des applications industrielles avancées. Les améliorations continuent dans leur composition et leur traitement, soulignées dans les études [2][3], témoignent de l'engagement de l'industrie à optimiser la performance et la durabilité des matériaux. Ces avancées répondent non seulement aux exigences techniques croissantes mais contribuent également à une approche plus durable et efficace en matière de production et d'utilisation de ressources dans divers secteurs.

Au cours de ce projet, nous examinerons les propriétés des matériaux et les paramètres des procédés à chaque étape. **La fonderie** servira à créer la pièce et à surveiller la température de l'alliage. Nous évaluerons ensuite la composition, la dureté et la microstructure de la pièce en **matériaux**. L'analyse des paramètres d'**usinage** nous permettra de préciser les conditions de coupe. Nous mesurerons ensuite les rugosités en fonction de différentes vitesses et avances de coupe en **métrologie**. Finalement, en utilisant **un plan d'expérience**, nous analyserons les

données collectées pour déterminer l'impact de ces paramètres sur la rugosité de la pièce. Une conclusion mettra en lumière les faits et méfaits de ces procédés dans le cas de notre pièce.

II. Matériels et méthodes

1. Fonderie

L'objectif de la séance de fonderie était de couler **trois pièces** composées d'**aluminium**, de **7% de silicium** et du **strontium**. L'une sera soumise à un **refroidissement rapide**, l'autre à un **refroidissement lent**. Ces pièces ont une forme de parallélépipède rectangle. La troisième pièce aura pour objectif de visualiser **la coulabilité de notre alliage**, sous la forme d'une **spirale**.

Afin de réaliser les pièces, nous avons effectué des moules par le procédé de **moulage en machine**. Un moule pour la partie inférieure de la pièce et un autre pour la partie supérieure. Elles sont mises en position à l'aide de deux goujons. Le matériau utilisé pour la réalisation des moules est du **sable vert** (ou sable silico-argileux) composé d'argile, de silice, de graphite et d'eau.

Le procédé de moulage en machine consiste à placer le châssis sur le support de la machine à secousse pression (fig. 1). On tamise dans un premier temps le sable afin d'obtenir une surface optimale. Ensuite, on remplit grossièrement en secouant le sable pour qu'il recouvre toute la surface. Une fois rempli, on tasse le sable. La mise en place de masselottes est utilisée pour éviter tout retrait de matière dû à la dilatation thermique. Le châssis est percé au niveau des côtés pour faciliter le dégazage. Deux pièces seront coulées en utilisant ce procédé.



Machine à secousse pression et moule en sable vert (fig. 1)

La troisième pièce est conçue via **moulage main**. Comme pour le moulage en machine, nous utilisons du sable vert dans un châssis. Cependant, dans ce cas, nous tassons le sable à la main.

Ensuite, on fait fondre l'alliage dans un four. Ensuite, on **surchauffe** l'alliage pour éviter une solidification pendant le transfert, on se situe au-dessus du point d'eutectique. La température de l'alliage atteint 700°C.

L'acquisition numérique servira à visualiser la température de la pièce au cours du temps. Elle est effectuée à l'aide de **thermocouples** présents dans le moule.

2. Matériaux

L'objectif ici d'étudier **la dureté** ainsi que **les inhomogénéités** de la pièce entre le cœur de celle-ci et sa surface apparente liée au refroidissement rapide. Pour commencer, il nous faut **scinder** ladite pièce en lamelles (fig. 2) afin d'y observer l'intérieur et l'extrémité de celle-ci, pour cela, on se sert d'une **scie métallographique** représentée figure 3.



Lamelle de notre pièce (fig.2)



Scie métallographique (fig.3)

Maintenant la pièce découpée, on peut commencer l'étude de sa dureté, on commence par **polir** une lamelle avec du papier à poncer (600-1200 grains) (fig. 4) jusqu'à obtenir un produit poli. Ensuite nous sommes passé à la mesure de la dureté via **un micro-duromètre** (fig.5).



Polissage (fig.4)



Micro-duromètre (test de dureté Vickers) (fig.5)

Pendant ce temps, une autre lamelle subit une attaque chimique après avoir été enrober de résine. Le but ici est d'enlever les impuretés dans la pièce et permettre un bon visuel au microscope.

3. Usinage

Pour percer la pièce, nous utiliserons un foret de 10,3 mm de diamètre à deux dents [4]. La machine utilisée est une commande numérique 3 axes, dotée d'un Wattmètre facilitant la mesure directe de la puissance. Avant d'entamer cette phase, il est impératif de déterminer les **paramètres de coupe** en définissant **la plage de fonctionnement de l'outil** adaptée au matériau examiné, en l'occurrence ici, l'aluminium.

Ce processus débute par l'identification d'une plage de fonctionnement autour de celle spécifiée par le fabricant. La vitesse de rotation maximale est établie à $N = 7500 \text{ tr/min}$ (contrainte par la commande numérique), et nous choisissons $d = 8 \text{ mm}$ en raison de l'usure anticipée de notre foret, en utilisant cette formule $V_c = \frac{\pi DN}{1000}$ nous trouvons une vitesse de coupe V_c de 188 m/min .

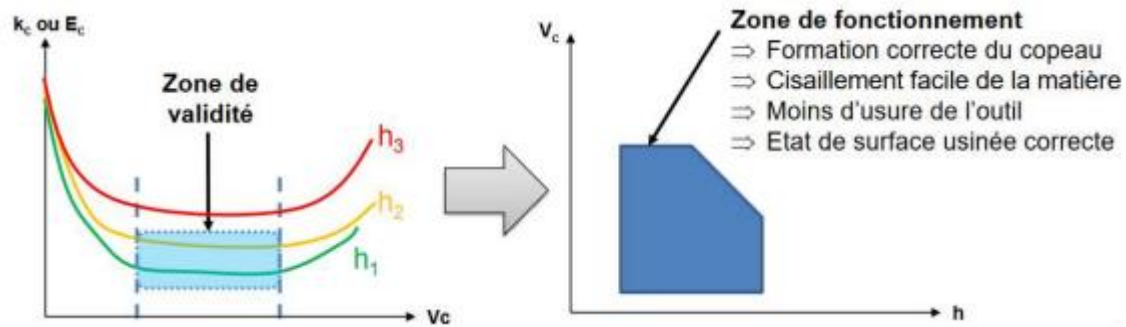
Nous fixons ainsi **six valeurs pour la vitesse** de coupe [85 ,115 ,145 ,175 ,205 ,235] toutes centrées sur la valeur de V_c calculé précédemment.

Selon le constructeur, l'avance optimale de l'aluminium à copeaux courts est spécifiée à $f = 0,55 \text{ mm/tr}$ [4]. Ainsi nous fixons **six valeurs pour l'avance** [0,2 ; 0,3 ; 0,4 ; 0,5 ; 0,6 ; 0,7]

Finalement il faut donc réaliser **36 perçages**. À chaque perçage, le Wattmètre mesure la puissance, dont nous faisons l'acquisition. Cette puissance nous permet de déterminer l'énergie spécifique de coupe (après avoir soustrait la puissance à vide), définie par la formule suivante :

$$E_c = \frac{P_c}{Q} = \frac{4P_c}{\pi D^2 f V_c}$$

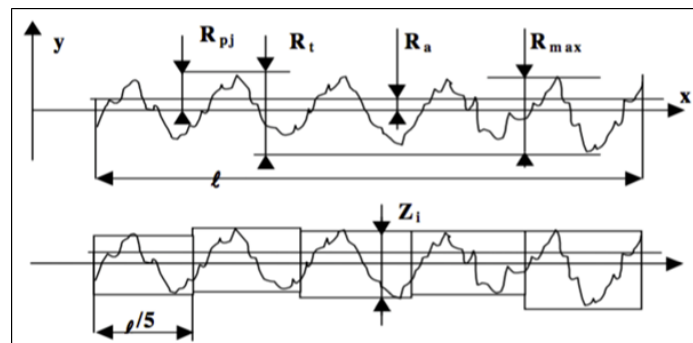
L'objectif est de localiser une "zone de validité" où l'on minimise l'énergie spécifique de coupe tout en maintenant une usinabilité optimale (couple outil/matière).



Graphique représentant la zone de validité [5] (fig.6)

4. Métrologie

N'ayant pas pu réaliser ce TP, cette partie consiste en une étude bibliographique du paramètre de rugosité que nous analysons. Il s'agit du paramètre R_t de **rugosité totale**. C'est l'écart total entre le point le plus haut et le point le plus bas du profil, relevé sur toute la longueur étudiée [6]. Cette grandeur est représentée sur la figure ci-dessous.



Critères de rugosité sur profil [6] (fig.7)

On s'intéresse souvent à ce critère car il détermine avec plus de précision la macro-géométrie de la surface. Il sert également de critère de sélection pour le contrôle qualité. [7]

Pour **mesurer la rugosité totale**, on peut utiliser un **rugosimètre**. Il est composé d'un palpeur (fig.8) équipé d'une pointe et d'un patin. La pointe réalise des micro-déplacements verticaux et le profil de la surface est déterminée par l'intermédiaire d'un calculateur. [6]

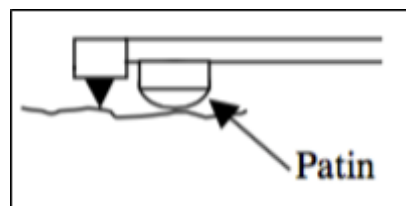


Figure 2 : Palpeur [6] (fig.8)

Cependant, c'est un appareil à contact et la pression du patin sur la surface diminue la précision de la mesure. On peut alors utiliser un **interféromètre** qui fonctionne quant à lui sans contact en utilisant le phénomène

d'interférence produit lors de la superposition de la lumière lorsqu'elle est projetée puis réfléchiée par la zone de mesure. On obtient ensuite R_t en ajoutant le pic maximal au creux maximal enregistré. [7]

5. Plan d'expérience

Un plan d'expérience modifie les variables d'entrée d'un processus pour observer les changements dans la réponse de sortie, avec pour objectif de déterminer l'influence des facteurs sur le paramètre de rugosité, R_t . Ce type de plan permet d'analyser plusieurs facteurs simultanément, en modifiant tous les facteurs au cours d'une seule expérience pour étudier leurs interactions.

Les cinq facteurs pris en compte dans notre étude sont :

1. La vitesse de coupe
2. La vitesse d'avance
3. Le type de refroidissement (Lent/rapide)
4. La présence de strontium (Avec/Sans)
5. Le pourcentage de Silicium (7%,13%,22%)

Avec **cinq facteurs**, il existe donc $2^5 = 32$ combinaisons possibles, ce qui implique la réalisation de 32 essais distincts pour obtenir des données significatives.

Paramètres d'usinage	Vitesse de coupe Vc	Avance f	ED 11 B Rt		
Couple 1	V+	f+	Trou 1	2,835	3,349666667
				2,214	
				5	
			Trou 2	18,455	9,494
				5,096	
				4,931	
			Trou3	3,404	3,655333333
				4,066	
				3,496	

Moyenne des trous issus des résultats de métrologie (fig.9)

Le logiciel **Design-Expert** met en œuvre six plans d'expériences distincts. Les trois premiers portent sur la variation du taux de silicium de l'alliage selon trois intervalles : 7 %-13 %, 13 %-22 % et 7 %-22 %. Les trois autres plans visent à établir des valeurs moyennes à partir de mesures de métrologie réalisées sur les trous. Dans ce cadre, la moyenne de trois trous est répétée trois fois afin d'obtenir trois répliques expérimentales, tandis que la moyenne calculée sur neuf trous n'est effectuée qu'une seule fois, constituant ainsi une réplique unique. Cette démarche structurée permet d'explorer plusieurs configurations expérimentales et garantit la robustesse de l'analyse des paramètres liés à la teneur en silicium de l'alliage.

Une fois l'ensemble des données renseigné dans **Design-Expert**, le logiciel génère le tableau d'analyse de la variance (ANOVA), à partir duquel les p -values sont déterminées. Un facteur est considéré comme statistiquement significatif lorsque sa p -value est inférieure à 5 %. Un second tableau fournit le coefficient de détermination R^2 ainsi que le coefficient de détermination ajusté R^2_{aj} . Des valeurs de R^2 proches de 1 traduisent une bonne capacité du modèle à expliquer la variabilité observée dans les données expérimentales.

Le logiciel permet également l'analyse des résidus, définis comme les écarts entre les valeurs expérimentales mesurées et celles prédites par le modèle. L'étude de ces résidus permet de détecter d'éventuelles tendances, structures ou anomalies, apportant ainsi des indications essentielles sur la pertinence et la validité du modèle statistique.

Dans le cas des plans d'expériences ne comportant qu'une seule réplique, il est indispensable de supprimer les interactions de faible influence afin d'augmenter les degrés de liberté associés aux résidus, condition nécessaire au

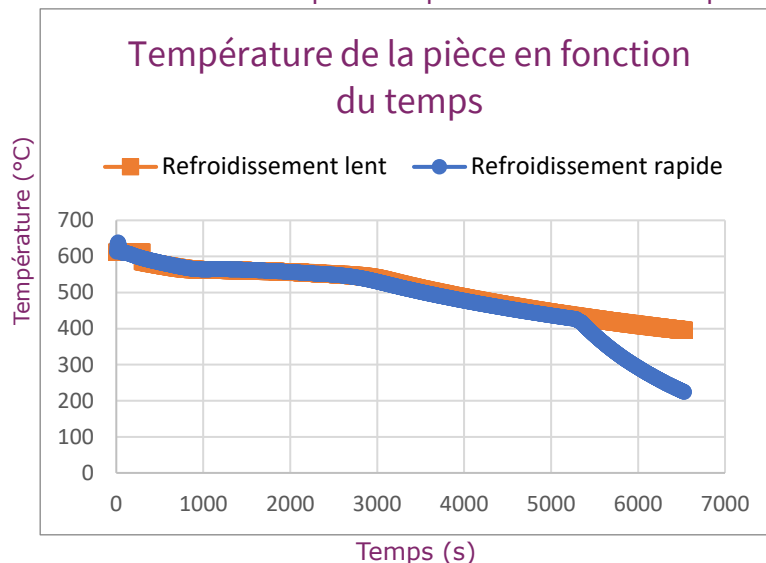
calcul des p -values. Sans cette simplification, les degrés de liberté seraient nuls, rendant toute analyse statistique impossible. Cette approche s'appuie sur le principe de parcimonie des effets, selon lequel seuls les effets principaux et les interactions d'ordre faible ont, en général, une influence significative sur le système étudié.

III. Résultats et discussions

1. Fonderie

Aucun défaut n'est présent sur la pièce dû aux masselottes.

Ci-dessous, nous retrouvons les relevés effectués par les capteurs au cours du temps.



Evolution de la température de la pièce en fonction du temps (fig.10)

On observe que la spirale contenant le plus de silicium est la plus grande. Ainsi, nous pouvons en conclure que le pourcentage de silicium influe directement sur la coulabilité de l'alliage.



Spirale d'AlSi7 (fig.11)



Spirale d'AlSi13 (fig.12)



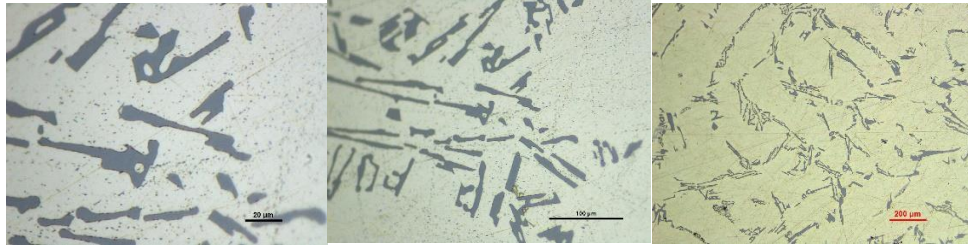
Spirale d'AlSi22 (fig.13)

2. Matériaux

Malheureusement, nous n'avons pas pu obtenir les résultats concernant notre pièce, puisque le jour du TP nous avons étudié la pièce du TP12-A concernant l'AlSi7 sans strontium, il n'empêche qu'il reste pertinent d'analyser les résultats sur celle-ci.

Pour la dureté on a en moyenne **65HV**, elle ne varie quasiment pas sur toute la longueur de la pièce.

Pour l'étude microscopique de celle-ci, on obtient les images suivantes :

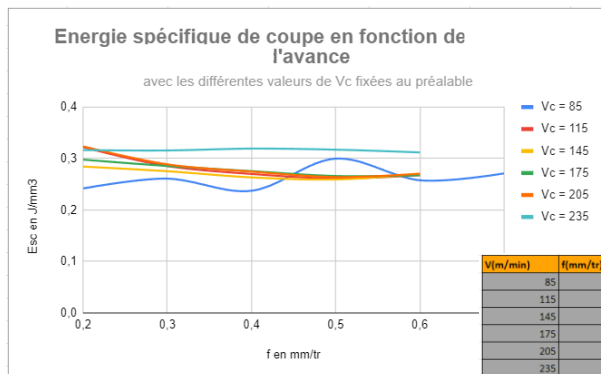


Visualisation de la pièce AlSi7 au microscope (fig.14)

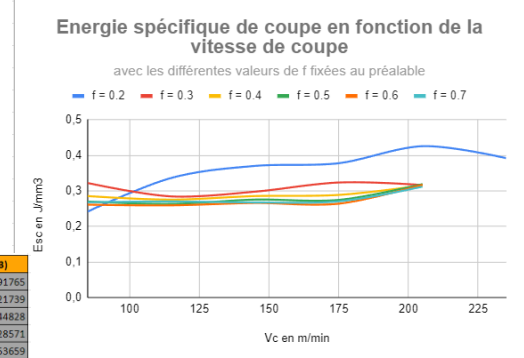
On observe globalement des **dendrites très visibles**, plutôt **épaisses** et **assez espacées entre elles**, ce qui caractérise un refroidissement lent. Ce qui est intéressant à regarder, c'est le fait qu'il subsiste **très peu d'impuretés**. On remarque également des rayures, probablement issu du ponçage.

3. Usinage

À partir d'un tableau (fig.16), deux graphiques ont été tracés : l'un montre l'énergie spécifique de coupe en fonction de la vitesse de coupe (fig.17), et l'autre l'énergie spécifique en fonction de la vitesse d'avance (fig.15), pour identifier les points de vitesse de coupe minimale (V_{cmin}) et d'avance minimale (f_{min}).



(fig.15)



(fig.17)

V(m/min)	f(mm/tr)	N(tr/min)	Vf(mm/s)	P(W)	Q(mm³/s)	Esc(J/mm³)
85	0.2	2705.634033	18.03756022	342.68	1416.666667	0.241891765
115	0.2	3660.563691	24.40375794	645	1916.666667	0.336521739
145	0.2	4615.49335	30.76995566	895	2416.666667	0.370344828
175	0.2	5570.423008	37.13615339	1102	2916.666667	0.377828571
205	0.2	6525.352667	43.50235111	1455	3416.666667	0.425853659
235	0.2	7480.282325	49.86854884	1536	3916.666667	0.392170213
85	0.3	2705.634033	27.05634033	554.7	2125	0.261035294
115	0.3	3660.563691	36.60563691	926	2875	0.322086957
145	0.3	4615.49335	46.1549335	1031	3625	0.284413793
175	0.3	5570.423008	55.70423008	1303	4375	0.297828571
205	0.3	6525.352667	65.25352667	1658.46	5125	0.323601951
235	0.3	7480.282325	74.80282325	1859.21	5875	0.316461277
85	0.4	2705.634033	36.07512043	672.59	2833.333333	0.237384706
115	0.4	3660.563691	48.80751588	1094	3833.333333	0.285391304
145	0.4	4615.49335	61.53991133	1331	4833.333333	0.27537931
175	0.4	5570.423008	74.27230678	1665	5833.333333	0.285428571
205	0.4	6525.352667	87.00470222	1972.78	6833.333333	0.288699512
235	0.4	7480.282325	99.73709767	2473	7833.333333	0.315702128
85	0.5	2705.634033	36.07512043	849.48	2833.333333	0.299816471
115	0.5	3660.563691	61.00939485	1294	4791.666667	0.270052174
145	0.5	4615.49335	76.92488916	1591	6041.666667	0.263337931
175	0.5	5570.423008	92.84038347	2009	7291.666667	0.27552
205	0.5	6525.352667	108.7558778	2345.3	8541.666667	0.274571707
235	0.5	7480.282325	124.6713721	3126.86	9791.666667	0.319338894
85	0.6	2705.634033	54.11268065	1095.33	4250	0.257724706
115	0.6	3660.563691	73.21127382	1502	5750	0.261217391
145	0.6	4615.49335	92.30986699	1880	7250	0.259310345
175	0.6	5570.423008	111.4084602	2328	8750	0.266057143
205	0.6	6525.352667	130.5070533	2706	10250	0.264
235	0.6	7480.282325	149.6056465	3727.67	11750	0.317248511
85	0.7	2705.634033	63.13146076	1344.17	4958.333333	0.271093109
115	0.7	3660.563691	85.41315279	1797	6708.333333	0.267875776
145	0.7	4615.49335	107.6948448	2286	8458.333333	0.27026601
175	0.7	5570.423008	129.9765369	2731	10208.33333	0.267526531
205	0.7	6525.352667	152.2582289	3235.9	11958.33333	0.270597909
235	0.7	7480.282325	174.5399209	4275.66	13708.33333	0.311902249

(fig.16)

En analysant les courbes pour les vitesses de coupe de 85 m/min et 235 m/min , une **incohérence** notable avec les résultats théoriques est observée. Cette divergence pourrait résulter **d'incertitudes de mesure**, liées aux capteurs de puissance ou aux caractéristiques propres de la fraiseuse.

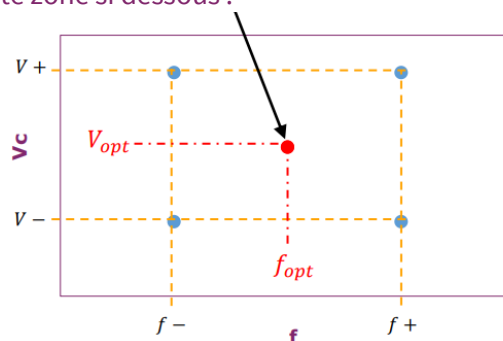
Des imprécisions des capteurs de puissance ou des caractéristiques techniques de la fraiseuse pourraient avoir causé des relevés de puissance inexacts, expliquant les écarts entre les données expérimentales et les prédictions théoriques. Ceci met en lumière l'importance de tenir compte des incertitudes de mesure. Un examen approfondi de la calibration des capteurs et des performances de la fraiseuse pourrait aider à identifier les causes de ces divergences.

Cependant, en ne tenant pas compte de ces courbes, en se basant sur le premier graphique qui semble plus parlant ici, nous trouvons :

V _{min}	175	f	0,6
V _{min+} (V _{min} *2**0,5)	247,4873734	f ₊ (f _{min} *2**0,5)	0,8485281374
V _{min-} (V _{min} *2**-0,5)	123,7436867	f ₋ (f _{min} *2**-0,5)	0,4242640687

Valeurs limites pour l'usabilité (fig.18)

Ainsi le point optimum se trouve dans cette zone si dessous :



Zone d'acceptation et point optimum pour l'usabilité (fig.19)

4. Métrologie

Paramètres d'usinage	Vitesse de coupe	Avance														
	Vc	f														
Couple 1	V+	f+	Trous 1	ED 11 A	ED 11 B	ED 12 A	ED 12 B	ED 21 A	ED 21 B	ED 22 A	ED 22 B	ED 31 A	ED 31 B	ED 32 A	ED 32 B	
				Ra	Rt	Rz	Rq	Rp	Rv	Rsm	Rsk	Rku	Rdq	R	AR	
				0,272	2,033	1,504	0,326	0,773	0,731	74,69	0,154	2,702	2,649	1,034	139,4	
			Trous 2	0,238	1,63	1,271	0,288	0,686	0,584	55,77	0,108	2,674	2,19	0,911	128,7	
				0,266	2,034	1,574	0,321	0,846	0,728	130,4	0,347	2,923	2,077	0,901	157	
				0,797	11,3	4,296	1,09	2,847	1,448	114,2	0,489	4,588	3,274	1,765	181,4	
			Trous3	0,748	11,16	4,012	1,026	2,614	1,398	109,3	0,364	4,659	2,795	1,484	163,6	
				0,725	10,7	4,061	1,012	2,745	1,316	114,4	0,539	4,812	2,992	1,435	148,7	
				0,203	1,391	1,158	0,247	0,564	0,594	45,56	0,104	2,64	2,059	0,674	120,3	
			0,267	3,994	1,629	0,362	1,035	0,595	73,82	0,494	3,443	2,072	0,698	126,6		
			0,287	4,246	1,731	0,387	1,081	0,65	55,02	0,45	3,326	2,451	0,777	125,3		
			0,153	1,691	0,896	0,197	0,459	0,437	43,95	0,007	3,152	1,633	0,468	134,2		
Couple 2	V+	f-	Trous 1	0,152	1,567	0,932	0,198	0,465	0,467	47,77	-0,011	3,544	1,806	0,481	123	
				0,153	1,603	0,944	0,199	0,484	0,46	47,09	-0,051	3,281	2,058	0,487	126,2	
				0,155	3,252	1,808	0,25	0,477	1,331	28,64	-1,601	11,85	3,729	0,529	84,6	
			Trous 2	0,161	3,346	1,932	0,258	0,61	1,323	25,58	-1,519	11,46	3,817	0,663	83,23	
				0,134	2,833	1,39	0,187	0,479	0,911	24,93	-0,839	7,211	3,097	0,812	91,15	
				0,206	4,127	2,412	0,297	0,772	1,64	28,27	-1,449	10,42	4,559	0,712	87,63	
			Trous3	0,184	3,531	2,166	0,269	0,588	1,578	22,06	-1,717	12,27	4,521	0,618	106,2	
				0,195	3,608	2,259	0,28	0,612	1,643	20,13	-1,677	11,88	5,24	0,541	83,9	
				0,306	2,95	1,834	0,394	1,115	0,718	120,8	0,461	3,428	2,018	0,829	153,3	
			0,301	3,188	1,821	0,387	1,1	0,721	79,63	0,493	3,329	2,074	0,56	106,1		
			0,293	3,051	1,787	0,382	1,084	0,703	76,46	0,519	3,556	2,007	0,68	129,6		
			0,317	5,242	2,59	0,436	1,023	1,567	60,26	-0,286	5,164	3,135	0,871	129,9		
Couple 3	V-	f+	Trous 1	0,358	5,769	3,245	0,481	1,385	1,86	42,87	-0,672	4,697	5,665	0,987	116,1	
				0,329	4,865	2,766	0,439	1,112	1,654	31,43	-0,492	4,692	4,758	0,849	105,2	
				0,551	10,6	3,977	0,714	2,088	1,889	73,79	0,254	2,988	4,068	2,026	138,3	
			Trous 2	0,647	9,634	4,016	0,883	2,475	1,541	66,63	0,431	3,836	5,787	0,943	89,02	
				0,666	11,22	4,242	0,925	2,726	1,515	60,07	0,458	4,222	5,251	0,902	85,26	
				0,166	2,605	1,324	0,228	0,806	0,518	66,68	0,567	4,734	1,536	0,765	158,1	
			Trous 3	0,308	3,403	2,086	0,405	1,235	0,852	52,07	0,493	3,975	2,934	1,442	161,1	
				0,165	1,566	1,162	0,208	0,655	0,506	46,16	0,379	3,36	1,982	0,807	174,8	
				0,216	2,482	1,723	0,298	0,658	1,065	60,99	-0,779	5,237	1,935	0,956	175	
			0,273	3,471	1,906	0,373	0,76	1,147	67,91	-0,166	5,789	2,233	0,99	160,9		
			0,205	2,791	1,805	0,286	0,641	1,163	49,06	-0,992	5,774	2,696	0,777	123,1		
			0,239	3,922	2,047	0,335	0,775	1,272	67,13	-0,518	5,114	2,18	1,749	129,8		
Couple 4	V-	f-	Trous 1	0,354	3,819	2,617	0,47	1,19	1,427	69,99	-0,159	3,97	2,746	1,523	160,2	
				0,233	3,955	2,18	0,338	0,771	1,41	65,98	-0,749	5,902	2,191	1,208	160,4	
				0,239	3,922	2,047	0,335	0,775	1,272	67,13	-0,518	5,114	2,18	1,749	129,8	
			Trous 2	0,354	3,819	2,617	0,47	1,19	1,427	69,99	-0,159	3,97	2,746	1,523	160,2	
				0,233	3,955	2,18	0,338	0,771	1,41	65,98	-0,749	5,902	2,191	1,208	160,4	
				0,239	3,922	2,047	0,335	0,775	1,272	67,13	-0,518	5,114	2,18	1,749	129,8	
			Trous 3	0,354	3,819	2,617	0,47	1,19	1,427	69,99	-0,159	3,97	2,746	1,523	160,2	
				0,233	3,955	2,18	0,338	0,771	1,41	65,98	-0,749	5,902	2,191	1,208	160,4	
				0,239	3,922	2,047	0,335	0,775	1,272	67,13	-0,518	5,114	2,18	1,749	129,8	
			0,354	3,819	2,617	0,47	1,19	1,427	69,99	-0,159	3,97	2,746	1,523	160,2		
			0,233	3,955	2,18	0,338	0,771	1,41	65,98	-0,749	5,902	2,191	1,208	160,4		
			0,239	3,922	2,047	0,335	0,775	1,272	67,13	-0,518	5,114	2,18	1,749	129,8		

Résultats de métrologie pour différents paramètres d'usinage (fig.20)

Pour notre critère (R_t , deuxième colonne), on constate que la rugosité est **plus importante** avec une vitesse de coupe faible et une vitesse d'avance élevée car le critère R_t y est plus grand. Avec d'autres paramètres d'usinage, les résultats sont similaires, néanmoins, on peut noter un critère R_t légèrement plus élevé avec une vitesse de coupe et d'avance élevées.

De plus, pour un même trou, les trois mesures de R_t sont similaires malgré **certains écarts**. Cela vaut également pour les mesures des autres groupes ce qui est rassurant vis à vis de la validité des résultats et de la réussite de l'expérience. Ces différences peuvent être dû aux imprécisions machines, où aux erreurs d'incertitudes.

5. Plan d'expérience

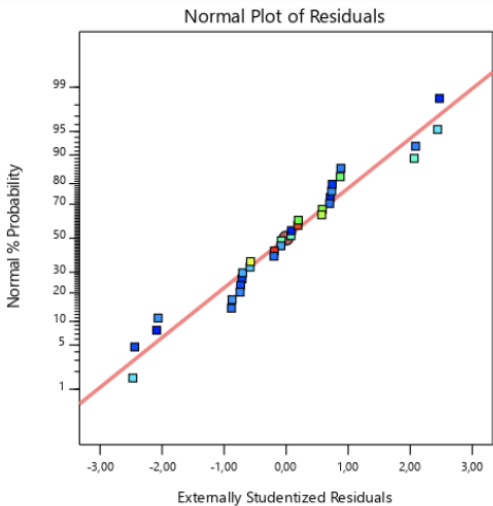
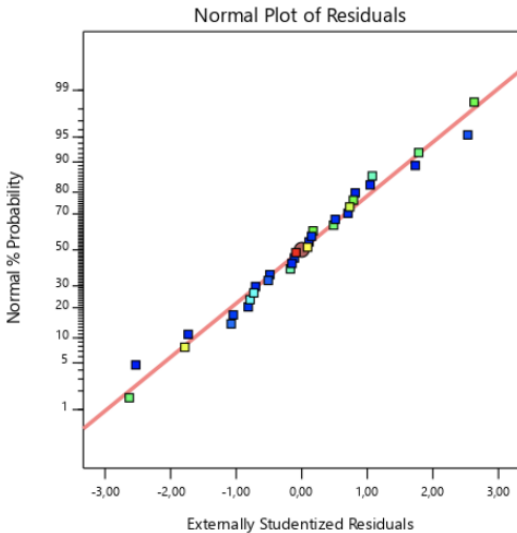
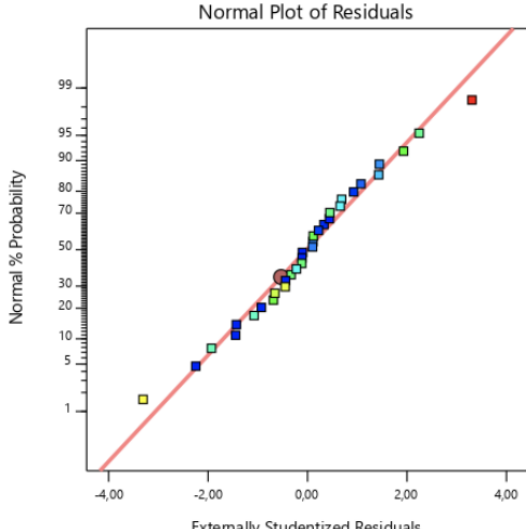
Nous avons analysé l'influence de divers facteurs sur la rugosité totale (R_t) en utilisant des logiciels pour générer graphiques et tableaux. Le **diagramme Half-Normal** montre l'effet de chaque paramètre en valeur absolue. Le **tableau ANOVA** indique les p-values, considérant un facteur comme significatif si sa p-value est inférieure à 5%, un principe également appliqué dans le **diagramme de Pareto** où les valeurs au-dessus de la T-value sont significatives.

Nous avons utilisé la **distance de Cook** pour identifier des valeurs aberrantes, et le graphique **Residuals vs Predicted** pour évaluer l'ajustement du modèle de régression, où un bon ajustement montre une dispersion homogène des résidus autour de zéro.

Les paramètres étudiés sont : A (vitesse de coupe), B (vitesse d'avance), C (présence de strontium), D (pourcentage de Silicium), et E (type de refroidissement). Le R^2 ajusté est utilisé pour la précision de la prédiction. Nos analyses montrent une cohérence des données, avec toutes les valeurs affichant une distance de Cook **inférieure à 1**.

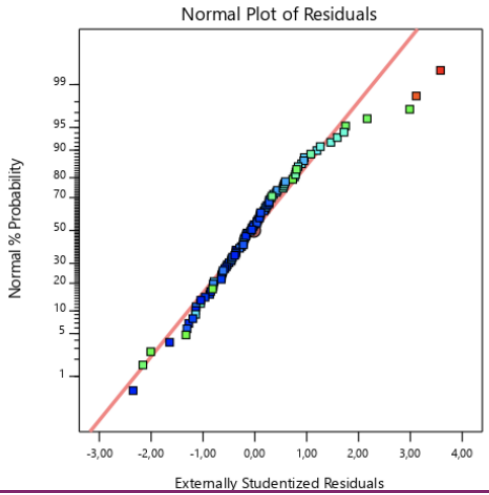
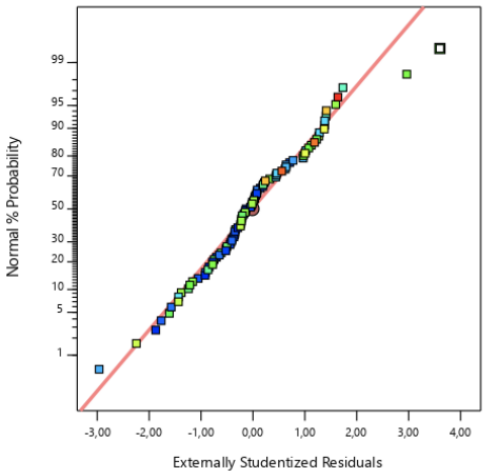
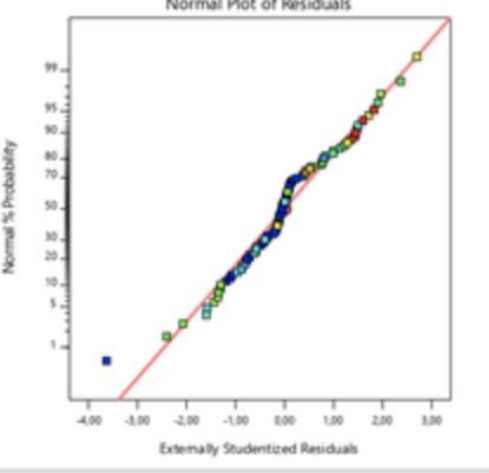
On résume nos résultats dans un tableau :

Plan d'expérience	P-value inférieur à 0,05(facteurs significatifs)	Normal Plot of Residuals	Adjusted R^2
-------------------	--	--------------------------	----------------

7-13% ; une réplique	A ; B ; C ; D ; AD ; BC ; BE ; CE ; ACE ; BDE ; ACDE		0,9460
7-22% ; une réplique	A ; E ; CD ; CE ; ABE ; ACE ; CDE		0,9678
13-22% ; une réplique	A ; D ; E ; AB ; AD ; AE ; CD ; CE ; DE ; ABE ; ACE ; CDE		0,9927

L'analyse des graphiques résidus-prédictions montre que toutes les valeurs restent dans les limites attendues, indiquant une cohérence globale et une fiabilité du modèle, confirmée par des valeurs de R^2 ajusté proches de 1 et une distribution normale des résidus selon le Normal Plot of Residuals.

Les facteurs les plus influents identifiés sont la vitesse de coupe (A), le pourcentage de Silicium, le type de refroidissement (CE), et leur interaction (ACE), soulignant l'importance de la vitesse de coupe dans l'ensemble des plans d'expérience.

Plan d'expérience	P-value inférieur à 0,05 (facteurs significatifs)	Normal Plot of Residuals	Adjusted R ²
7-13% ; trois répliques	A ; C ; E ; AD ; AE ; BC ; BE ; CE ; ACD ; ACE ; BDE		0,6754
7-22% ; trois répliques	A ; D ; E ; AD ; CD ; CE ; DE ; ABD ; DE ; ACE ; ABDE		0,9078
13-22% ; trois répliques	A ; E ; AB ; AD ; CE ; DE ; ACE		0,8345

L'analyse des graphiques résidus-prédictions pour tous les plans d'expérience montre une **cohérence globale** avec des valeurs restant dans les limites attendues. Les valeurs de R² ajusté sont **proches de 1** pour les plans à 3 répliques, sauf pour le pourcentage de Silicium 7-13%, validant ainsi la fiabilité du modèle. Les facteurs les plus significatifs identifiés comprennent la vitesse de coupe (A), le type de refroidissement (lent/rapide), leur interaction avec le pourcentage de Silicium (CE) et l'interaction triple (ACE). Cette tendance est constante dans tous les plans, indiquant l'importance majeure de la vitesse de coupe et du type de refroidissement sur la rugosité (R_t).

Bien que la présence de strontium et de silicium ait un impact moindre par rapport au type de refroidissement et à la vitesse de coupe, ils affectent **la structure interne de la pièce**. Cependant, **l'avance**, bien qu'influençant la rugosité, ne présente pas un impact aussi prononcé que les autres facteurs dans nos plans d'expérience.

IV. Conclusion

Au cours de ce projet on a eu l'occasion d'observer bon nombre de manipulations, de mesures et de propriétés, mais surtout de l'influence d'un paramètre sur l'ensemble des procédés et des applications d'un seul et même matériau. Le taux de Silicium garanti la coulabilité de notre pièce et influe sur sa structure interne, le strontium sa résistance mécanique, le type de refroidissement sur la dureté et l'avance sur la rugosité totale de celle-ci.

On a cependant manqué l'opportunité de faire un TP de métrologie, ce qui aurait eut l'avantage de nous éclairer sur l'importance de la rugosité du matériau sur le projet. De plus, on n'a malheureusement pas eu la chance d'étudier notre pièce en matériaux. Même si les résultats étaient concluants

Il est important de constater que sur un seul et même alliage, nous avons tout un panel de choix à faire sur les paramètres afin d'en optimiser le tout. Ce projet nous a donc permis de comprendre le travail qu'un ingénieur se doit de réaliser, c'est-à-dire innover, profiler le moindre détail pour toujours être plus efficace.

V. Bibliographie

[1]: Effect of strontium and melt purification on the solidification microstructure of hypereutectic Al-Si alloys, Wen Yao CHEN, Ya LIU, Haoping PENG, Jianhuan WANG, Xuping SU:

<https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2022.105310>

[2]: L'aluminium, une belle histoire, Maurice LAPARRA:

<https://www.inter-mines.org/fr/revue/article/l-aluminium-une-belle-histoire/497>

[3]: Propriétés des alliages d'aluminium de fonderie, Michel GARAT:

<https://doi.org/10.51257/a-v2-m4675>

[4]: fiche technique Foret HPC carbure monobloc, queue cylindrique DIN 6535 HA, DLC, Ø DC h7: 10,3mm:

https://cdn.hoffmann-group.com/dsh/fr-FR/dsh_fr-fr_1395966.pdf

[5]: Graphique représentant la zone de validité, slide 2 du PowerPoint 1 d'usinage du Pr. Faissal CHEGDANI

[6]: Document ressource - Rugosité des surfaces usinées :

<https://moodle.insa-lyon.fr/mod/book/view.php?id=41133&chapterid=1272>

[7]: Article de Plastiform :

https://www.plastiform.info/contrôle-rugosité/rugosité-ra-moyenne-arithmétique-de-la-rugosité/#title_3