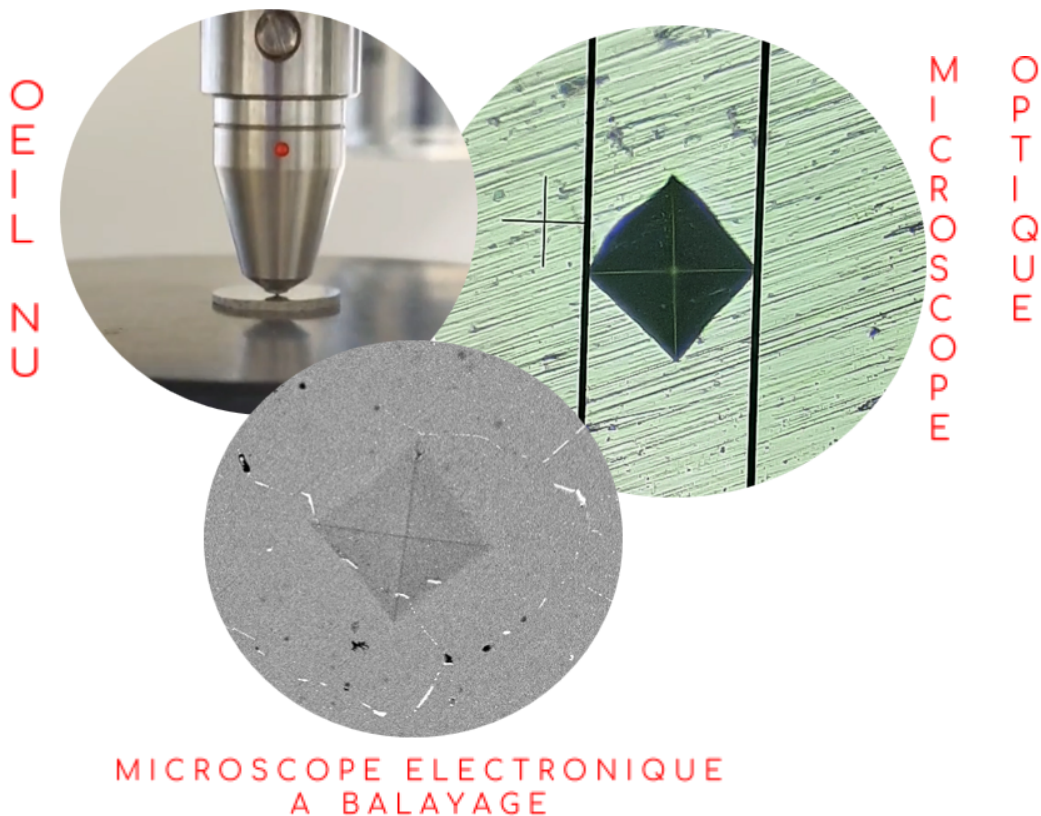


PROJET DE PHYSIQUE

Matériaux : comment des traitements thermiques peuvent-ils influencer les propriétés mécaniques ?



Étudiants :
DESOL Charles
FADILI Hajar
GUILLAUME Héloïse
LECLERC Marie

Enseignant-responsable du projet :
Dr. DUCHAUSSOY Amandine

Date de remise du rapport : 10 juin 2022

Référence du projet : **STPI/P6/2022 - 009**

Intitulé du projet : **Matériaux : comment des traitements thermiques peuvent-ils influencer les propriétés mécaniques ?**

Type de projet : **Expérience et Bibliographie**

Objectif du projet : **L'objectif de ce projet est de montrer l'influence des traitements thermiques effectués sur microstructure sur les propriétés mécaniques d'un alliage d'aluminium.**

Mots-clefs du projet : ***Aluminium, précipités, traitement thermique, dureté.***

Institut National des Sciences Appliquées de Rouen
Département Sciences et Techniques Pour l'Ingénieur
685 Avenue de l'Université BP 08 - 76801 Saint-Étienne-du-Rouvray
Tél : +33 2 32 95 66 21 - Fax : +33 2 32 95 66 31

Table des matières

<u>Organisation du travail</u>	<u>5</u>
<u>Partie 1 : Etat de l'art</u>	<u>6</u>
Historique et quelques utilisations de l'aluminium	6
L'aluminium	6
Propriétés physiques et chimiques	6
Les alliages d'aluminium.	6
Classement et désignation	6
Le principe du durcissement structural	7
Les traitements thermiques (TT) pour les alliages 7000	8
L'alliage 7449	9
<u>Partie 2 : Méthodologie</u>	<u>10</u>
Les traitements thermiques pour un durcissement structural	10
Les différents polissages	11
Pour les essais de microdureté	11
Pour l'observation au microscope électronique à balayage	11
Essais de microdureté	11
L'essai de Vickers	11
Les paramètres retenus pour cet essai	12
Laboratoire Groupe Physique des Matériaux	12
<u>Partie 3 : Résultats</u>	<u>13</u>
Résultats expérimentaux	13
Analyses microstructurales	14
Discussion de la microdureté	16
<u>Conclusion</u>	<u>20</u>
<u>Bibliographie</u>	<u>21</u>
<u>Annexes</u>	<u>24</u>
Méthodologie	24
Tableaux des résultats	26
Lexique	28
Photographies	30
Exemples de photos d'indent prises à l'INSA	30
Photos d'analyse prise au laboratoire Groupe Physique des Matériaux	31

Remerciements

Nous souhaitons adresser nos remerciements au Dr. DUCHAUSSOY, notre responsable de projet, pour nous avoir fait découvrir cette matière et accompagnés durant ces nombreuses semaines.

Nous remercions de même ses nombreux collègues de bureau et les doctorants pour l'aide apportée lorsque notre responsable était occupée avec l'autre groupe.

Enfin, nous adressons nos remerciements à nos camarades du projet numéro 10, mené en parallèle au nôtre, pour l'entraide fournie.

Introduction

Au cours de ce quatrième semestre de notre cycle préparatoire d'élèves ingénieurs, nous avons été amenés à choisir un sujet d'étude de physique à mener en groupe. Il s'agit d'une bonne opportunité pour acquérir des compétences d'organisation du travail essentielles pour tout futur ingénieur.

Nous souhaitons développer au travers de cette expérience notre curiosité et notre culture scientifique. Nous avons choisi une matière encore inconnue pour nous et différente de nos enseignements respectifs : la science des matériaux. Nous étudions dans ce projet l'influence de traitements thermiques sur les propriétés mécaniques dans l'alliage d'aluminium à étudier. Ceci afin de comprendre l'augmentation de la dureté à travers l'analyse de la microstructure.

Ce projet physique est ainsi une réelle opportunité de découvrir le monde de la recherche en laboratoire grâce au lien entre la théorie, l'expérimentation et la recherche bibliographique.

Enfin, le fait de travailler à plusieurs groupes sur le même créneau mais avec des sujets différents utilisant les mêmes expérimentations a permis de créer des collaborations intergroupe intéressantes ainsi que la possibilité de suivre l'avancée d'un autre projet.

Organisation du travail

Lors des premières séances il a été décidé de commencer par effectuer des recherches bibliographiques principalement centrées sur les matériaux, l'aluminium et les précipités.

Après une mise en commun, des parties ont été attribuées à rechercher plus spécifiquement : Hajar s'est intéressée aux précipités, Charles aux traitements thermiques et à l'aspect chimique, Héloïse aux propriétés de l'aluminium et l'alliage 7449 ainsi qu'aux recommandations sur les traitements thermiques, Marie a poursuivi les recherches sur la dureté Vickers et l'homogénéisation et a structuré le plan du rapport. ([Organigramme](#))

Ensuite, les manipulations et les expériences ont commencé, en faisant une alternance sur les personnes qui iraient les finir le lendemain ou le surlendemain. ([tableau récapitulatif des réalisations](#))

Enfin, la rédaction du présent rapport a été partagée, en essayant de finir une partie chaque semaine et en utilisant des outils collaboratifs. Le diaporama et le poster ont été réalisés en groupe.

Partie 1 : Etat de l'art

1. Historique et quelques utilisations de l'aluminium

a. L'aluminium

L'aluminium est apparu en tant que tel au XIX^{ème} siècle et était exclusivement réservé à des objets de luxe, tels que des parures de bijoux. En 1885, 2 500 tonnes d'aluminium ont été produites, face à 67 millions en 2021. ^[16]

Aujourd'hui, la recherche autour des matériaux occupe une place importante dans de nombreuses industries, notamment dans le domaine des transports et en particulier en aéronautique. En effet, l'aluminium possède des caractéristiques uniques et avantageuses. Il est principalement reconnu pour sa légèreté et sa solidité (propriété de l'aluminium en alliage). De plus, il est relativement bon marché et adaptable pour de nombreuses applications : il est présent dans tous les secteurs : alimentaire (canettes), industrie automobile, ferroviaire et naval ou encore en bâtiments (véranda). ^[15]

Enfin, l'aluminium est facilement recyclable et il semblerait que près de «75% du métal produit depuis 1880 est encore en utilisation aujourd'hui, après réutilisation.» ^[16]

b. Propriétés physiques et chimiques

Tout d'abord, l'aluminium se classe comme le 3^{ème} métal le plus léger avec une masse volumique de 2,70 g/cm³. L'aluminium est un métal non magnétique (environ 50 fois moins que l'acier).

Il est peu fragile à basses températures, ce qui permet de l'utiliser en cryogénie. Ensuite, pur, il ne résiste pas particulièrement bien aux fortes températures, car sa température de fusion est très basse (autour de 658°C).

De plus, l'aluminium est anodisable, c'est à dire que le matériau peut être protégé par une couche d'hydrogène (i.e. alumine). Suite à ce traitement, il procure une très bonne isolation électrique mais il est également plus résistant à l'usure, à la corrosion et à la chaleur. ^[19]

Enfin, alors qu'en alliage il peut supporter des températures de l'ordre de 200°C et que la résistivité électrique est souvent réduite de moitié, sa résistance globale est augmentée : les charges de rupture peuvent atteindre celles des aciers trempés ^{[21][5]}.

2. Les alliages d'aluminium

a. Classement et désignation

Sept familles permettent de classer les alliages d'aluminium en fonction du principal élément d'addition. Ce sont les familles de type 1^{***}, 2^{***}, ..., 7^{***}.

Les trois chiffres suivants de la désignation d'un alliage d'aluminium donnent respectivement des précisions sur le groupe d'appartenance, la variante éventuelle (à cause d'impuretés) et les principaux alliages.

Les alliages d'aluminium suivent une désignation qui permet de caractériser leur évolution de limite d'élasticité. Les alliages 1000 : composé d'aluminium >99% (limite d'élasticité très basse); les 3000, 4000 et 5000 sont caractérisés par leur durcissement par solution solide (atomes interstitiels), les 3 derniers sont les 2000, 6000 et 7000 qui eux sont à durcissement structural (formation de précipités). Cette étude concerne un alliage 7449 à durcissement structural.

b. Le principe du durcissement structural

Les alliages d'aluminium à durcissement structural sont constitués de précipités chimiquement différents selon l'alliage (2000, 6000 ou 7000) inclus dans une matrice. Lorsqu'un matériau est soumis à une contrainte, il se déforme. La résistance d'un matériau dépend de comment il se déforme : soit il se déforme peu, il est alors résistant, soit il se déforme beaucoup, il est alors ductile. Cette déformation est dirigée par la formation de dislocations. Ce sont des défauts linéaires correspondant à une discontinuité dans l'organisation de la structure cristalline. Un matériau est alors plus résistant lorsque le mouvement de ces dislocations est empêché.

Le durcissement par précipitation : Les précipités présentent des obstacles pour le déplacement des dislocations, augmentant aussi la résistance du matériau à l'écoulement. Deux types de réaction entre les précipitations et les dislocations peuvent être cités : le cisaillement et le contournement.

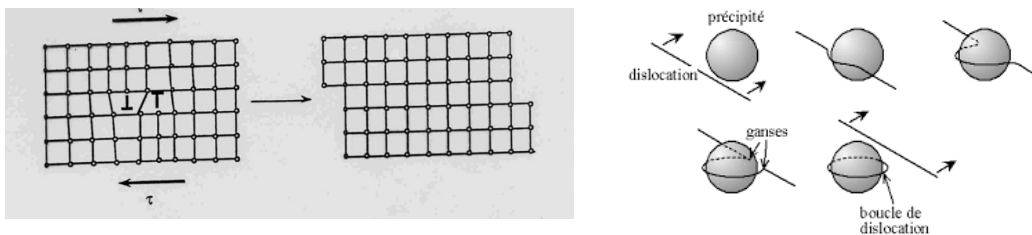


FIG 1 et 2 : contournement et cisaillement. [27]

Les 2 types de dislocations :

- ❖ Dislocation coin : il s'agit d'une dislocation tout au long d'une ligne, c'est-à-dire qu'il faut enlever un demi plan atomique et les autres particules vont se resserrer pour combler le vide, cette perturbation peut être vue comme une déformation élastique (effet cottrell).
- ❖ Dislocation vis : elle se propage perpendiculairement à la déformation tel qu'une fermeture glissière et en suivant un plan atomique, il faut monter d'un niveau par tour (effet de dipôle élastique).

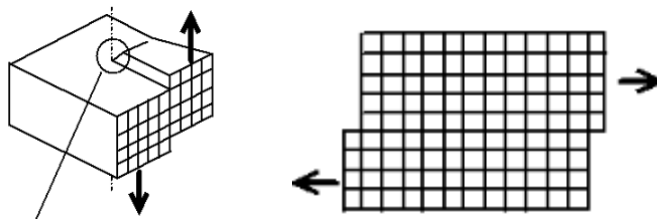


FIG 3 et 4 : Dislocation vis et coin. [25]

Dans ce cas de figure, ce sont les précipités qui ont pour but de freiner la propagation des dislocations et ainsi conduire au durcissement du matériau. Il existe deux modes de propagations

des dislocations lorsqu'elles rencontrent un précipité : lorsque les précipités sont très petits et cohérents avec la matrice (le réseau est en continuité avec la matrice), ils peuvent être cisailés par la dislocation, lorsqu'ils deviennent plus gros et incohérents, les dislocations les contournent selon le mécanisme d'Orowan.

C'est en jouant sur l'activation de ces différents mécanismes que l'on peut contrôler le durcissement structural. En effet, un maximum de durcissement sera atteint par le mécanisme de cisaillement, pour cela il faut donc obtenir des précipités fins et en forte densité.

Afin de former ces précipités et de maîtriser leur taille et leur densité, il faut contrôler les éléments d'alliage et les traitements thermiques appliqués à l'alliage.

3. Les traitements thermiques (TT) pour les alliages 7000

- Réalisation d'une homogénéisation

L'homogénéisation permet de modifier drastiquement la structure de l'alliage, c'est-à-dire d'améliorer ses propriétés en modifiant la présence de ségrégation d'éléments d'alliage et de phase à bas point de fusion ^[11]. Autrement dit «*l'homogénéisation a pour but de rétablir ce déséquilibre.*»¹⁰ Son rôle est d'effacer les ségrégations chimiques et microstructurales dues au refroidissement lent après la coulée du matériau. En effet, l'alliage est amené et maintenu à de hautes températures, ce qui favorise la diffusion des espèces chimiques. La diffusion des éléments d'alliage devient alors beaucoup plus importante, ce qui permet la dissolution des phases présentes et une atténuation de la microségrégation.

Cependant, un tel traitement engendre une augmentation conséquente de la taille de grains, souvent non désirée. Il existe alors des traitements thermo-mécaniques, tels que le laminage à chaud ou à froid, qui permettent de diminuer la taille des grains et/ou de leurs cellules (distance entre bras dendritiques plus petits). Leur surface collective augmente alors, ce qui donne une meilleure répartition de l'eutectique et diminue la microségrégation, facilitant d'autant l'homogénéisation.

- Traitement thermique de mise en solution

Le traitement thermique de mise en solution consiste à mettre les éléments d'alliage en solution solide. En effet, le traitement d'homogénéisation ou les traitements thermo-mécaniques induisent une précipitation non désirée. En d'autres termes, les précipités sont trop gros pour activer le mécanisme de cisaillement et donc obtenir un maximum de durcissement. Il faut donc remettre les éléments qui les composent en solution solide afin de pouvoir contrôler la précipitation. Il consiste généralement en des traitements courts (30/45 min au four) à une température très élevée (450°C-500°C). La mise en solution peut également limiter l'écrouissage car si l'on chauffe le métal, les atomes peuvent diffuser et permettre l'annihilation (désintégration totale) de certains défauts tels que les dislocations. Il existe aussi des facteurs impactant les propriétés mécaniques telles que le brasage, le soudage... qui peuvent engendrer une précipitation locale non désirée mais qui peuvent être également évités grâce à une mise en solution. En outre, l'optimisation des propriétés mécaniques est possible uniquement si ce dernier est soumis à une mise en solution avant traitement ultérieur.

- Traitement thermique de précipitation

Dans le cas des alliages 7000 un traitement thermique appelé T6 est utilisé, principalement dans l'industrie du transport (ex : aile d'avion), dans les structures de sol et dans les constituants de bouteilles de plongée sous-marine. Sur la figure 3, il est représenté par la partie "revenu". Il consiste généralement en des traitements basse température (100-200°C) pendant 12 à 48h.

Ainsi les alliages d'aluminium subissent une suite de traitements thermo-mécaniques après leur coulée afin d'obtenir les propriétés souhaitées. Ci-dessous un exemple concernant un alliage de type 7000 :

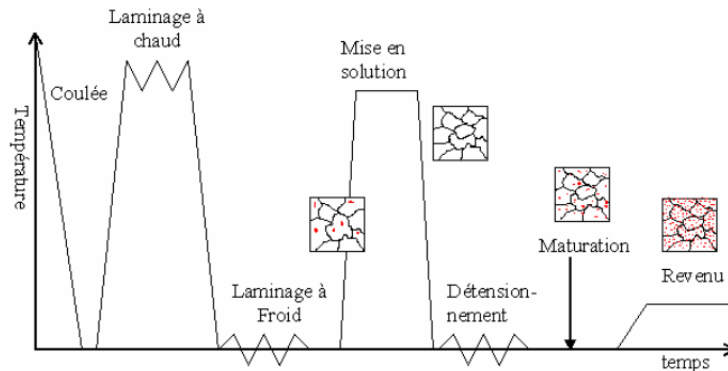


FIG 5 : Séquence de traitements thermomécaniques, utilisée dans l'industrie pour les alliages 7000. [1]

4. L'alliage 7449

L'alliage utilisé dans ce projet est l'alliage d'aluminium (Al_2Fe) 7449. Il est composé d'aluminium (85,6 - 89,3%) ainsi que de zinc (7,5 - 8,7%), de magnésium (1,8 - 2,7%), de fer (-0.15%) et de cuivre (1,4 - 2,1%) [16]. Il est apparu peu avant les années 2000 et est utilisé pour fabriquer les extrados des ailes d'avion notamment grâce à ses propriétés de résistance à la corrosion et sa haute limite d'élasticité. [17 et 18]

L'alliage d'aluminium 7449 reçu dans ce projet a été préalablement coulé et homogénéisé. Le projet consiste donc à jouer sur les traitements de mise en solution, les trempes (refroidissement rapide pour une bonne maîtrise du processus et pour éviter la formation des précipités), le détensionnement (relâchement des contraintes résiduelles subsistant dans une pièce mécanique), et les revenus (revenu T6, permettant d'atteindre un durcissement maximal) afin de voir l'influence de ceux ci sur les propriétés mécaniques.

Partie 2 : Méthodologie

Lors de la première séance au laboratoire, deux groupes ont été formés. L'un s'occupait d'une rédaction des enjeux physiques et de planifications des expériences tandis que l'autre groupe était en charge de comprendre et maîtriser les outils présents dans la salle (polissage, essai de vickers, four, etc). Cette organisation a permis d'avancer de manière efficace.

De plus, les échantillons ont été nommés avec des lettres de A à X. Cette manière de nommer a permis de différencier chaque échantillon par TT de mise en solutions, de précipitations et de vieillissement - ces paramètres sont présents dans les tableaux en annexe et partie 3. Cependant pour la partie discussion les échantillons ayant subi le même traitement thermique ont été regroupés.

Lors des expériences, seulement 3 machines différentes ont été utilisées : pour chauffer les échantillons, c'est-à-dire un four pouvant monter jusqu'à 550°C, les polir et mesurer leur dureté. Le four est l'outil ayant fourni le plus de libertés pour jouer sur les deux principaux facteurs : la température et le temps de mise en chauffe, afin de modifier la dureté des échantillons, autrement dit sur les paramètres des traitements thermiques.

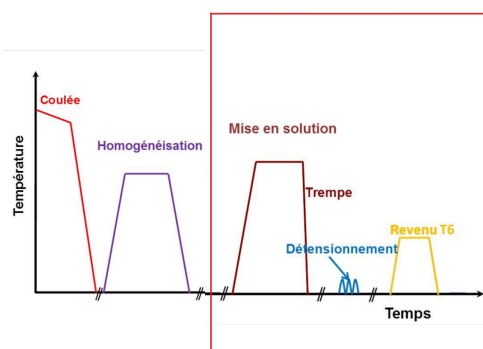
Pendant les expériences, les deux objectifs principaux sont : dans un premier temps, observer l'influence des différents traitements thermiques sur la microstructure, notamment sur la précipitation, et dans un deuxième temps, étudier la relation entre les différentes microstructures obtenues et les propriétés mécaniques (dureté Vickers).

1. Les traitements thermiques pour un durcissement structural

«Le **traitement thermique** d'une pièce de métal consiste à lui **faire** subir des transformations de structure grâce à des cycles prédéterminés de chauffage et de refroidissement afin d'en améliorer les caractéristiques mécaniques : dureté, ductilité, limite d'élasticité, etc. » ^[23]

Premièrement, il faut réaliser une expérience de mise en solution de l'alliage d'aluminium, dans un four. Cette étape consiste principalement à mettre les pièces d'aluminium dans le four à une température de 470 C°. Ainsi, les échantillons ont été mis en solution pendant trente minutes ou quarante-cinq minutes.

Lors du traitement thermique de précipitation, les échantillons sont chauffés à plus basse température (120°C, 150°C, 170°C) pendant 26h ou 48h.



Les parties entourées en rouge sont les parties réalisées pendant le projet par ce groupe.

FIG 6 : Séquence de traitements thermomécaniques T6, utilisés dans l'industrie pour les alliages 7000 ^[26]

2. Les différents polissages

a. Pour les essais de microdureté

L'aluminium est un métal ductile, il faut donc préparer l'état de surface des échantillons avec minutie. De plus, lors de ses différents traitements thermiques il peut y avoir création d'une fine couche d'oxyde. Pour enlever cette couche et obtenir un état de surface observable au microscope optique, l'aluminium est soumis à un polissage en utilisant du papier SIC, en commençant par du grain 1200 puis 2400 et enfin 4000. Ceci permet d'avoir des valeurs de dureté précises lors du test et un visuel correct. L'échantillon est rincé à l'éthanol pour enlever les résidus indésirables.

b. Pour l'observation au microscope électronique à balayage


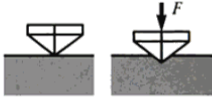
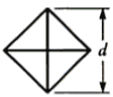
Un microscope électronique à balayage produit des images en haute qualité de la surface de l'échantillon d'aluminium. La procédure de polissage est sensiblement la même, c'est-à-dire que l'on applique dans un premier temps un polissage mécanique avec des disques SIC jusqu'à 4000. Il faut ensuite utiliser une pâte diamantée qui permet de descendre jusqu'à 1µm grâce aux fines particules de la pâte. L'échantillon est également rincé à l'éthanol pour enlever les résidus indésirables.

3. Essais de microdureté

a. L'essai de Vickers

Dans cette étude, les propriétés mécaniques sont mesurées par des essais de dureté Vickers. Dans un premier temps, l'histoire de ce procédé sera explicitée et dans un second temps la manipulation en elle-même sera décrite.

Développé en 1924 par Smith et Sandland, le test tire son nom de Vickers Ltd, le conglomérat technique britannique dans lequel travaillaient ces deux ingénieurs. Ce test a été conçu comme une alternative au test de Brinell, qui ne pouvait pas être effectué sur les matériaux utilisés par Smith et Sandland. Le principe est très similaire à ce dernier, cependant l'empreinte régulée sur le matériau par l'essai Vicker est réalisée avec un pénétrateur diamant pyramidal à la place d'une bille, permettant ainsi d'être plus homogène et polyvalent.

Méthode d'essai	Géométrie du pénétrateur	Charge F	Principe de l'essai	Paramètre mesuré	Dureté
Vickers	Pyramide de diamant à base carrée; angle entre les faces opposées: 136° 	5 à 100 kgf (microdureté: 5 à 1000 gf)		Diagonale de l'empreinte (d) 	$HV = \frac{1,854 F}{d^2}$

TAB 1 : Tableau récapitulatif sur l'essai de Vickers. [20]

La dureté est alors calculée selon la formule suivante :

$$Hv = \frac{2F * \sin\left(\frac{136^\circ}{2}\right)}{d^2} = 1,854 * \frac{m}{d^2} \quad \text{où } F = m * g \text{ et } d^2 = \frac{d_1 + d_2}{2} \text{ (en } mm^2 \text{)}$$

Couplée avec des essais de traction ou de compression qui sont plus complets, la dureté fournie par l'essai de Vickers permet d'obtenir de premières informations sur la limite élastique (résistance) du matériau. Néanmoins il a été vérifié à l'aide des diagonales pour calculer la profondeur que cette masse ne déformait pas les échantillons. (Elle doit être supérieure à trois fois la profondeur de l'indent.)

b. Les paramètres retenus pour cet essai

Dans le cadre de ce projet, il a été réalisé des tests de dureté en appliquant l'essai de Vickers, avec une masse de 1kg, pendant 10s. Après une mise à zéro, il faut mesurer la longueur des diagonales de l'indent. Cette expérience nécessite de prendre certaines précautions, car une simple vibration ou encore un mauvais étalonnage de l'appareil peuvent nuire à la précision de la mesure de dureté.

4. Laboratoire Groupe Physique des Matériaux

Afin d'observer la microstructure des échantillons et notamment ici les précipités, l'utilisation d'un microscope électronique à balayage est nécessaire. En effet, les précipitations sont trop fines et compliquées à voir via un microscope optique. En outre, cette technique est basée sur le principe des interactions électrons-matières.

Partie 3 : Résultats

L'objectif de ce projet est de montrer l'influence des traitements thermiques effectués sur microstructure sur les propriétés mécaniques d'un alliage d'aluminium.

D'après la littérature, la dureté est bien liée au traitement thermique. C'est à dire qu'elle est liée à l'utilisation d'un revenu, à une température et un temps spécifique. Le traitement thermique permet d'atteindre un maximum de dureté.

En effet, le revenu permet à la microstructure de se modifier : par exemple il permet aux solutés présents dans les grains de l'alliage de se disposer de manière stable et donc de former des précipités. La précipitation permet de jouer sur deux facteurs :

- ❖ la taille des précipités
- ❖ et leur densité.

Cependant, en modifiant ces deux facteurs dans une mauvaise combinaison, la dureté est diminuée. En laissant trop longtemps les échantillons dans le four, pendant le traitement thermique de précipitation, la taille des précipités sera alors trop grande et impactera directement la microdureté de l'alliage en modifiant le mécanisme permettant aux dislocations de traverser les précipités. C'est pour cela que la trempe est également importante puisqu'elle permet de figer la microstructure à la sortie du revenu. Une analyse plus fine sera faite dans la partie discussion.

Les facteurs variant lors des expériences :

- ❖ Le vieillissement à l'ambiante (fait après la mise en solution)
Il consiste à laisser un échantillon à l'air libre, ce qui permet à la composition chimique microscopique de se réarranger plus facilement que si l'échantillon était dans le congélateur.
- ❖ La température du revenu
- ❖ Le temps du revenu

1. Résultats expérimentaux

a. Propriétés mécaniques

Dans cette étude, une vingtaine d'échantillons a été étudiée, chacun ayant subi des traitements différents. Plusieurs groupes d'échantillons peuvent être formés : les échantillons ayant subi un traitement de mise en solution et ceux ayant en plus subi un revenu. Quatre échantillons ont été mis au congélateur et les autres ont été laissés à l'air libre. Les propriétés mécaniques obtenues par réalisation de l'essai Vickers sont présentées ci-dessous :

Traitement thermique de mise en solution			
température	470°C		
temps	30min	45min	
Traitement thermique de précipitation			
température	120°C	150°C	170°C
temps	26h	48h	

TAB 2 et 3 : Paramètres des différents traitements thermiques.

Echantillons ayant subi un traitement thermique de mise en solution				
vieillissement ambiant	Non	Oui	Non	Oui
température	470°C	470°C	470°C	470°C
temps	30min	30min	45min	45min
dureté moyenne	162 Hv	165 Hv	150 Hv	162 Hv

Dureté moyenne des échantillons ayant subi une mise en solution à 470°C pendant 30min et un revenu					
dureté moyenne	206 Hv	245 Hv	178 Hv	252 Hv	137 Hv
température revenu	120°C	120°C	150°C	150°C	170°C
temps	26h	48h	26h	48h	48h

TAB 4 et 5 : Dureté en fonction de plusieurs paramètres.

Le mauvais fonctionnement du four se doit d'être signalé (lors des traitements thermiques de précipitation de 24 ou 48h). Ce facteur peut impacter les résultats, l'analyse et les conclusions scientifiques. Pour un revenu, le four doit rester à une température désignée pendant le temps indiqué, ce qui n'a pas été le cas pour une des expériences. Le four a eu un pic de température à 180°C la première nuit et une compensation a dû être faite en le laissant à 60°C la deuxième.

Des [indentations](#) ont été réalisées sur les échantillons une semaine ou un mois plus tard pour observer la différence de dureté et ainsi percevoir le phénomène de vieillissement à l'ambiante.

Pour illustrer la pratique de ces expériences ce QR CODE mène à une vidéo réalisée lors du projet pendant les manipulations, ainsi que quelques photos présentées en [annexe](#).



FIG 7 : QR Code.

b. Analyses microstructurales

Des exemples d'images électroniques prises au microscope électronique à balayage au laboratoire GPM sont présentés ci dessous :

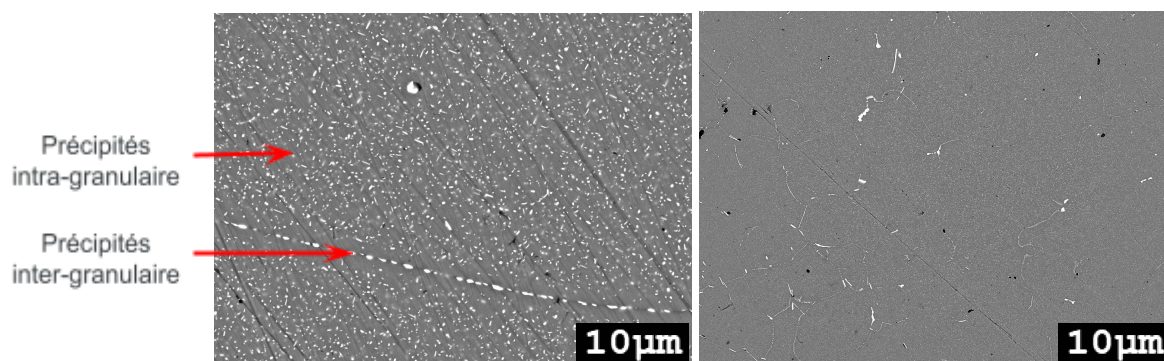


FIG 8 et 9 : photos au microscope électronique à balayage de l'échantillon A.

L'échantillon A a subi un traitement thermique de mise en solution de 45min à 470°C, puis de précipitation de 48h à 170°C et enfin un vieillissement à l'air libre.

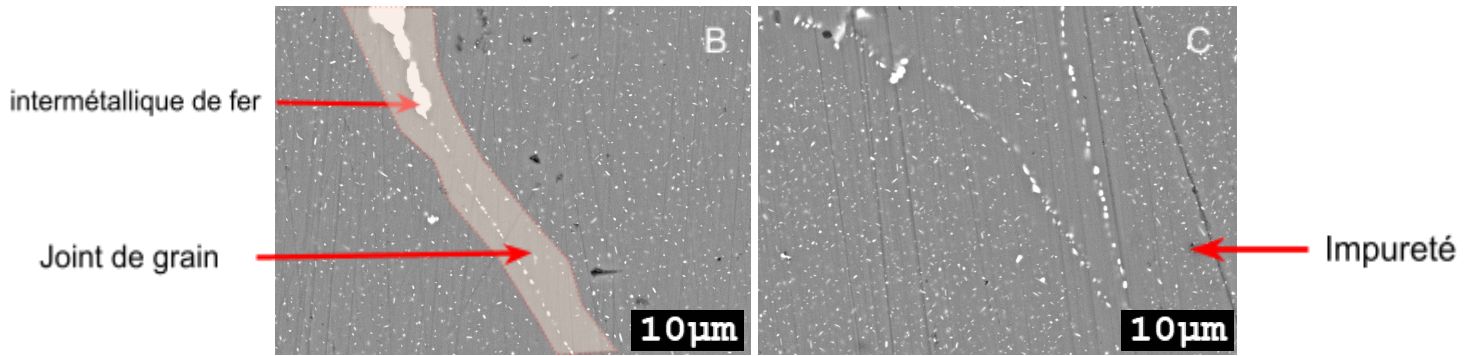


FIG 10 et 11 : photos au microscope des échantillons B et C.

L'échantillon B a subi un traitement thermique de mise en solution de 30min à 470°C, puis de précipitation de 48h à 150°C et enfin un vieillissement à l'air libre.

L'échantillon C a subi un traitement thermique de mise en solution de 30min à 470°C, puis de précipitation de 48h à 120°C et enfin un vieillissement à l'air libre.

On observe sur la figure 8, donc sur un échantillon ayant subi un traitement thermique de précipitation à 170°C (supérieur la température pour un revenu T6) pendant 48h, un grand nombre de précipités. Ce traitement peut être qualifié de sur-revenu. Les précipités intragranulaires recouvrent de façon homogène le grain. La taille des précipités est trop importante en comparaison avec ceux des figures 10 et 11, car le pic de dureté à été dépassé en faisant un revenu à 170°C.

En annexe se trouvent aussi d'autres images électroniques obtenues pour un autre échantillon ayant subi le même traitement thermique, la même microstructure y est observée.

Partie 4 : Discussion

Lors de cette étude la microstructure fut le point principal d'analyse des échantillons ayant subi un traitement thermique de précipitation pendant 48h. Aucune analyse ou comparaison ne peuvent être fournies pour les échantillons n'ayant pas subi de traitement thermique de précipitation ou ceux l'ayant subi pendant 26h.

1. Discussion de la microdureté

Pour conclure et analyser les expériences, ci-dessous sont décrits les facteurs impactant les analyses d'une manière positive ou non.

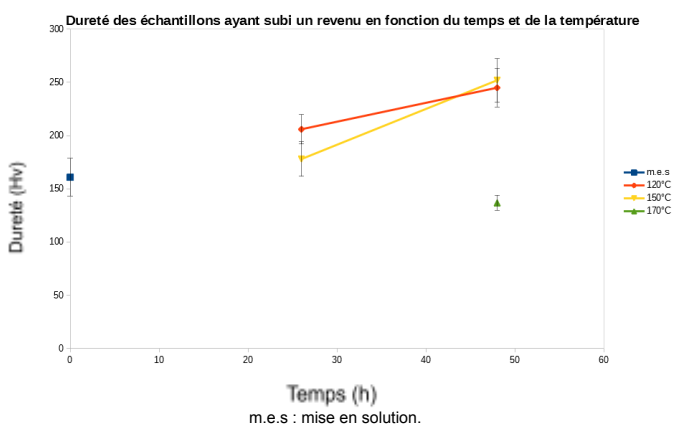
Tout d'abord, un facteur qui ne suit pas du tout les attentes du projet est le vieillessement ambiant (TAB 4) , le fait de figer la composition chimique en le laissant au congélateur entre chaque traitement thermique. En effet, la dureté des échantillons laissés à l'air libre devait être plus élevée que celle de ceux restés dans le congélateur. La moyenne des duretés des échantillons aurait été plus significative avec un nombre plus important d'échantillons.

Les échantillons uniquement mis en solution convergent vers une dureté d'environ 160 Hv (TAB 4) et ce, malgré la différence de temps de mise en solution.

Il a été conclu qu'une différence, assez courte, de temps n'a pas une très grande influence sur le réarrangement de la microstructure, la mise en solution de tous les solutés est donc atteinte dès 30 min. C'est pour cela que tous les échantillons qui ont subi un revenu ont le même temps de mise en solution qui est de 30 min.

La littérature dit qu'une mise en solution se fait sur une durée de 6h pour un échantillon de taille différente, de l'ordre du centimètre. Néanmoins, il reste cohérent avec les résultats expérimentaux du projet, car l'expérience a dû être adaptée à la taille des échantillons fournis.

Pour ceux qui ont subi un revenu, trois groupes sont différenciables à l'aide de leur température de traitement : 120°C, 150°C et 170°C.



On remarque plusieurs faits :

- ❖ Les échantillons sortis après 26h ont une dureté supérieure comparé à ceux après une mise en solution.
- ❖ La dureté des échantillons suite à un revenu à 170°C pendant 48h est la plus basse, et même en dessous de la dureté des échantillons ayant seulement subi une mise en solution.

FIG 12 : Dureté des échantillons ayant subi un revenu en fonction du temps et de la température.

- ❖ Les échantillons sortis après 48h ont une dureté très importante quand le four est à 120 ou 150°C. De plus, il est possible de considérer que les échantillons ayant subi ces deux traitements thermiques obtiennent une dureté équivalente.
- ❖ En revanche, les échantillons sortis après 26h ne possèdent pas la même dureté en considérant les barres d'erreurs et montrent donc l'importance de l'utilisation de la température pour le traitement thermique.

Malgré le manque de données au cours du temps, une augmentation de la dureté est remarquable lors du prolongement du temps de revenu. De plus, le traitement thermique de précipitation à 150°C semble augmenter davantage la dureté de l'alliage qu'un revenu à 120°C. Cependant, il est important de préciser que plus le traitement thermique de précipitation est long plus la dureté est importante. En effet, à partir d'un certain moment, la dureté commence à décroître, visible avec le revenu à 170°C, la dureté est très faible car l'alliage a été chauffé à une plus haute température et longtemps. Il aurait fallu mesurer la dureté à d'autres temps de revenu pour déterminer une courbe plus "réaliste" et pas linéaire comme ici pour modéliser au mieux la réalité.

Ce qui est cohérent avec la thèse de Marlaud : *"Un chauffage ultérieur à température modérée (de 120°C à 150°C)[...] l'état de dureté passe par un maximum : pic de dureté (T6). Au-delà du pic de dureté, on parle d'états sur-revenus"*.^[1]

La dureté des échantillons avec un revenu de 48h à 120°C et 150°C ont une dureté très similaire. De plus, la dureté maximale est en corrélation avec la littérature et est bien atteinte suite à un revenu avec ces mêmes conditions. En revanche, la dureté maximale décrite dans la littérature s'élève à 205 Hv, cette valeur ne suit malheureusement pas notre étude. Le traitement thermique utilisé sur cet alliage est appelé traitement thermique T6 et permet à celui-ci d'avoir une dureté maximale.

2. Discussion de la microstructure

Lors de l'observation de la microstructure, des différences entre les échantillons sont notables. Les images électroniques obtenues au microscope électronique à balayage sont montrées ci-dessus (figures 8 à 11).

Tout d'abord, il est nécessaire de préciser que la taille des grains, présentés sur la figure 10, est trop importante pour avoir une réelle incidence sur la microdureté. Il est plus intéressant d'étudier les caractéristiques des précipités présents dans les grains, c'est-à-dire leur taille et leur densité. La résistance du matériau dépend de comment les dislocations vont être bloquées, comme précédemment expliqué elles peuvent être de type : cisaillement ou contournement.

Création des zones libres de précipités :

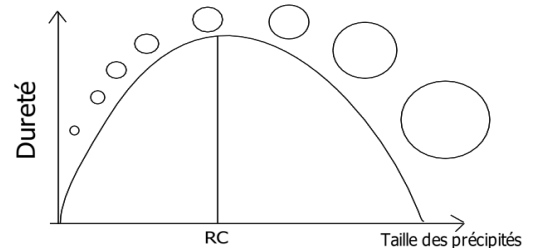
Les éléments d'addition (par ex: Zinc, Magnésium, Cuivre) se trouvant en solution solide vont devoir être diffusés pour créer des précipités lors du revenu. Cependant les joints de grains sont une zone de forte diffusivité comparée à l'intérieur des grains. Ainsi les précipités vont croître plus rapidement au niveau de ces joints de grains et créer une zone libre de précipités (PFZ) autour d'eux (les solutés ayant été sollicités au joint de grain, ils ne sont plus disponibles pour créer

des précipités à l'intérieur du grain sur une certaine zone). Cela peut être dépendant de la température.

Influence de la taille des précipités intragranulaires :

Différentes tailles de précipités ont été observées. Il est clair que plus la taille des précipités est grande, plus le cisaillement est difficile, ce qui mène à une dureté importante de l'alliage, car les dislocations vont de plus en plus être bloquées à cause de la grande taille des précipités.

Il ne faut cependant pas négliger le fait que, si les précipités atteignent un rayon critique, le mécanisme passe alors du cisaillement au contournement, entraînant alors une baisse de la dureté.



On peut donc résumer les dislocations de la sorte :

FIG 13 : l'évolution de la dureté en fonction de la taille des précipités.

En obtenant alors une densité et une taille de précipités assez importantes, ne dépassant pas un certain rapport, les dislocations de la microstructure auront plus de difficultés à cisailer les précipités, ce qui implique une microdureté importante.

Les résultats des expériences liés à cette étude :

Il est intéressant de noter que les échantillons ayant subi un traitement thermique de précipitation à 150°C et 120°C pendant 48h, ont une dureté très similaire. Néanmoins, il est important de remarquer que leur microstructure est légèrement différente (cf fig 10 et 11) :

- ❖ En effet, la densité des précipités de l'échantillon B, ayant subi un revenu à 150°C, est plus importante que l'échantillon C, ayant subi un revenu à 120°C.
- ❖ En revanche, pour la taille des précipités, il est plus difficile de la quantifier mais elle semble, en général, plus grande pour le revenu à 120°C que celui à 150°C.

On peut en déduire que :

- ❖ Un revenu à 150°C semble créer des précipitations moins nombreuses mais de taille plus importante.
- ❖ Un revenu à 120°C semble créer des précipitations plus nombreuses mais de taille moins importante.

Les deux facteurs se compensent et cela permet d'en conclure sur l'importance de la taille et de la densité lorsqu'on cherche à améliorer ou simplement modifier les propriétés de cet aluminium 7449. En effet, modifier ces facteurs entraîne un changement de la dureté de la microstructure, un équilibre entre ces deux facteurs est nécessaire pour atteindre une microdureté importante.

Ainsi, lors d'un traitement thermique de précipitation à 120 ou 150°C, les dislocations sont bloquées grâce au cisaillement, ce qui augmente la dureté de l'alliage 7449. Cependant lorsque ce pic est dépassé (>150°C) les dislocations se font en contournement des précipitations. Cette dislocation se met en place, car la taille des précipités est trop importante pour un cisaillement.

3. Les difficultés du projet

Au cours de ce projet, deux types de difficultés ont été rencontrés : celles liées à la réalisation des expériences et celles liées à l'analyse et la synthétisation des résultats.

Tout d'abord, la taille des échantillons fut surprenante. Ceux utilisés lors des expériences sont, comme préalablement dit, plus petits et d'une masse différente de ceux utilisés comme référence, c'est-à-dire ceux des documents bibliographiques consultés qui s'apparentaient plus à de grandes tôles industrielles. De plus, une charge de 1kg a été appliquée - masse minimale de la machine d'essai de dureté à disposition - ce qui est peut être trop élevé pour le volume de matière des échantillons.

Le temps de chauffe du four a paru très long lors des revenus à basses températures. De plus, la conservation d'une température stable est difficile, tout au long des périodes de chauffe (24h ou 48h). Ces difficultés sont dûes à l'overshoot, c'est-à-dire que le four va monter à une température supérieure à celle demandée, puis redescendre et se stabiliser. C'est pour cela qu'il faut toujours attendre 30 min après avoir allumé le four avant de mettre les échantillons.

De plus, lors du polissage, plusieurs échantillons ont été abîmés. En effet, au début, de nombreux disques de polissage étaient à disposition et étant totalement novices, des disques avec de trop gros grains ont été utilisés pour un polissage fin. Une trop grande quantité de matière a été perdue, les échantillons sont devenus extrêmement fins et certains ont été biseautés. Une réalisation de l'essai de dureté sur ces échantillons aurait été impossible, à moins d'accepter l'obtention de valeurs fausses. Pour la suite du polissage l'utilisation fut, d'un commun accord, réduite à deux disques (de grain 1200, 2400 et 4000). Deux paires d'échantillons ont été perdues au congélateur malgré l'étiquetage. Une seule a été retrouvée des semaines plus tard dans la salle de TP et réutilisée par la suite.

Au cours de la dernière partie de ce projet, des difficultés sont apparues lors de l'analyse et de la comparaison avec la littérature : par exemple, le rapport entre la littérature et l'expérimental n'est pas nécessairement évident du fait des conditions expérimentales différentes.

Enfin, le nombre de documents techniques et scientifiques non-vulgarisés est surprenant. Totalement novices dans ce domaine, que ce soit recherche documentaire d'envergure ou dans ce domaine, trouver des recherches biographiques compréhensibles à ce niveau de connaissance a été difficile. Ainsi cerner le projet et entrer dans le monde des matériaux a été exigeant car il a fallu s'adapter au vocabulaire et découvrir tout un nouveau domaine.

Conclusion

Ce projet a été une opportunité unique de comprendre un des mondes invisibles, de même que de cerner la manière de durcir un échantillon d'alliage 7449 par successions de traitements thermiques, ainsi que le rôle joué par la microstructure des matériaux.

Nous avons rencontré des difficultés à interpréter certains des résultats, notamment avant l'observation au microscope, et à faire le lien entre expérience et théorie. Dans le cadre de ce projet il a été possible de comprendre pourquoi il y a autant de recherches dans ce domaine et pourquoi cela occupe une place importante dans la société.

Développer en groupe de quatre la rigueur et la curiosité tout en conservant une part de manipulation a été utile pour notre parcours d'étudiant. Un réel équilibre des missions a été trouvé, les facilités de l'un permettaient d'aider à surmonter les peurs et l'incompréhension d'un autre. Au travers de ce projet, l'approche des compétences mécaniques du métier d'ingénieur a été possible. Disposer d'un matériel d'ingénieur avec des machines de pointe en quasi libre accès a été apprécié.

Ce projet permet de mener en autonomie des séries d'expériences et est une réelle chance pour ce cursus. En effet, aucun des membres du groupe ne semble poursuivre ses études vers les matériaux. Par conséquent, ces recherches ne seront peut-être jamais répétées ou appliquées par un des membres du groupe à un cas concret, tel que la construction de maquettes d'avion ou de canettes réfrigérantes.

Il serait tout de même intéressant à l'avenir, de travailler sur d'autres alliages d'aluminium, par exemple 5000, 6000, pour avoir une vision globale de ces alliages et pour comparer leurs propriétés chimiques et physiques ainsi que pour comprendre leurs influences sur les applications dans la vie quotidienne. L'expérience pourrait être refaite à une plus grande échelle, avec plus d'échantillons, pour de plus larges observations, avec des tailles plus importantes pour une comparaison avec la littérature plus facile, ou encore en essayant de placer plus d'enjeux et de challenges dans les recherches tels que la création d'un objet performant en aluminium sur lequel davantage de tests auraient pu être réalisés.

Bibliographie

[1] lien internet : https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00282987/file/T._Marlaud_These_2008.pdf
(valide à la date du 22/02/2022).

[2] lien internet :
<https://www.techniques-ingenieur-fr.ezproxy.normandie-univ.fr/base-documentaire/archives-th12/archives-traitement-des-metaux-tiamd/archive-1/traitements-thermiques-des-alliages-d-aluminium-m1290/>
(valide à la date du 19/02/2022).

[3] lien internet :
<https://www.techniques-ingenieur-fr.ezproxy.normandie-univ.fr/base-documentaire/materiaux-th11/traitements-thermique-s-des-aciers-des-alliages-et-des-fontes-42364210/traitements-thermiques-des-alliages-d-aluminium-m1290/>
(valide à la date du 19/02/2022).

[4] lien internet : <http://csidoc.insa-lyon.fr/these/2002/bellenger/chapitre5.pdf>
(valide à la date du 19/02/2022).

[5] lien internet : <https://www.euralliage.com/alliage.html#ancre652584>
(valide à la date du 19/02/2022).

[6] lien internet : <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/corroyage/19464>
(valide à la date du 19/02/2022).

[7] lien internet : <https://www.lalanguefrancaise.com/dictionnaire/definition/ecrouir>
(valide à la date du 19/02/2022).

[8] lien internet : <https://www.techno-science.net/definition/4557.html>
(valide à la date du 22/02/2022).

[9] lien internet : http://campus.cerimes.fr/odontologie/enseignement/chap1/site/html/3_33_2.html
(valide à la date du 22/02/2022).

[10] lien internet :
https://www.bodycote.com/wp-content/uploads/2018/02/FICHE_les_traitements_thermiques_des_alliages_aluminium-Fe_v2013.pdf
(valide à la date du 22/02/2022).

[11] lien internet : <https://constellation.uqac.ca/128/1/030123654.pdf>
(valide à la date du 22/02/2022).

[12] lien internet :
<https://www.techniques-ingenieur-fr.ezproxy.normandie-univ.fr/base-documentaire/materiaux-th11/traitements-thermique-s-des-aciers-des-alliages-et-des-fontes-42364210/traitements-thermiques-des-alliages-d-aluminium-m1290/>
(valide à la date du 22/02/2022).

[13] lien internet : https://www.mediachimie.org/sites/default/files/Espace_p171.pdf
(valide à la date du 22/02/2022).

[14] lien internet :

<https://www.buehler.fr/history-of-hardness.php#:~:text=L'essai%20de%20duret%C3%A9%20Vickers,Ltd%2C%20un%20conglom%C3%A9rat%20technique%20britannique.>

(valide à la date du 01/03/2022).

[15] lien internet : <https://www.groupe-installux.com/laluminium/applications/>

(valide à la date du 01/03/2022).

[16] lien internet : <https://www.aluminium.fr/histoire/>

(valide à la date du 10/05/2022)

[17] lien internet : <https://patents.google.com/patent/EP1231290A1/fr>

(valide à la date du 10/05/2022)

[18] lien internet :

<https://perennesphilippe.pagesperso-orange.fr/Files/Other/s22%20-%20activite%201%20-%20professeur.pdf>

(valide à la date du 24/05/2022)

[19] lien internet : <https://fr.wikipedia.org/wiki/Anodisation>

(valide à la date du 24/05/2022)

[20] lien internet :

<https://conceptec.net/fr/techniques-de-base/materiaux/essais-et-contrôles/essai-de-durete>

(valide à la date du 24/05/2022)

[21] lien internet :

<https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/construction-et-travaux-publics-th3/techniques-du-batiment-connaitre-les-materiaux-de-la-construction-43804210/l-aluminium-tba1066/>

Réf. : TBA1066 “L’aluminium”, *Construction et travaux publics | Techniques du bâtiment : l’enveloppe du bâtiment*, page 4-5, 2005, dernière validation 14/05/2019, téléchargé le 28/01/2022.
(valide à la date du 28/05/2022).

[22] lien internet :

<https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=3c1a95bbb1c748c283a29486d22bb975&ckck=1>

composition chimique alliage 7449

[23] lien internet :

https://fr.wikipedia.org/wiki/Traitement_thermique_d%27un_m%C3%A9tal#:~:text=Le%20traitement%20thermique%20d'une,limite%20d'%C3%A9lasticit%C3%A9%2C%20etc.

(valide à la date du 31/05/2022)

[24] lien internet:

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01266849/document>

(valide à la date du 02/06/2022)

[25] lien internet : <https://slideplayer.fr/slide/517209/>

(valide à la date du 08/06/2022)

[26] lien internet : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01266849/document>
(valide à la date du 09/06/22)

[27] lien internet : <http://deuns.chez.com/sciences/matiere/disloc22.html>
(valide à la date du 09/06/22)

Annexes

1. Méthodologie

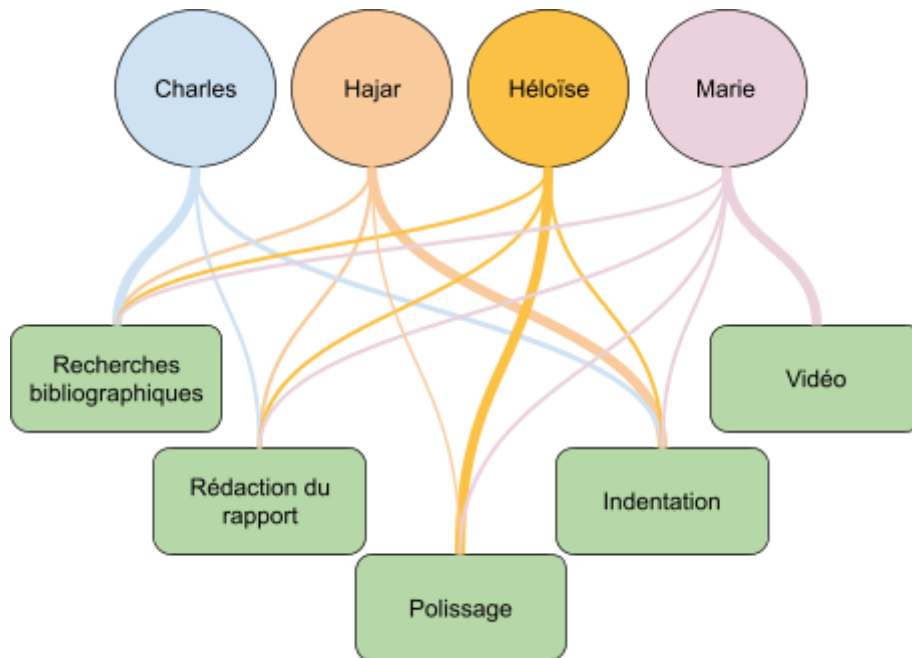


FIG 14 : Organigramme de répartition des tâches.

(semaine 13 : IS, semaine 15 et 16 : vacances)

- (1) : Mise en place de la méthodologie des expériences
- (2) : Découverte du polissage et du test de dureté + rédaction du rapport
- (3) : Mise en chauffe pour traitement thermique de mise en solution
- (4) : Visite au laboratoire GPM de l'UFR + rédaction du rapport
- (5) : Séance de 3h de rattrapage de la semaine 14

Sem	5-6-7	8	9	10	11	12	14
Charles	Document ation	Découverte du labo +Documenta tion	(2)	(1)	(3) +Lecture	(3) +Lecture	absence prof
Hajar				Indent	Indent	Polissage	
Héloïse				(1)	Polissage	(3) +Aide +Polissage +Rapport	
Marie							

TAB 6 : Ce que l'on a fait durant les semaines de projet (1/3).

Sem	17	18	19	20	21 (5)	22	23
Charles	(3) +17bis +Indent	(3) +Indent +Polissage	Rapport +indent	(4) +Indent	(4) +Polissage +Vidéo	Rapport	Rapport +Diaporama
Hajar	Indent +Polissage +17bis	Indent +Polissage		(4) +Polissage +Vidéo +Indent		Rapport	Diaporama
Héloïse	Indent +Polissage +17bis	Indent +Polissage +18bis		(4) +Polissage +Vidéo +20bis		Rapport	Diaporama
Marie	Indent +Polissage +17bis	Indent +Polissage+ 18bis		(4) +Vidéo +20bis		Rapport	+Affiche +Diaporama

TAB 7 : Ce que l'on a fait durant les semaines de projet (2/3).

Sem	17bis	18bis	20bis
Charles	(Mercredi après-midi) Polissage et indent [+26h]	/	/
Hajar	(Jeudi après-midi) Polissage et indent [+48h]	/	/
Héloïse	(Mercredi après-midi) Polissage et indent [+26h]	(Mercredi après-midi) Polissage et indent [+26h]	(Jeudi après-midi) Polissage et indent [+48h]
Marie	(Mardi après-midi) Mise en chauffe pour TT precipitation	(Mardi après-midi) Mise en chauffe pour TT precipitation (Jeudi après-midi) +Polissage et indent [+48h]	(Mardi après-midi) Mise en chauffe pour TT precipitation

TAB 8 : Ce que l'on a fait durant les semaines de projet (3/3).

2. Tableaux des résultats

N° Echantillon	B	D	F	G	I	J	K	L	M	N	O	Q	R	S	T	U	W	X	V
Dureté (Hv)	192,7	166,7	131,8	126	179,8	167,2	153,5	155,5	158	209,6	191,9	206,1	290,1	248,7	292,7	234,4	198,3	187,5	170,8
	171,4	157,8	147	141,4	162,3	185,1	162,6	163,8	168,2	196,5	193,1	195,3	225,4	227,7	213,5	222,2	202,2	205,9	143,1
	160,1		134,3	146,3	127,3	144,2	159	153,4	163,8	196,7	204,4	188,6	236,2	216,5	193,1	234,1	214,2	196,1	179,5
	152,1									201,8	221	202,1				230,5	202,1	197,9	138,2
	158,5																		177,2
Moyenne des résultats	166,96	162,25	137,7	137,9	156,466667	165,5	158,366667	157,566667	163,333333	201,15	202,6	198,025	250,566667	230,966667	233,1	230,3	204,2	196,85	161,76
Différence 1ère indet	27,74	45,85	-1,025	-1,525	44,70833333	21,175	47,38333333	38,58333333	12,99166667	2,45	10,8	4,225	-4,6666667	-11,466667	25,525	-44,625	-34,4	45,05	99,7066667
	+1mois		+2semaine				+3mois						+1semaine						

N° Echantillon	S	W	X	V
Dureté (Hv)	202	142	145	143,5
Moyenne des résultats	218	143,5	143,5	143,5
Différence 2ème et 0 et 1er et 2ème indet	-32,325	99,7066667	18,26	
	12,3			
	+2semaines			

TAB 9 : Résultats ré-indentés.

N° Echantillon	N	O	Q	R	S	T	U	W	X	V	F	G
Dureté (Hv)	199,3	195,7	192,7	257,9	248,7	263,1	209,9	170,6	230,1	262,5	144,2	139,9
	222,9	225,9	195,3	247,8	227,7	249	178,6	175,5	233,1	276,1	139,4	139
	196,1	216	210,5	232	216,5	261,2	182,3	166	262,5	245,8	133,9	136
	196,1	216	210,5			261,2	171,9	167,1			129,2	130,6
Moyenne des résultats	203,6	213,4	202,25	245,9	230,966667	258,625	185,675	169,8	241,9	261,466667	136,675	136,375

Température 1ère chauffe	470°C	470°C	470°C	470°C	470°C	470°C	470°C	470°C	470°C	470°C	470°C	470°C
Temps	30min	30min	30min	30min	30min	30min	30min	30min	30min	30min	45min	45min
Température recuit	120°C	120°C	120°C	120°C	120°C	120°C	150°C	150°C	150°C	150°C	170°C	170°C
Temps	26h	26h	26h	48h	48h	48h	26h	26h	48h	48h	48h	48h

TAB 10 : Résultats avec revenu.

N° Echantillon	A	B	C	D	E	H	I	J	K	L	M
Dureté (Hv)	158,4	192,7	183,6	166,7	153,3	153,7	179,8	167,2	153,5	155,5	158
	146	171,4	153,4	157,8	165	141,3	162,3	185,1	162,6	163,8	168,2
	191,1	160,1	197,9		141,4	130,4	127,3	144,2	159	153,4	163,8
		152,1	197,9		141,4						
		158,5									
Moyenne des résultats	165,166667	166,96	183,2	162,25	150,275	141,8	156,466667	165,5	158,366667	157,566667	163,333333

Température 1ère chauffe	470°C	470°C	470°C	470°C	470°C	470°C	470°C	470°C	470°C	470°C	470°C
Temps	30min	30min	30min	45min	45min	30min	30min	30min	30min	30min	30min

TAB 11 : Résultats sans revenu.

Echantillons congélateur

N° Echantillon	A	D	U	V
Dureté (Hv)	158,4	166,7	209,9	262,5
	146	157,8	178,6	276,1
	191,1		182,3	245,8
			171,9	
Moyenne des résultats	165,1667	162,25	185,675	261,466667

Température 1ère chauffe	470°C	470°C	470°C	470°C
Temps	30min	45min	30min	30min
			150°C	150°C
			26h	48h

TAB 12 : Résultats au congélateur.

Echantillons air Libre

N° Echantillon	B	C	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	Q	R	S	T	W	X
Dureté (Hv)	192,7	183,6	153,3	144,2	139,9	153,7	179,8	167,2	153,5	155,5	158	199,3	195,7	192,7	257,9	248,7	263,1	170,6	230,1
	171,4	153,4	165	139,4	139	141,3	162,3	185,1	162,6	163,8	168,2	222,9	225,9	195,3	247,8	227,7	249	175,5	233,1
	160,1	197,9	141,4	133,9	136	130,4	127,3	144,2	159	153,4	163,8	196,1	216	210,5	232	216,5	261,2	166	262,5
	152,1	197,9	141,4	129,2	130,6							196,1	216	210,5			261,2	167,1	
	158,5																		
Moyenne des résultats	166,96	183,2	150,275	136,675	136,375	141,8	156,466667	165,5	158,366667	157,566667	163,333333	203,6	213,4	202,25	245,9	230,966667	258,625	169,8	241,9
Température 1ère chauffe	470°C	470°C	470°C	470°C	470°C	470°C	470°C	470°C	470°C	470°C	470°C	470°C	470°C	470°C	470°C	470°C	470°C	470°C	470°C
Temps	30min	30min	45min	45min	45min	30min	30min	30min	30min	30min	30min	30min	30min	30min	30min	30min	30min	30min	30min
				170°C	170°C									120°C	120°C	120°C	120°C	120°C	150°C
				48h	48h									26h	26h	26h	48h	48h	26h

TAB 13 : Résultats à l'air libre.

3. Lexique

-A-

Alliage à traitement thermique : expression couramment employée pour désigner un alliage durcissable par traitement thermique.^[2]

Alliage sans traitement thermique : expression couramment employée pour désigner un alliage non durcissable par traitement thermique.^[2]

Alliage auto trempant : alliage dont la vitesse critique de trempe est inférieure à la vitesse de refroidissement naturel se produisant en air calme après transformation à chaud, ou dans le moule après solidification des pièces coulées.^[2]

-C-

Corroyage : Action de déformer un métal ou un alliage à chaud.^[6]

Coalescence : Réunion, fusion d'éléments qui sont en contact.^[Le Larousse]

-D-

Dislocation : est un défaut linéaire correspondant à une discontinuité dans l'organisation de la structure cristalline. Une dislocation peut être vue simplement comme un "quantum" de déformation élémentaire au sein d'un cristal possédant un champ de contrainte à longue distance.^[8]

Durcissement structural : durcissement résultant de l'évolution physico-chimique par maturation ou revenu d'une solution solide sursaturée.^[2]

-E-

Écrouir : Battre un métal à froid ou à une température inférieure à sa température de revenu, et éventuellement l'étirer ou le laminier, afin de le rendre plus dense, plus élastique et plus résistant.^[7]

-G-

GPM : Laboratoire Génie Physique Des Matériaux.

-H-

Homogénéisation : traitement comportant un chauffage à température

relativement élevée, appliqué à certains produits bruts de fonderie ou corroyés.^[2]

-J-

Joint de grain : est, par définition, la surface qui sépare deux cristaux d'orientations différentes dans un agrégat polycristallin.^[9]

-M-

Mise en solution : traitement suivant lequel un alliage est chauffé à une température convenable et maintenu à cette température pendant un temps suffisant pour permettre aux constituants solubles d'entrer en solution solide où ils seront retenus en état sursaturé après la trempe.^[2]

MET : Microscopie Electronique en Transmission

Maturation : évolution spontanée à température ordinaire de la solution solide sursaturée. Après cette évolution, l'alliage est dit à l'état mûri.^[2]

-P-

PFZ : Precipitate Free Zone

Phase métastable η' : températures intermédiaires (entre 120°C et 180°C) et confère à l'alliage sa plus grande limite d'élasticité. Celle-ci peut être cisailée par les dislocation.^[1]

Pic de durcissement : correspond à un état métallurgique particulier, pour lequel les propriétés mécaniques en traction, comme la limite élastique ou la limite à rupture sont les plus élevées.^[1]

Précipités : Les précipités ont pour effet de freiner ou de bloquer les dislocations, augmentant ainsi la limite d'écoulement du matériau.^[1]

-R-

Revenu étagé (double revenu) : revenu effectué en deux étapes successives à des niveaux différents de température.^[2]

Revenu ou maturation artificielle : durcissement à température supérieure à la

température ordinaire d'une solution solide sursaturée obtenue par trempe de l'alliage.^[2]

-S-

Sous-revenu : revenu dont la durée est inférieure à celle qui procure le maximum de durcissement structural à la température de maintien effective.^[2]

Sur-revenu : revenu dont la durée est supérieure à celle qui procure le maximum de durcissement structural à la température de maintien effective.^[2]

Sursaturation : État d'équilibre d'une solution contenant une quantité de substance dissoute supérieure à celle qui est normalement nécessaire à la saturation de la solution. [Définition google, le Robert]

-T-

Traitement de stabilisation : chauffage et maintien à température appropriée d'un produit dont les propriétés sont susceptibles d'évoluer dans le temps ou dans les conditions d'emploi, afin d'interdire ou de limiter cette évolution.^[2]

Traitement thermique RRA : Retrogression and Re-aging (ou T77) est un traitement thermique tri-palier. Le traitement RRA est appliqué à des états au pic de dureté ou légèrement sous-revenus, et consiste en la succession de deux étapes :

Une réversion de courte durée (5 s à 40 min) dans une gamme de température élevée (170-280°C)

Un revenu final, dans les mêmes conditions que celles menant à l'état initial (120-150°C)^[1]

Trempe : opération de refroidissement effectuée de façon que la solution solide obtenue à chaud à température appropriée soit maintenue en état de sursaturation.^[2]

Trempe structurale : traitement thermique complet assurant un durcissement structural ; ce traitement comprend généralement une mise en solution immédiatement : d'un refroidissement convenable maintenant la solution solide en sursaturation (trempe proprement dite) ; d'une maturation ou /et d'un revenu produisant un durcissement.^[2]

-V-

Vitesse critique de trempe : vitesse minimale conduisant à la loi critique de refroidissement qui permet le maintien des constituants en solution solide sursaturée et l'obtention de caractéristiques minimales garanties après le phénomène de durcissement^[2]

4. Photographies

a. Exemples de photos d'indent prises à l'INSA

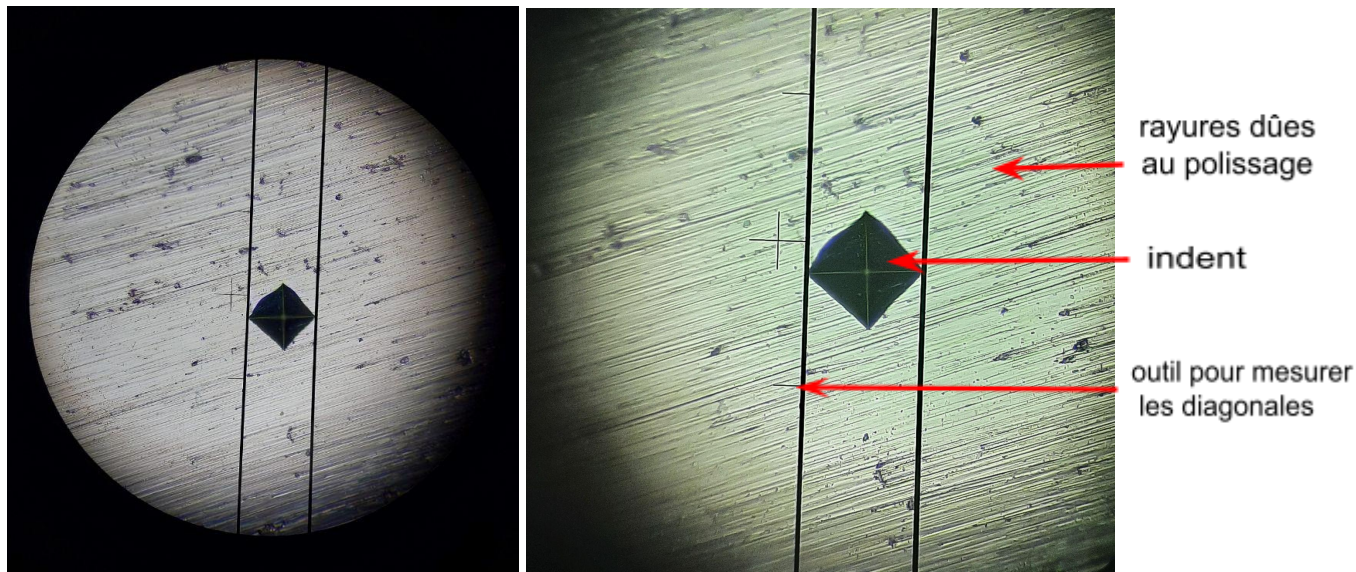


FIG 15 et 16 : Exemples de ce que l'on peut voir au microscope optique après une indentation.

b. Photos d'analyse prise au laboratoire Groupe Physique des Matériaux

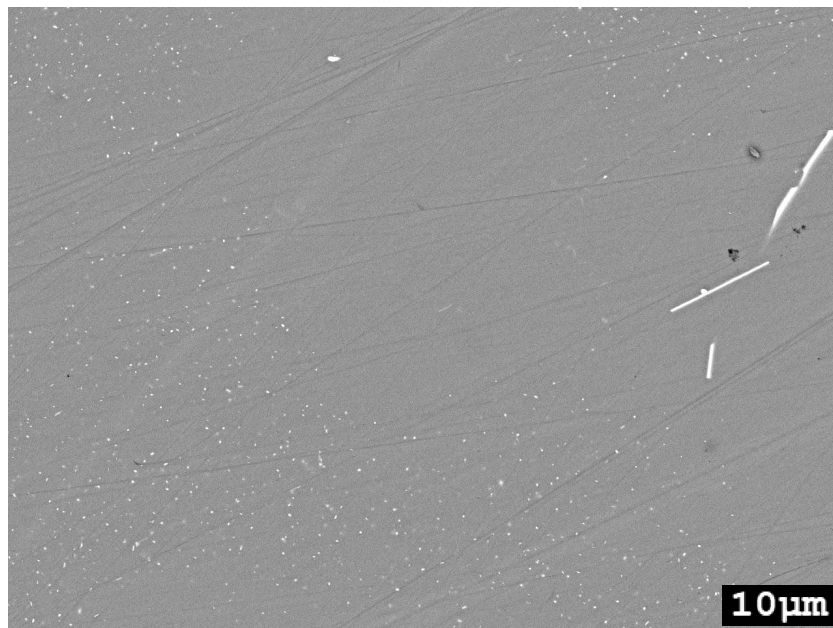
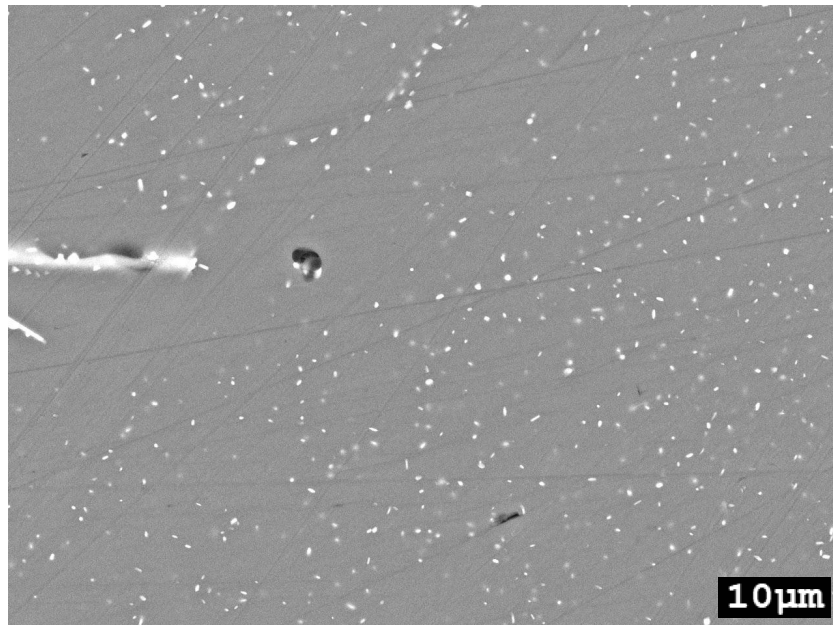


FIG 17 et 18 : photos au microscope électronique à balayage de l'échantillon W.

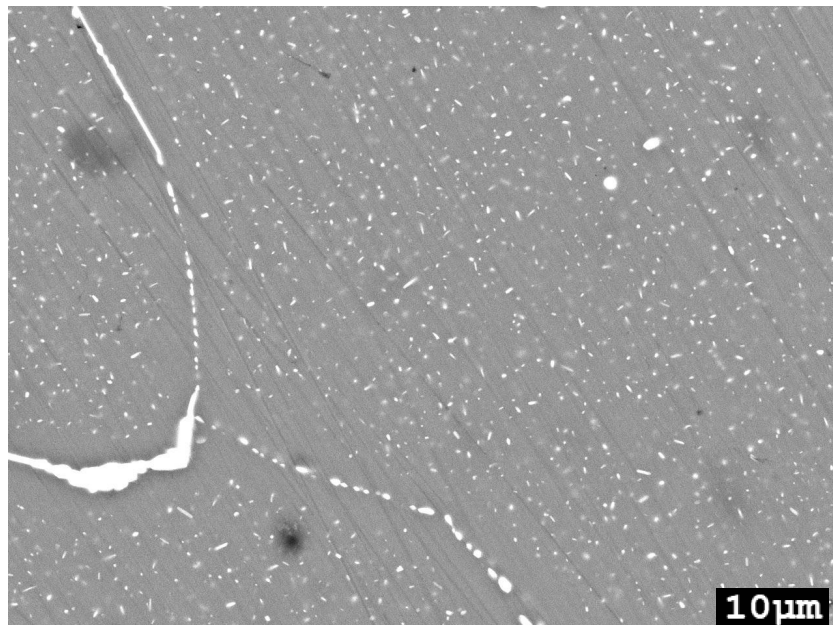
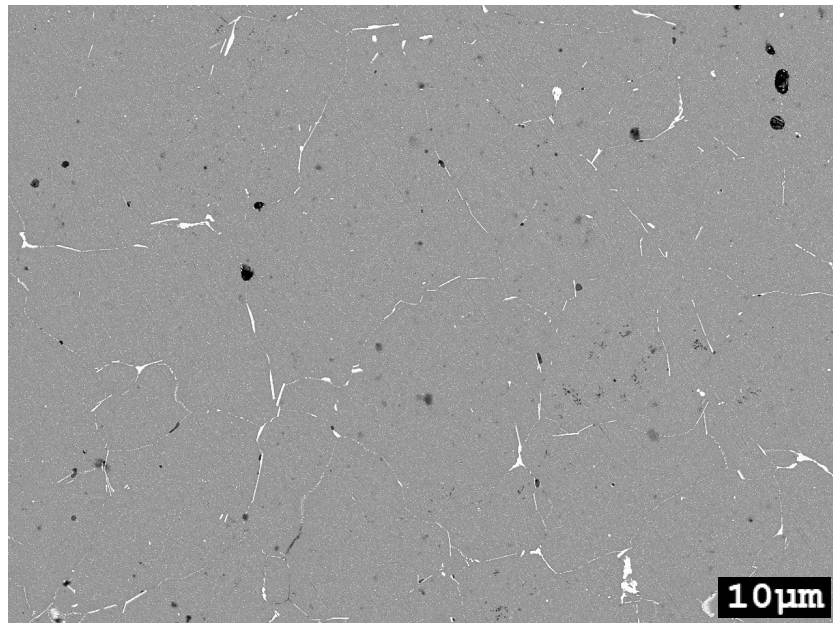


FIG 19 et 20 : photos au microscope électronique à balayage de l'échantillon X.



FIG 21 : Pièce comprenant le microscope électronique à balayage au laboratoire GPM

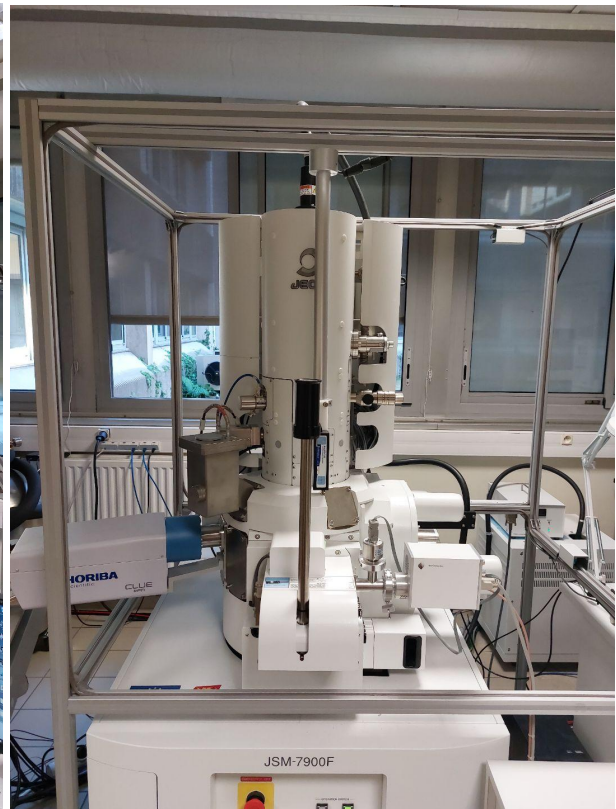


FIG 22 et 23 : Microscope électronique à balayage



FIG 24 : Mise en place des échantillons sur le support du microscope électronique à balayage à l'aide d'une pince