

N° d'ordre :

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOULOUD MAMMARI DE TIZI-OUZOU
FACULTE DES SCIENCES

DEPARTEMENT DE CHIMIE



MEMOIRE

Présentée pour obtenir le Grade de

MASTER

Filière : Chimie

Spécialité : Physique Chimie des Matériaux

Par

Mr :ALLEG Yahia

Thème

**CONTRIBUTION AU PROJET D'ELABORATION DE NOUVEAUX
ALLIAGES D'ALUMINIUM DE TYPE B206**

Soutenu le 07 juillet 2013 , devant le jury composé de :

Mr	SADAoui Youcef	MCA - UMMTO	Président
Mr	DELLAH Mohamed	MAA - UMMTO	Encadreur
Mr	BOURNANE Mohamed	Pr -UQAC- Canada	Co-Encadreur
Mme	DELLAH Saliha	MCA - UMMTO	Examinatrice
Mr	ASMA Farid	MCA - UMMTO	Examineur
Mr	KADOUche Slimane	MCB - UMMTO	Examineur

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier d'une façon générale, l'ensemble de nos enseignants pour tout le savoir qu'ils nous ont donné à l'issue de notre cursus universitaire, en particulier :

Notre promoteur Monsieur DELLAH M. et notre Co promoteur le professeur BOURNANE Mohamed de l'UQAC – Canada, pour nous avoir confié ce sujet.

Nos vifs remerciements vont également à :

A Monsieur KHIMECHE Kamel, de l'EMP- Bordj El Bahri.

Nos sincères remerciements vont aussi aux membres du jury pour nous avoir fait l'honneur d'examiner et de juger notre travail.

DEDICACES

A la mémoire de mes défunts parents et frère aîné.

*A ma femme sans laquelle je n'aurais pas pu poursuivre mes études et
achever ce master ;*

*A mes enfants, ma sœur, mon neveu, mon frère et sa petite famille, aux
quels je souhaite bonheur et prospérité.*

YAHIA

Sommaire

	<i>Page</i>
<i>I Introduction</i>	<i>1</i>
<i>I.1 Problématique</i>	<i>3</i>
<i>I.2 Objectif</i>	<i>4</i>
<i>II. Les alliages d'aluminium</i>	<i>4</i>
<i>1°-propriétés d'usage</i>	<i>5</i>
<i>2°- propriétés de façonnage</i>	<i>5</i>
<i>II.1 désignation des alliages d'aluminium</i>	<i>6</i>
<i>-alliages de fonderie</i>	<i>6</i>
<i>-alliages corroyés</i>	<i>6</i>
<i>II.2 Propriétés physiques</i>	<i>6</i>
<i>II.3 Alliages d'aluminium B206</i>	<i>8</i>
<i>II.3.1-propriétés de traction</i>	<i>8</i>
<i>II.3.2 Effets des éléments alliés sur les propriétés mécaniques</i>	<i>13</i>
<i>II. 4 Propriétés mécaniques des alliages aluminium-cuivre</i>	<i>15</i>
<i>II.4.1 -tests de traction</i>	<i>15</i>
<i>II.4.2 -essais de micro-dureté</i>	<i>18</i>
<i>a- le principe</i>	<i>18</i>
<i>b- la micro-dureté de Vickers</i>	<i>18</i>
<i>III -Procédures expérimentales</i>	<i>20</i>
<i>III.1 Préparation des alliages</i>	<i>20</i>
<i>III.1.1 Affinage de grains</i>	<i>20</i>
<i>III.1.2 Composition chimique des différents alliages utilisés</i>	<i>21</i>
<i>III.2 Traitements thermiques</i>	<i>22</i>
<i>III.2.1 mise en solution</i>	<i>23</i>
<i>III.2.2 la trempe</i>	<i>23</i>
<i>III.3 le vieillissement</i>	<i>24</i>

<i>a- naturel</i>	24
<i>b – artificiel</i>	25
III.4 Analyses thermiques	26
III.5 Microscopie électronique a balayage	28
III.5.1 Principe de la méthode	28
IV. Partie expérimentale	30
IV.1 L'analyse thermique	30
<i>IV.2 Le polissage</i>	33
<i>IV. 3 L'analyse MEB</i>	36
IV.4 Essais de la micro-dureté	37
IV.5 Analyse calorimétrique différentielle (DSC)	40
V. interprétation des résultats obtenus	45
<i>Conclusion</i>	47
<i>Perspectives</i>	47
<i>Références bibliographiques</i>	48

I. Introduction :

Il est admis que l'aluminium est un métal très répandu sur le globe terrestre, le troisième élément après l'oxygène et le silicium, les bauxites qui sont des roches riches en aluminium constituent actuellement la source quasi exclusive de ce métal.

L'alumine est extraite de la bauxite par le procédé Bayer : la bauxite est broyée puis attaquée à chaud par la soude, on obtient une liqueur qui après séparation des oxydes de fer et de silicium est envoyée dans des décomposeurs pour la précipitation de l'alumine.

L'aluminium est obtenu à partir de l'alumine par électrolyse dans une cuve comportant un garnissage en carbone (cathode), l'aluminium formé par électrolyse se dépose au fond de la cuve.

Il est possible d'améliorer les propriétés réduites de l'aluminium non allié, en ajoutant des éléments qui modifient plus ou moins profondément la microstructure.

Les alliages d'aluminium ont d'excellentes caractéristiques dont le point de fusion est relativement bas, la bonne résistance à la corrosion et la facilité de la maniabilité.

Les alliages d'aluminium sont obtenus par divers procédés entre autre, le moulage, le forgeage, le laminage à chaud ou à froid et l'extrusion, parmi cette grande variété de procédés de coulée, le moulage est le plus utilisé [4,11], même s'il présente quelques inconvénients, comme la formation de certains défauts tels que la porosité et la ségrégation.

Cependant ces défauts doivent être minimisés par quelques mesures au préalable de la coulée, à savoir la conception d'un bon moule, un traitement approprié (nettoyage, le dégazage et le raffinage), une bonne optimisation des paramètres de moulage tels que la température de fusion au point de coulée, la température de préchauffage de moule et le taux de refroidissement, et surtout de la chimie des matériaux, le cas échéant ces défauts sont à l'origine de la mauvaise coulabilité et de la fissuration à chaud : c'est la fissuration lors de la solidification due à la contraction thermique du métal solide.[4]

Un groupe important de système aluminium-cuivre-magnésium-manganèse (Al-Cu-Mg-Mn) est sujet de recherche pour relever ce déficit, La famille de l'alliage d'aluminium-cuivre 206 est la plus récente de ce groupe. L'alliage 206.0 est une modification de l'alliage français AU5GT-T4, inscrit auprès de "Aluminum Association" comme 204.0-T4 et était au service pendant plusieurs décennies [4,6 Art], mais il est très coûteux car il contient plus de 0,7% Ag et inutile dans certaines applications industrielles.

L'alliage 206.0 a été enregistré par "Aluminum Association" en 1976 [6], il a servi pendant une quarantaine d'années et il est considéré comme l'alliage d'aluminium de fonderie le plus résistant.

Le but de développer cet alliage était de conserver la même ductilité et la même résistance à la déformation que possède l'alliage 201.0 tout en réduisant son coût de production à un niveau comparable à d'autres alliages de fonderie.

Ses utilisations typiques incluent des applications où la limite d'élasticité, la résistance à la traction et la ténacité doivent être élevées.

Aujourd'hui, deux versions en plus de cet alliage ont été enregistrées [13], le premier alliage A206.0 est la version la plus couramment utilisée dans les applications aérospatiale et automobile, il est très résistant et ductile, mais par contre il est difficile à couler à cause de sa tendance à la fissuration à chaud [9,10], ce micro-défaut inévitable, réduit considérablement la solidité et les propriétés mécaniques de cet alliage tel que la coulée [1], le second alliage, dénommé B206.0 et récemment enregistré [13], diffère principalement des autres alliages dans la limite inférieure en Ti.

Cet alliage B206 standard fait partie de la catégorie de métaux recyclés et est surtout très demandé dans l'industrie de l'automobile et l'aérospatial, il a d'excellentes caractéristiques de coulabilité et de très bonnes propriétés mécaniques, mais il est rarement utilisé en raison de sa propension à la fissuration à chaud.[4]

Cependant, pour des alliages dont les rapports Fe/Si avoisinant l'unité, appelés désormais alliages de types B206, des études récentes ont clairement mis en évidence une nette amélioration de leur fissuration à chaud par rapport à celle de l'alliage standard B206 tout en gardant des propriétés mécaniques largement acceptables [4].

Ce travail s'inscrit dans le cadre de la collaboration aux travaux déjà entamés par des chercheurs d'Alcan l'international (M. DELLAH et équipe), ayant pour objectif d'améliorer les propriétés mécaniques des alliages de types B206 tel que coulés en leurs ajoutant des teneurs en Mg variant de 0,2 à 0,6 %.

La composition de ces alliages est résumée dans le tableau suivant :

Composition									
Alliage	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ti	Zn	Reste	Total
206.0	0.10	0.15	4.2-5.0	0.20-0.50	0.15-0.35	0.15-0.30	0.10	0.05	0.15
206.2	0.10	0.10	4.2-5.0	0.20-0.50	0.15-0.35	0.15-0.25	0.05	0.05	0.15
A206.0	0.05	0.10	4.2-5.0	0.20-0.50	0.15-0.35	0.15-0.30	0.10	0.05	0.15
A206.2	0.05	0.07	4.2-5.0	0.20-0.50	0.15-0.35	0.15-0.25	0.05	0.05	0.15
B206.0	0.05	0.10	4.2-5.0	0.20-0.50	0.15-0.35	0.10	0.10	0.05	0.15
B206.2	0.05	0.07	4.2-5.0	0.20-0.50	0.15-0.35	0.05	0.05	0.05	0.15

Tableau 1 : Composition des alliages [4]

I.1. Problématique :

L'aluminium et ses alliages se sont imposés petit à petit dans notre vie quotidienne, à la maison sous forme d'ustensiles de cuisines tels que les casseroles et le papier d'aluminium, aux chantiers comme matériaux de construction (poutres, revêtements, fenêtres, etc.) et à l'industrie automobile autant que pièces de moteur, carrosserie, roues...etc. ce qui élargi leurs gammes d'utilisation, engendrant un besoin de grandes quantités de rebut d'aluminium pour satisfaire autant de demandes (consommateurs).

Devant cette importante demande, le recyclage est devenu incontournable dans ce domaine, d'ailleurs depuis quelques années, on constate un rapide développement des alliages d'aluminium obtenus à partir d'aluminium recyclé, néanmoins le contrôle de l'optimisation des éléments alliés, se faisait avec des traitements chimiques couteux et la plus part de ces traitements sont polluants de l'environnement, la modification de la microstructure comme alternative pour éliminer ses inconvénients et préserver les qualités et les propriétés mécaniques des alliages d'aluminium, fait objet d'études mais peut nombreuses jusqu'à maintenant.

L'alliage d'aluminium B 206, fait partie de cette catégorie de métaux recyclés, ayant retrouvés voir améliorer les propriétés de base de l'alliage, en plus de ses bonnes propriétés mécaniques, le B206 a d'excellentes caractéristiques de coulabilité, mais il est rarement

utiliser à cause de sa tendance à la fissuration à chaud, inconvénient majeur car le B206 est un alliage d'aluminium destiné à l'industrie aérospatiale et automobile. [2, 3, 4]

I.2. Objectif :

Notre travail se veut comme contribution aux travaux engagés par l'équipe des chercheurs d'alcan international à objectif d'évaluer l'effet de l'augmentation du titre en magnésium ainsi que son influence sur la microstructure et les propriétés mécaniques de l'alliage B206 modifié.

Pour ce faire, on intervient sur Dix compositions d'alliage B206 modifié avec un rapport Fe/Si =1 pour différentes teneurs en magnésium (de 0,1 à 2 avec des pas de 0,1).

Dans la première partie, nous avons repris les travaux d'analyse de la microstructure et des essais mécaniques déjà réalisés par l'équipe de recherche alcan international, tel que : Les essais de traction et les traitements thermiques (mise en solution, trempe et vieillissement naturel T4) et des essais mécanique sont réalisés après les traitements thermiques afin d'étudier l'effet de vieillissement naturel T4 et l'augmentation de titre de magnésium sur les propriétés mécaniques et la microstructure de l'alliage B206 modifié.[4,6]

La seconde partie de notre travail concerne les travaux d'analyse de la microstructure et des essais mécaniques que nous avons réalisés tels que :

- Le polissage des échantillons
- Les analyses thermiques
- La microscopie électronique à balayage
- Les essais de micro-dureté.
- Calorimétrie différentielle à balayage

II. Les alliages d'aluminium :

L'aluminium à l'état pur est difficilement utilisable dans l'industrie, l'addition, à l'aluminium pur d'un ou plusieurs éléments (métal ou non métal) peut modifier profondément ses propriétés, les mélanges ainsi obtenus se nomment alliages d'aluminium, un alliage est dit binaire, ternaire, quaternaire suivant qu'il renferme deux, trois ou quatre éléments d'addition. [1, 2]

Pour choisir un alliage en vue d'une ou plusieurs applications précises, on doit considérer de nombreux facteurs que l'on peut classer en trois catégories :

Les propriétés d'usage, les Propriétés de façonnage et le prix (des fois possibilité d'approvisionnement) :

1° propriétés d'usage :

- Mécaniques, définies par des essais mécaniques.
- Physiques, définies par la masse volumique, la dilatation, la résistivité, la conduction calorifique...
- Chimiques, définies par la résistance à l'action de divers produits chimiques et des agents atmosphériques (la corrosion).

2° Propriétés de façonnage :

Les propriétés de façonnage permettent de réaliser avec un alliage un objet de forme déterminée par coulée

- Par déformation à chaud (forgeage, laminage, matriçage, tréfilage)
- Par déformation à froid (laminage, tréfilage, emboutissage)
- Par usinage à l'aide d'outils coupants (tournage, fraisage, etc.)

Alors que les propriétés d'usage sont relativement bien connues et en général exprimables par des nombres, les propriétés de façonnage apparaissent complexes et difficiles par des essais, elles sont déterminées que par l'expérience industrielle.

A ce point de vue on est conduit à envisager deux catégories d'alliages, les alliages corroyés et les alliages de moulage :

Les alliages corroyés sont obtenus par des procédés de déformation plastique à chaud ou à froid tels que le filage, le laminage, par contre les alliages de moulage sont obtenus par fonderie seulement.

Pour différencier ces deux catégories on procède par la désignation numérique standard (Aluminium Association):

Trois chiffres et une décimale pour les alliages de fonderie, et quatre chiffres pour les alliages corroyés.

II.1. Désignation des alliages d'aluminium (Aluminium Association) :

Alliage de fonderie		Alliage corroyés	
Série	Alliage	Série	Alliage
100.0	Al commercial pur	1000.0	Al $\geq 99\%$
200.0	Al-Cu	2000.0	Al-Cu et Al-Cu-Mg
300.0	Al-Si-Mg et Al-Si-Cu	3000.0	Al-Mn
400.0	Al-Si	4000.0	Al-Si
500.0	Al-Mg	5000.0	Al-Mg
700.0	Al-Zn	6000.0	Al-Mg-Si
800.0	Al-Sn	7000.0	Al-Zn-Mg et Al-Zn-Mg-Cu
900.0	Al et autres éléments	8000.0	Al et autres éléments

Le premier chiffre de la série désigne la famille et indique le ou les principaux éléments alliés (tableau ci-dessus).

Pour les alliages corroyés des séries 2xxx à 8xxx, le deuxième chiffre indique les modifications de l'alliage original. Les deux derniers chiffres n'ont pas vraiment de signification autre que la différenciation des différents alliages de la série.

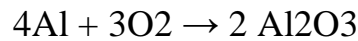
Pour le groupe lxxx, la série lOxx est utilisée pour désigner les compositions non alliées qui ont les limites d'impuretés naturelles, les deux derniers des quatre chiffres indiquent le pourcentage minimum d'aluminium.

Pour les alliages de fonderie, les deux chiffres suivants de la série indiquent les éléments spécifiques dans l'alliage et le dernier chiffre après le point indique la forme du produit, soit coulé ou en lingot, dans la série lxx.x, les autres chiffres représentent la pureté de l'alliage.[2, 4, 11]

II.2. Propriétés Physiques :

Le rapide développement de l'aluminium et sa contribution aux grandes évolutions techniques de notre époque sont dus à ses propriétés exceptionnelles,

Métal mou, léger et malléable, il est très facilement oxydable. A l'air, il se forme une couche de quelques micromètres d'oxyde d'aluminium : Al_2O_3 appelé alumine, solide réfractaire, selon la réaction :



Cette couche imperméable, transparente et translucide le protège et empêche la corrosion de progresser. A la différence de la plupart des métaux, l'aluminium est utilisable même s'il est oxydé en surface. On peut même dire que sans cette couche d'oxyde, il serait impropre à la plupart de ses applications, de plus, l'aluminium :

- est trois fois plus léger que l'acier.
- ses performances mécanique/masse sont comparables à celles de l'acier.
- c'est un excellent conducteur de l'électricité et de la chaleur.
- il résiste naturellement à la corrosion de l'air et de l'eau.
- son inertie chimique et sa stabilité métallurgique en font un métal adapté à la protection et à la conservation des produits.
- il se prête facilement aux traitements de surface, avec surfaces lustrées et peu ou pas de défauts
- une bonne fluidité pour remplir chaque partie du moule.
- Un point de fusion relativement bas.
- Un transfert de chaleur rapide de l'aluminium liquide vers le moule, qui assure un cycle de mise en forme rapide.
- L'hydrogène qui est le seul gaz avec lequel l'aluminium et ses alliages sont solubles peut être contrôlé efficacement.
- Plusieurs alliages d'aluminium n'ont relativement pas de tendance au craquage à chaud.
- Il est 100% recyclable en gardant les mêmes caractéristiques.

En outre les alliages d'aluminium de fonderie sont en général mis en forme sous pression, dans des moules permanents, de sable (humide/sec) et de plâtre. Ces derniers sont également, facilement mis en forme sous vide, sous basse pression ainsi que sous l'effet d'une force centrifuge. L'alliage d'aluminium qui nous intéresse plus particulièrement pour cette contribution est le B206. [3, 4]

II.3. L'alliage d'aluminium B206 :

L'alliage B206, qui fait partie du système Al-Si-Cu-Mg, est un alliage fabriqué à partir de matériaux recyclés, on l'utilise surtout dans l'industrie de l'automobile et aérospatiale.

Le B206 est un alliage qui possède d'excellentes propriétés mécaniques, il a également une excellente traction à haute température et un bas cycle de résistance à la fatigue, en conséquent, ce matériel pourrait être utilisé dans un certain nombre d'applications pour réduire le poids du véhicule [4], en dépit de ses excellentes propriétés, le B206 est rarement utilisé en raison de sa propension à la fissuration à chaud, ce matériau a un certain nombre d'applications possibles, mais sa grande résistance et une ductilité excellente font de lui un matériau idéal pour les composants de suspension [4], le travail réalisé au titre AMD 305 (Automotive Materials Division) montre qu'on peut obtenir des propriétés mécaniques très élevées, les propriétés de traction de B206 en moule permanent ont été à peu près les mêmes (voir mieux) que celles trouvées avec de nombreux composants Al forgé et les bas du cycle de vie en fatigue de l'alliage B206 est dix fois supérieure à celle des pièces moulées en alliage A356 pour un niveau de stress équivalent [4].

Tableau.1 : Propriété mécaniques

Matériau	Procédé PM : Moule Permanent	Traitement	Limité d'élasticité (MPa)	Résistance à la rupture (MPa)	Allongement (%)
B206	PM	T4	250-260	430-450	18-22
	PM	T7	370-390	445-455	9

Résultats obtenus par :

Automotive Materials Partnership (AMD 305) [4, 6]

II.3.1. Propriétés de traction(B206) :

Une étude des propriétés de traction par rapport à la composition des alliages a été menée par des chercheurs d'Alcan l'international, ces résultats montrent que les meilleurs

résultats pour les T4 et T7 tempère sont obtenus avec les deux compositions d'alliages distincts.

Les deux compositions d'alliage et les propriétés attendues sont :

T4 Tempère	T7 Tempère
Composition chimique (en % poids)	Composition chimique (en % poids)
-Le cuivre (Cu) de 4,7 à 4,9%. -Le magnésium (Mg) 0,35% -Le manganèse (Mn) 0,2%	-Le cuivre (Cu) de 4,2 à 4,4% -Le magnésium (Mg) 0,15% - le fer (Fe) 0,10% -Le silicium(Si) 0, 10%

Tableau.2 : les propriétés attendues [4]

Matériau	Procédé PM : Moule permanent	Traitement	Limité d'élasticité (MPa)	Résistance à la rupture (MPa)	Allongement (%)
B206	PM	T4	250-260	430-450	18-22
	PM	T7	370-390	445-455	9

Tableau.3 : Propriété mécaniques obtenues[4]

Ces propriétés mécaniques obtenues en fonction de la composition du matériau coulé, permettent d'optimiser les propriétés des composants à bas coût possible, dans la même

lancée, Davis, J.R, a étudié les propriétés mécaniques et physiques de l’alliage A206 dans la composition suivante (%poids) :

Alliage A206 :

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Ti	Al
0.02	0.07	4.62	0.33	0.31	0.20	bal

Tableau.4 : Composition Chimique de l’alliage A206 [11]

Les résultats obtenus sont:

Propriétés	Moulage au sable		Coulée en PM	
	T4	T7	T4	T7
Résistance à la traction, MPa	354	400	430	436
Elasticité, MPa	250	330	265	347
Résistance au cisaillement, MPa	255	-	-	257
Résistance à la fatigue, MPa	-	160	-	207
Allongement,%	7	5	17	11.7
Dureté	100HB	110HB	118HV	137HV
Coefficient de Poisson	0.33			
Le module d'élasticité, GPa	70			
Résistance aux chocs. J	9.5			

Tableau.5 : Propriétés mécaniques [11]

Densité	2,80 g/cm ³
Liquidus	650°C
Solidus	570°C
Coefficient linière de dilatation thermique	19,3 um/mK
Chaleur spécifique	920 J/Kg.K
conductivités thermiques	121 W/m.K
Résistivité électrique	121 W/m.K

Tableau.6 : Propriétés physiques[11]

Une étude sur l'influence des éléments d'additions Fer et Silicium sur les propriétés mécaniques des alliages d'Aluminium- Cuivre de type B206 a été menée par HONORE KAMGUO KAMAGA dans le cadre de la préparation de sa thèse de Doctorat à l'Université de Québec à Chicoutimi pour différentes composition qui sont :

Code de l'alliage	% des éléments d'alliage					
	Cu (%)	Fe (%)	Si (%)	Mn (%)	Mg (%)	Ti (%)
B1213	4.68	0.12	0.13	0.24	0.29	0.02
B2312	4.70	0.23	0.12	0.24	0.30	0.01
B3511	4.54	0.35	0.11	0.25	0.30	0.01
B3223	4.74	0.32	0.23	0.24	0.29	0.03
B3134	4.73	0.31	0.34	0.24	0.32	0.04
B2121	4.72	0.21	0.21	0.24	0.29	0.02
B2332	4.95	0.23	0.32	0.27	0.35	0.01

Tableau7 : Composition de différents alliages étudiés[4]

Les résultats de traction des alliages à l'état coulés et après traitement thermique (16h) sont :

Code de l'alliage	Rp _{0.2} (MPa)	Rm (MPa)	A (%)	Module de Yong (GPa)
B206	166.34	244.02	3.91	72.03
B1213	195.00	263.10	2.72	72.70
B2312	192.30	252.00	2.02	74.10
B3511	185.60	238.10	1.69	74.66
B3223	184.00	227.30	1.34	73.58
B3134	182.10	239.90	1.97	72.48
B2121	188.00	273.60	1.62	76.26
B2332	175.30	224.10	2.03	71.55

Tableau 8. Résultats de teste de traction à l'état coulée[4]

Code de l'alliage	Rp _{0.2} (MPa)	Rm (MPa)	A (%)	Module de Yong (GPa)
B1213	291.30	440.80	11.58	71.04
B2312	284.00	418.80	08.15	71.24
B3511	267.70	372.80	05.14	72.10
B3223	278.10	377.60	04.61	70.93
B3134	280.10	424.10	09.67	69.94
B2121	282.20	428.30	09.60	73.86
B2332	277.00	406.00	06.86	72.37

Tableau.9 : Résultats de teste de traction à après 16 h de traitement thermique (T4) [4]

II.3.2. Effet des éléments alliés sur les propriétés mécaniques :

Les alliages d'aluminium ayant des propriétés réduites, peuvent être améliorés, en ajoutant des éléments qui modifient plus ou moins leurs microstructures, les atomes des éléments d'addition peuvent se substituer aux atomes d'aluminium dans le réseau, du fait de la différence de dimension des atomes en solution solide, relativement à celles d'aluminium, cette substitution perturbe le réseau qui devient difficilement déformable.

D'autres parts des précipités hors solution solide, cohérents, semi-cohérents, ou incohérents avec la matrice d'aluminium, peuvent provoquer la dislocation du réseau.

Cependant, le durcissement des alliages d'aluminium sera proportionnel au nombre de ces perturbations, puis, la nature, la teneur, la répartition de ces éléments d'addition dépendent de ce durcissement.

Les éléments d'addition ne sont pas nombreux, il s'agit du cuivre, silicium, magnésium, manganèse, et le titane, mais aussi les associations magnésium - silicium, zinc - magnésium et zinc - magnésium - cuivre.

Les éléments d'alliages sont ajoutés en petites quantités, rajout de 1 à 7 % (en teneur pondérale) pour les alliages de corroyage, jusqu'à 20% de silicium dans les alliages de moulage.

Les influences des différents éléments d'addition sont synthétisées dans le tableau suivant :

Elément	Influence
Silicium	<p>Améliore les caractéristiques de mise en forme.</p> <p>Augmente la fluidité, la résistance à la fissuration à chaud et les caractéristiques de l'écoulement du métal liquide.</p> <p>Diminue l'usinabilité, ainsi que le coefficient de dilatation linéique.</p> <p>Réduit la densité de l'alliage et le coefficient d'expansion thermique.</p> <p>Bonne tenue à corrosion pour les alliages sans cuivre.</p>
Cuivre	<p>Améliore les caractéristiques mécaniques.</p> <p>Diminue la résistance à la corrosion et la conductivité électrique.</p>

	<p>Diminue la facilite d'usinage, améliore la tenue au fluage.</p> <p>Rend le soudage très difficile, mise en forme possible sur état recuit ou su trempe fraîche et assure une bonne aptitude aux traitements de surface.</p> <p>Réduit la résistance à la fissuration à chaud et à la coulabilité.</p>
Fer	<p>Améliore la résistance à la fissuration à chaud.</p> <p>Réduction de la ductilité.</p>
Manganèse	<p>Modification des composés de fer de la forme β à α.</p> <p>influence favorable dans l'équilibre interne de la pièce après la mise en forme.</p> <p>Améliore les caractéristiques mécaniques.</p> <p>Facilite l'emboutissage.</p> <p>Bonne tenue à la corrosion.</p>
Magnésium	<p>Augmente la dureté des alliages dans les pièces moulées avec une diminution de la ductilité.</p> <p>Améliore la résistance à des hautes températures ainsi la résistance au fluage.</p> <p>Une forte augmentation de la teneur de Mg peut provoquer la fissuration à chaud et rendre les traitements plus difficiles.</p> <p>Très bonne tenue à la corrosion.</p> <p>Bonne aptitude aux traitements de surface.</p>
Nickel	<p>Réduit l'effet fragilisant de fer dans les alliages.</p> <p>Augmente la résistance à haute température.</p> <p>Augmente la fatigue et la résistance au fluage.</p>
	<p>Affine la structure des alliages d'aluminium de fonderie.</p> <p>Réduit la tendance à la fissuration à chaud des alliages.</p> <p>Assure un affinage de grain efficace, s'il est en excès dans la stœchiométrie d</p>

Titane	composé TiB ₂ .
Zinc	Améliore les caractéristiques mécaniques. réduit sensiblement la résistance au fluage à des hautes températures le zinc. Tenue à la corrosion médiocre.
Silicium + magnésium	Améliorent les caractéristiques mécaniques. Améliorent l'aptitude au filage. Très bonne tenue à la corrosion. Très bonne aptitude aux traitements de surface.

Tableau.9. récapitulatif de l'influence des éléments d'addition sur les alliages. [3, 4]

II.4. Propriétés mécaniques des alliages d'aluminium-cuivre :

Les propriétés mécaniques permettent de décrire le comportement d'un matériau soumis à des forces mécaniques. Les tests appliqués se sont généralement des essais de traction, de compression, de torsion, de flexion, de dureté, de micro-dureté et les essais de fatigue.

II.4.1. Test de traction :

Les éprouvettes de traction (figure 2) ont été testées à l'aide d'une presse MTS Alliance (modèle RT/100) comme la montre la figure 1. A une vitesse constante de 0.50 mm/min. (0.020 po/min.) en utilisant une capacité de 100 KN. Les données force-allongement des échantillons ont été recueillies par un système d'acquisition de données relié à la presse. La résistance à la rupture (UTS) et le module d'Young ont également été obtenues par le système d'acquisition de donnée de la machine MTS.



Figure.1. : presse MTS Alliance (modèle RT/100) avec un système d'acquisition de données. [4]



Figure.2. : Eprouvette de traction. [4]

Des courbes de contrainte-déformation ont été tracées et différentes caractéristiques mécaniques ont été déterminées (figure 3). En augmentant la teneur en Mg, on constate la croissance de la limite élastique et de la résistance à la traction, mais à l'apposé une diminution de l'allongement à la rupture. [4,6]

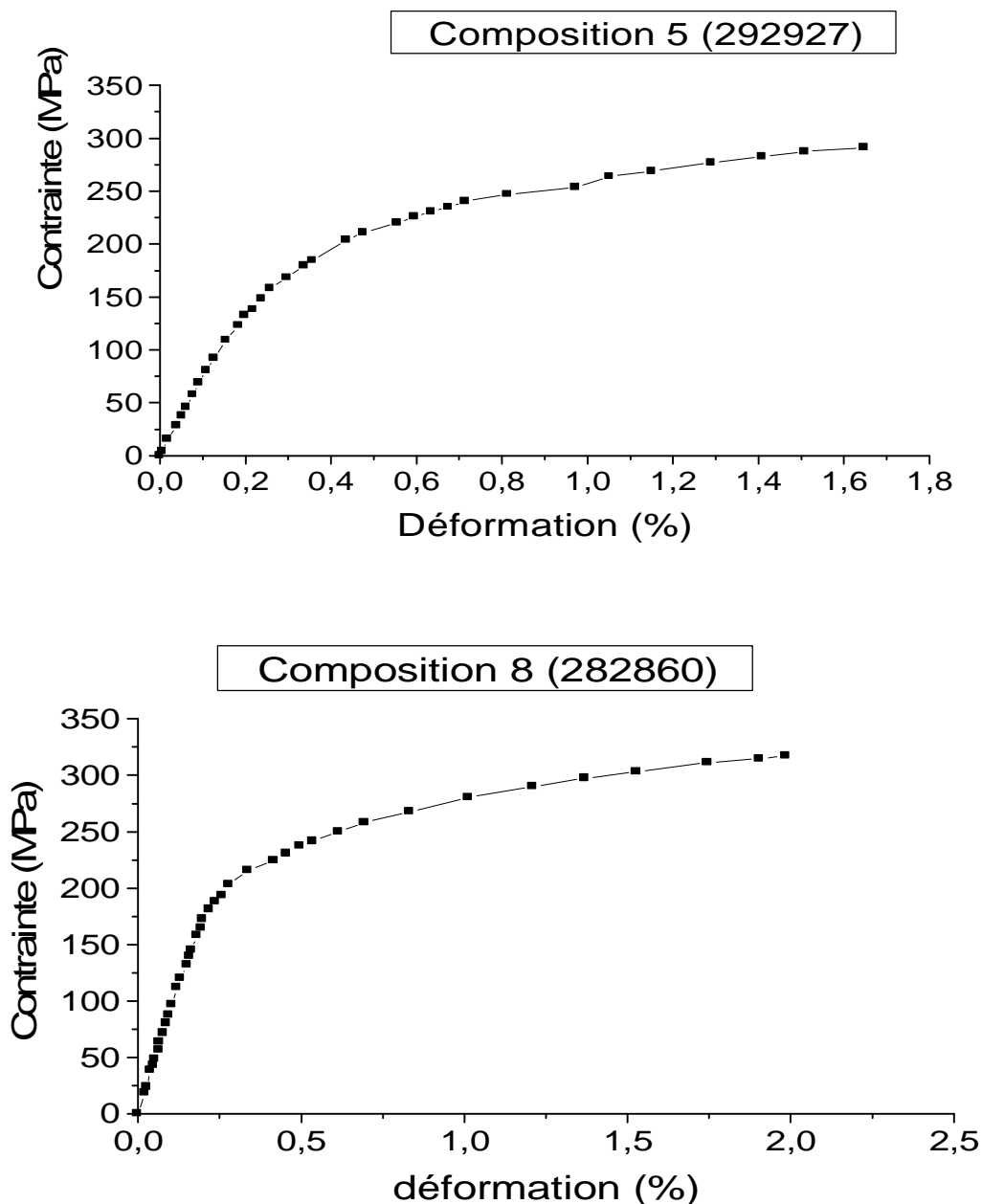


Figure.3. Courbes de contrainte-déformation pour deux compositions de Mg des alliages de types B206 tel que coulés : a - 0,3% et b - 0.6%. [4,6]

Dans certains alliages, il a été constaté une diminution de la valeur de la résistance à la traction (résistance ultime) et celle de l'allongement à la rupture pour des éprouvettes identiques (alliages de même nature et élaborés dans des mêmes conditions), cette diminution est associée à la présence aussi bien des pores que des inclusions dans différents alliages.

II.4.2. Essais de micro-dureté :

La mise au point des méthodes de mesure de la **micro-dureté** permet de résoudre de nombreux problèmes entre autre l'évaluation de la dureté des couches minces ou superficielles, l'exploration d'alliages à phases multiples, l'évaluation de l'érouissage local.

a) Principe :

Du point de vue scientifique, on peut séparer les essais de dureté des essais de micro-dureté par le fait que les premiers intéressent un nombre quelquefois très important de grains de métal, alors que les seconds sont destinés à définir les propriétés à l'intérieur des grains soit de la matrice, soit de ses divers constituants, alors que les essais de dureté procurent une valeur moyenne des propriétés d'une zone de métal assez importante, les essais de micro-dureté permettent de déterminer des caractéristiques locales. [4]

b) Dureté sous charge réduite ou micro-dureté Vickers:

L'essai de dureté sous charge réduite ou l'essai de micro-dureté Vickers utilise comme pénétrateur un diamant de forme pyramidale, ses domaines correspondent à des techniques expérimentales entièrement différentes, la pénétration des plus petites micro-empreintes est de l'ordre de $0,5 \mu\text{m}$, c'est-à-dire de l'ordre de grandeur des rugosités d'une pièce ayant subi une rectification, alors que les charges réduites provoquent des empreintes de 7 à $40 \mu\text{m}$, les mesures de micro-dureté, pour donner des résultats satisfaisants, doivent être faites en précisant tous les paramètres : charge appliquée, vitesse de mise en charge, préparation de l'échantillon (mode de polissage), structure micrographique ; elles nécessitent des précautions multiples, comme l'élimination des vibrations au cours des mesures, et des qualités particulières pour les appareils (forme du diamant, caractéristiques optiques, précision mécanique).

Dans ces conditions, la micro-dureté permet d'obtenir des résultats extrêmement intéressants en ce qui concerne en particulier :

- les petits échantillons (aiguilles, fils, rubans minces) ;
- les couches superficielles (couches cémentées, nitrurées, dépôts électrolytiques) ;
- les matières dures et fragiles (carbures, verres, émaux) susceptibles de se fissurer, sauf sous très faible charge ;
- les divers constituants des alliages ; on peut apprécier la variation de dureté dans les grains d'une solution solide non homogène, en fonction de la diffusion des éléments, ou de celle des différentes phases précipitées. [1,4,6]

De nombreux **micro-duromètres** ont été mis au point, comportant un dispositif assurant le maintien sans aucun déplacement de la pièce, un appareillage pour appliquer la charge à vitesse contrôlée, un microscope de puissance élevée.

III. Procédures Expérimentales

III.1. Préparation des alliages :

L'alliage de base a été un lingot B206 produit par Rio Tinto Alcan, dont la composition chimique est :

Cu	Si	Fe	Mn	Mg	Ti	Zn	Ni	Al
4.60	0.10	0.06	0.40	0.25	< 0.01	0.00	< 0.01	balance

Tableau.10. : Composition chimique de l'alliage B206 (% poids) [4,6]

Pour préparer les alliages, le métal a été fondu en charges de 52 kg dans des creusets en carbure de silicium pouvant contenir 55 kg. Dix alliages différents ont été réalisés. Les Composition ont été modifiés à l'aide d'aluminium commercial 1020 et les alliages mères commerciaux (Al 50% Si, Al-25% Fe, Al-25% Mn, Al-50% Mg et Al-50% Cu) avec le maintien du rapport Fe/Si égale à 1 et l'augmentation de la teneur en magnésium(de 0,1 a 2 avec des pas de 0,1), l'affinement des grains a été réalisé à l'aide de l'alliage Al-5Ti-1B, les analyses chimiques des différentes compositions préparées ont été effectuées à l'aide d'un spectromètre optique.

III.1.1. Affinage de grains :

L'affinage de grains dans la famille des alliages de fonderie d'aluminium-cuivre (AL-Cu) est réalisé par l'addition du titane Ti et du bore B au métal liquide, cette méthode est très importante, car elle nous permet d'intervenir dans le processus de solidification des alliages d'aluminium.

La qualité de l'alliage, la définition de la microstructure et des propriétés, dépendent de la taille des grains, celle-ci est d'une importance capitale étant donnée qu'elle détermine aussi la dimension des cellules dendritiques ainsi que la distribution du mélange eutectique.

En outre, plus la taille de grains est fine plus le phénomène de fissuration à chaud des alliages d'aluminium est réduit, car avec une structure granulaire fine on réduit le rétrécissement et la porosité d'hydrogène.

L'affinage de grain est pratiquée sur le métal liquide à l'aide des raffineurs de grain d'aluminium-titane-bore (AL-Ti-B) qui contiennent des germes actifs, il est pratiqué à objectif d'avoir un grand nombre de sites de cristallisation de la phase pro-eutectique (phase α -AL).

Cependant, le temps de contact entre le métal liquide et les sites de nucléation, représente une contrainte majeure, si le temps est trop court on n'obtient pas la taille fine de grain, en revanche si ce temps est trop long, l'efficacité du raffineur de grain sera abaissée.

Plusieurs facteurs interviennent dans la détermination de la taille de grain à savoir : la taille, la quantité et la morphologie des substrats nucléants, la nature de l'alliage mère, le temps de maintien avant la coulée, le taux de refroidissement, le type de moule utilisé et la température de surchauffe, ainsi que le rajout de silicium en faible quantité à l'aluminium, il réduit la taille des grains (travaux de H.Tahiri Université de Québec à Chicoutimi).

L'affinage de grain est un résultat de deux processus séparés dans la solidification des alliages d'aluminium: nucléation de nouveaux cristaux de l'aluminium liquide, suivie par une croissance avec une taille limitée, ces deux processus ont besoin d'une force motrice qui doit être assurée au système par l'intermédiaire d'une surfusion et d'une sursaturation par rapport aux conditions d'équilibre du système réel.

Ce phénomène est dû aux particules ayant un pouvoir de nucléation élevé (borates de titane). Cependant, la nucléation peut se produire seulement si l'alliage liquide est suffisamment refroidi. [4]

III.1.2. Composition chimique des différents échantillons étudiés:

Code	% Si	% Fe	% Cu	% Mg	% Mn	% Ti
487-5	0.2985935	0.3285376	4.76504	0.493805	0.229191	0.0616302
488-6	0.2964941	0.3320993	4.74549	0.586464	0.228323	0.0615790
489-7	0.3028407	0.3361363	4.84389	0.055501	0.222483	0.0611872
490-8	0.3186431	0.3509736	5.07551	0.023892	0.213701	0.0590486
483-5	0.3041435	0.3203366	4.75295	0.530290	0.226446	0.0655852
484-6	0.0323715	0.3352975	4.85925	0.603822	0.227195	0.0598492
485-7	0.3041957	0.33277	4.88383	1.084345	0.221159	0.0598691
486-8	0.3152302	0.3433229	5.04723	2.004137	0.214529	0.0585248
477-1	0.2884183	0.3207532	4.68501	0.147339	0.233063	0.0648548
478-2	0.2948440	0.3277435	4.79137	0.205763	0.232784	0.0624956
479-3	0.2909805	0.3216622	4.70692	0.317496	0.230357	0.0641322

480-4	0.2901547	0.31165039	4.68729	0.393610	0.230591	0.0629587
482-1	0.2938723	0.3343664	4.77774	0.116037	0.234897	0.0634100
483-1	0.2913817	0.3284644	4.72835	0.119619	0.233645	0.0647330
473-1	0.2928057	0.3242028	4.73926	0.131356	0.233267	0.0654882
474-2	0.2944165	0.3271627	4.76420	0.199389	0.231492	0.0641814
475-3	0.2883837	0.3189772	4.67467	0.300287	0.229979	0.0634876
476-4	0.2959552	0.3231815	4.77054	0.400594	0.229814	0.0626613
459	0.4201183	0.3753700	4.39556	0.1346649	0.391099	0.0980355
460	0.4148742	0.3720841	4.33885	0.135674	0.391050	0.0986071
469	0.2916071	0.3085390	4.16579	0.081617	0.234907	0.0624221
470	0.2885262	0.3044506	4.72021	0.088702	0.234311	0.0675418
495	0.2870552	0.3037773	4.65324	0.102877	0.236225	0.0666936
496	0.2848095	0.2991344	4.77260	0.070957	0.227780	0.1071499
497	0.2894356	0.3035357	4.76115	0.072692	0.225779	0.1206881

Tableau : Composition chimique des différents échantillons de l'alliage B206 (% en poids)

III.2. Traitements thermiques :

Les traitements thermiques ont été réalisés pour contrôler la microstructure des alliages et leurs propriétés. Le but visé de ces séries d'opérations de chauffage et de refroidissement est l'amélioration des propriétés mécaniques de l'alliage. Lorsque ces traitements sont appliqués aux alliages d'aluminium, leur utilisation est fréquemment restreinte à des opérations spécifiques visant à augmenter la résistance ainsi que la dureté.

Le type de traitement thermique qui augmente la résistance des alliages d'aluminium s'est fait en trois étapes :

- Mise en solution : dissolution des phases solubles.
- Trempe : super saturation des phases par un refroidissement rapide.
- Vieillessement : précipitation des atomes de soluté soit à la température de la pièce (vieillessement naturel) ou soit à température élevée (vieillessement artificiel).

III.2.1. Mise en solution :

L'objectif de ce traitement est d'amener dans la solution solide la quantité maximale de l'élément de durcissement soluble. La procédure consiste à maintenir l'alliage à une température suffisamment élevée et pour une période de temps assez longue dans le but d'obtenir une solution solide homogène.

III.2.2. Trempe :

Une fois la mise en solution terminée, le refroidissement des éprouvettes est effectué jusqu'à la température ambiante, selon l'une des quatre trempes ou taux de refroidissement différents. Les quatre taux de refroidissement c'est-à-dire la trempe à l'eau, à l'eau giclée chaude, à l'eau giclée froide et à l'air ambiant.

L'appareil utilisé pour effectuer les trempes à l'eau giclée chaude et froide est une boîte fermée avec deux fusils à peinture fonctionnant à l'air comprimé et alimentés avec de l'eau ; il est présenté à la figure ci-dessous. Les deux températures d'eau utilisées sont 12°C pour l'eau froide et 55°C pour l'eau chaude. Ces températures ont été mesurées à l'aide d'un thermomètre avant le début de chaque trempe. Les échantillons sont insérés par le dessus et tombent dans un panier rotatif qui retient les échantillons au milieu, entre les deux gicleurs.



Figure 4 : Gicleurs pour les trempes aux jets d'eau chaude et froide.

Le refroidissement à l'air ambiant consiste à simplement retirer les échantillons du four et à les laisser refroidir à l'air ambiant. Une fois la trempe terminée, les échantillons ont été entreposés dans un congélateur à une température de -18°C pour ralentir le vieillissement naturel, avant de procéder au vieillissement artificiel.

III.3. Le Vieillissement :

Le terme vieillissement désigne l'évolution des propriétés d'un matériau au cours du temps par interaction en volume avec un facteur physique de son environnement. Le vieillissement a pour principal but de modifier les propriétés mécaniques de l'alliage après la trempe.

a-Vieillissement thermique : c'est l'évolution des propriétés mécaniques d'un métal écroui soumis à une température supérieure ou égale à environ $1/2$ de sa Température de fusion par restauration ou recristallisation.

b-Vieillissement naturel : le vieillissement naturel est attribué aux alliages traités thermiquement dont les propriétés changent une fois revenus à la température ambiante. Le taux de vieillissement change selon le type d'alliage et également dans un type d'alliage, de sorte que le vieillissement naturel est stable pouvant durer de quelques jours jusqu'à plusieurs années.

c-**Vieillessement artificiel** : dans l'objectif d'accélérer la précipitation et d'améliorer la dureté, on chauffe le matériau traité à une température supérieure à la température ambiante et on le maintient selon la nature du matériau et nos attentes. Pendant le vieillissement artificiel à une température donnée, la dureté augmente jusqu'à atteindre une valeur maximale après un temps de maintien donné.

Pour notre cas, Les vieillissements ont été réalisés dans le même four à convection que pour la mise en solution. La solution saturée obtenue après la trempe n'étant pas en équilibre, elle a toujours tendance à retourner vers cet état, très lentement à température ambiante et beaucoup plus rapidement à température élevée. Au cours du vieillissement, dans un premier temps, propriétés mécaniques augmentent, atteignent un maximum, puis ensuite diminuent. Cela est dû à l'évolution de la taille des précipités et à leur nature.

Une série de traitements thermiques à été réalisée :

III.3.1. Vieillessement naturel T4 :

- Monté de la température jusqu'à 480°C en 2 heures ;
- La monté continue de 480°C jusqu'à 503°C en ½ heure ;
- Un maintien à 503°C pendant 2 heures ;
- Une remonté de température de 503°C jusqu'à 527°C en ½ heure ;
- Un maintien à 527°C pendant 8 heures ;
- Trempe dans l'eau à 66°C
- Attendre 21 jours avant les testes mécaniques.

Les traitements de mise en solution et de vieillissement sont réalisés à l'aide d'un four électrique équipé d'un contrôleur de température programmable (± 2), de la compagnie Pyradia, que l'on peut voir à la figure IV.5. Le délai de vieillissement est moins de 5 minutes et le temps de la trompe été toujours moins de 5 seconde.

Code de l'alliage	Traitement de mise en solution (TMS) et Trempe	T4 (21 jours)
Tous les alliages	1-TMS (503°C pendant 2 heures) 2- TMS (527°C pendant 4h, 8h et 16h) 3-Trempe dans l'eau (66°C)	oui

Tableau : Résumé des procédures de traitement thermique utilisé [4,6]



Figure 5 : Four à convection Pyradia

Métallographie :

L'analyse métallographique des éprouvettes de traction a été réalisée sur les meilleurs échantillons obtenus lors des essais de traction. L'éprouvette de traction a été coupée à 1 et 1.5 cm à partir de la zone de rupture (voir figure). Cet échantillon a été utilisé pour l'étude de la microstructure, effectuée à l'aide d'un microscope optique.

Les échantillons prélevés sont ensuite enrobés dans un plastique à une température de 180° et sous une force de 30 KN. La durée de chauffage est de 7 minutes et celle du refroidissement est de 5 minutes. Pour finir, les échantillons sont polis graduellement à l'aide d'une polisseuse automatique avec un disque abrasif de plus en plus fin puis par des abrasifs en suspension dans un liquide.

III.4. Analyses thermiques :

L'analyse thermique consiste à enregistrer l'évolution de la température d'un alliage en fonction du temps durant la solidification. Pendant le refroidissement, la chaleur est dégagée et la température monte jusqu'à une valeur voisine de la valeur d'équilibre.

L'analyse thermique peut être simple, différentielle, statique ou dynamique, selon respectivement que la mesure physique avec le comportement d'un échantillon de référence est effectuée directement, par comparaison, en régime isotherme ou bien pendant l'échauffement ou le refroidissement progressif de l'échantillon. Les différentes méthodes sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Nom de la méthode	Grandeur mesurée en fonction de la température
Analyse thermo-différentielle (DTA)	Caractéristiques thermiques : température
Calorimétrie différentielle à balayage (DSC)	Caractéristiques thermiques : enthalpie
Analyse thermogravimétrique (ATG)	Masse
Analyse thermomécanique (ATM)	Caractéristiques mécaniques
Analyse mécanique dynamique (AMD)	Caractéristiques mécaniques : raideur mécanique, facteur d'amortissement...
Analyse diélectrique ou Analyse thermique diélectrique	Caractéristiques électriques : permittivité diélectrique

Le tableau suivant donne quelques propriétés mesurées selon la méthode utilisée :

Type de transformation	Propriété mesurée	DTA	DSC	TGA	TMA	DIL	DM(T)A
Transformation physique	Transition vitreuse	X	X			X	X
	Cristallisation	X	X				
	Fusion	X	X		X		
	Évaporation	X	X	X			
	Coefficient de dilatation					X	X

	Réaction chimique	X		
Transformation chimique	Décomposition chimique	X	X	X

Les résultats des analyses thermiques sont généralement représentés en fonction de la température, mais peuvent aussi être présentés en fonction du temps (cas d'un test en isotherme) ou de la fréquence (cas de la DMA).

Les transformations subies par la matière pendant son traitement thermique peuvent être réversibles (fusion...) ou irréversibles (décomposition...).

Ces transformations peuvent être, entre autres :

- Une absorption de chaleur (réaction endothermique) ou un dégagement de chaleur (réaction exothermique).
- Une augmentation de masse (oxydation...) ou une diminution de masse (décomposition...);
- Une augmentation de volume (dilatation) ou une diminution de volume (contraction).

III.5. MICROSCOPIE ELECTRONIQUE A BALAYAGE (MEB) :

La microscopie électronique à balayage (MEB) est une technique d'analyses, qui peut nous fournir rapidement des informations sur la morphologie, la taille des cristaux et la composition chimique d'un objet solide. Son utilisation est courante en physique chimie des matériaux, en biologie, en chimie, en médecine, en géologie, en métallurgie ainsi qu'en mécanique.

III.5.1. Principe de la méthode :

Cette technique de caractérisation repose sur l'analyse des électrons secondaires et des électrons rétrodiffusés issus du bombardement de l'échantillon à l'aide d'un canon à électron soumis à une tension accélératrice de 10 à 20 kV. L'origine de ces électrons est la couche superficielle de l'échantillon à étudier (environ quelques dizaines d'Angström). Le phénomène de visualisation traditionnellement observé à l'écran s'explique par l'accroissement du nombre d'électrons secondaires lorsque l'angle d'incidence des électrons sur la surface de l'échantillon diminue. En d'autres termes, le nombre d'électrons réfléchis augmente sur les reliefs en arêtes et en pointes. La détection des électrons secondaires s'effectue grâce à un détecteur dont on doit le principe à Everhart et Thornley (1960). Ce détecteur utilise un des meilleurs systèmes d'amplification de courant : le photomultiplicateur.

Par contre Le détecteur d'électrons rétrodiffusés est constitué de diodes silicium. Il comporte deux secteurs sensibles de même surface ($A=B$) et pour l'analyse EDS le détecteur de rayons X est un détecteur en énergie. Il s'agit d'une diode silicium dopé au lithium. La formation d'image est obtenue séquentiellement point par point en déplaçant le faisceau d'électrons primaires sur la surface de l'échantillon.

Les analyses par MEB de nos échantillons ont été réalisées avec un microscope environnemental de marque **Philips**. Le vide nécessaire dans l'environnement de la cathode est de 10^{-3} Pa. Les poudres à analyser sont maintenues sur le porte échantillon en laiton à l'aide d'un scotch de carbone.

Six échantillons ont été bombardés quatre fois pour chacun, avec différentes couches superficielles d'échantillons comme origines d'électrons, mais les résultats ont été exploitables uniquement pour deux bombardements de chaque échantillon à savoir (les 50μ et 100μ de surface), tout de même les autres résultats sont joints en annexes et notre conclusion à leurs égards est que nos échantillons n'ont pas été suffisamment polis.

IV. Partie expérimentale :

IV.1. L'Analyse thermique :

Le dispositif qui a permis d'effectuer nos analyse thermique est représenté par le schéma suivant figure 6:

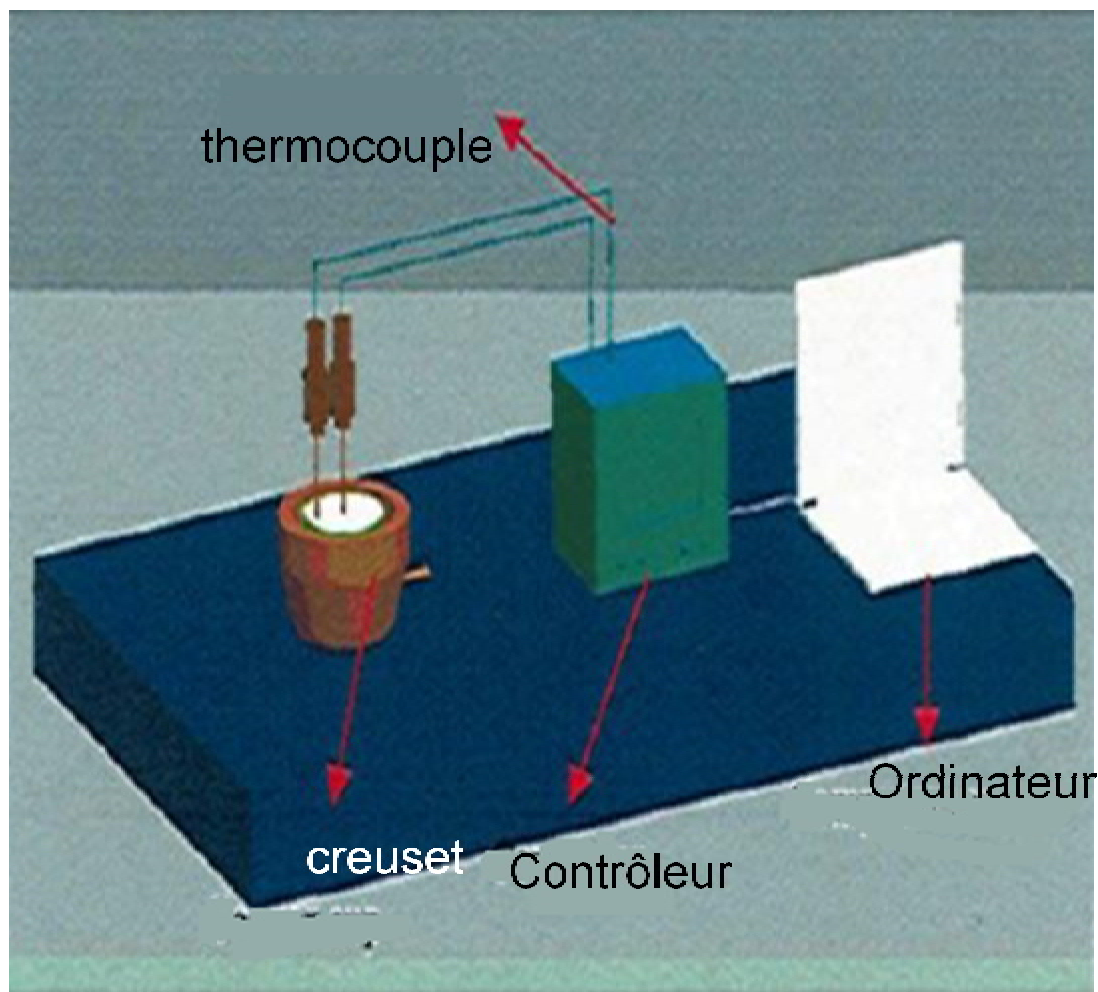


Fig :6 schéma du dispositif de l'analyse thermique [4]

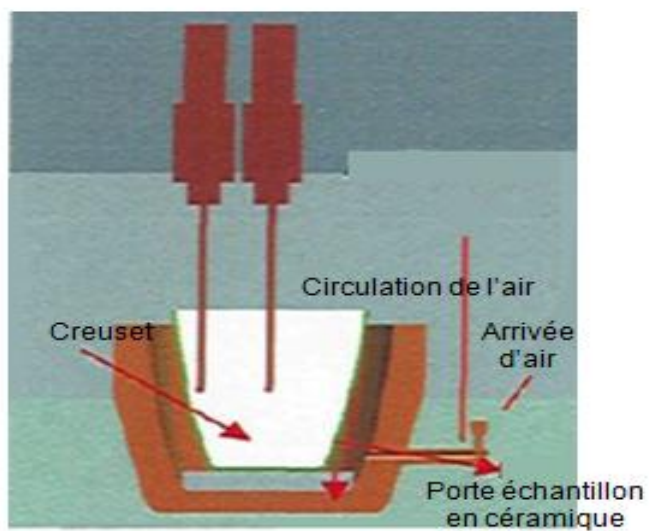


Fig.7 : Schéma du creuset utilisé et la disposition des thermocouples

Résultat de l'analyse thermique :

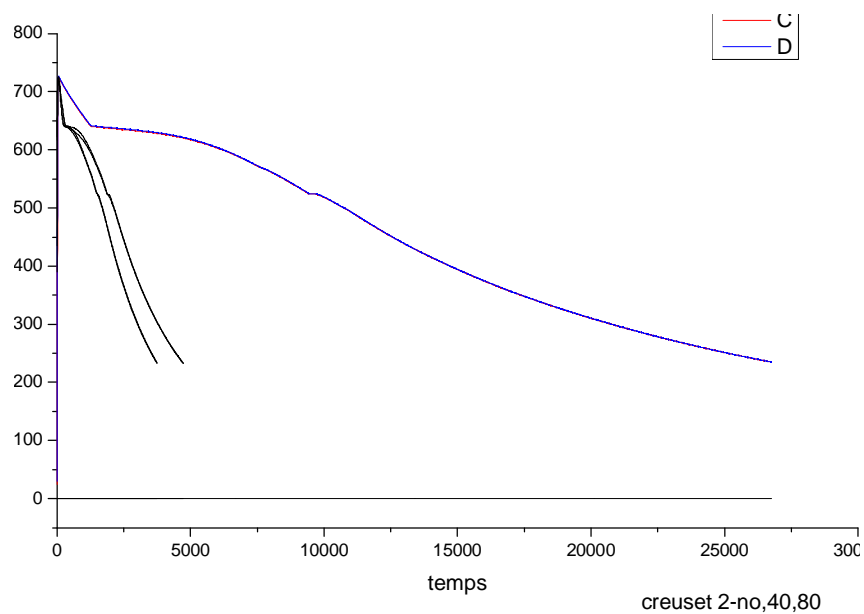


Fig 8 : Analyse thermique du B206 avec 0.2 % de Mg

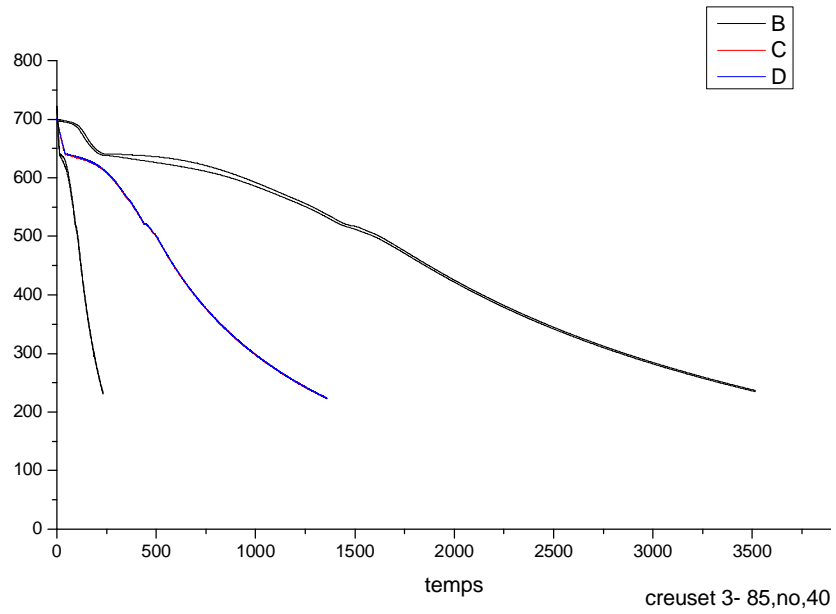
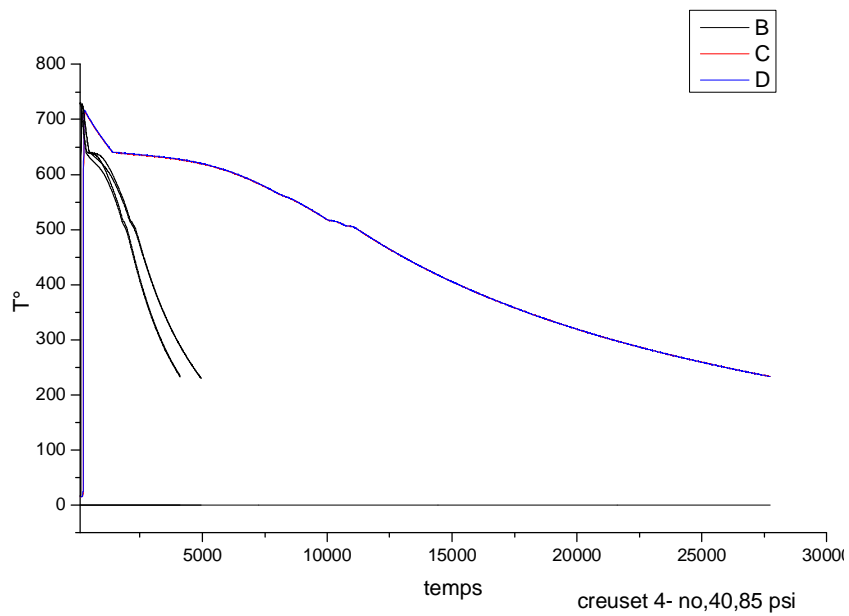


Fig 9 : Analyse thermique du B206 avec 0.3 % de Mg



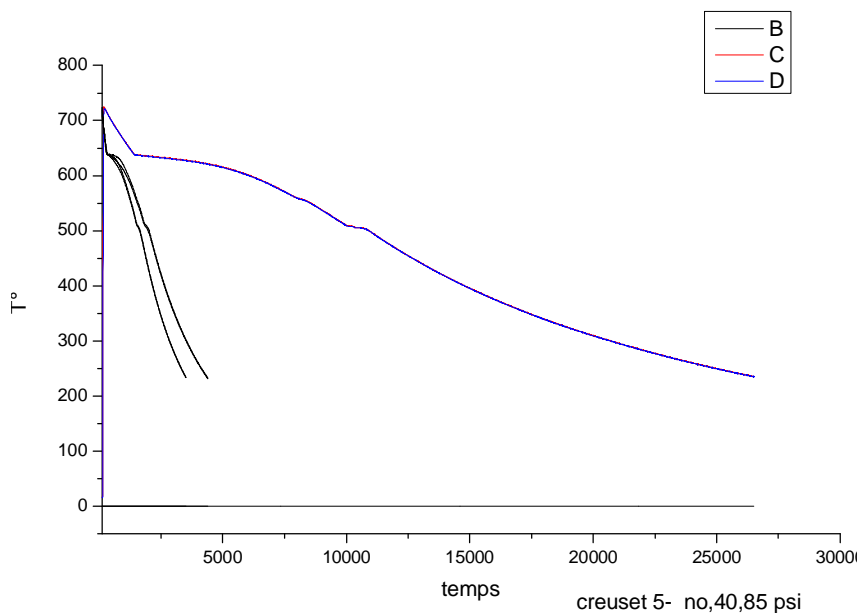


Fig 10 : Analyse thermique du B206 avec 0.4 % de Mg

IV.2. Le Polissage des alliages :

Mode opératoire: Nos échantillons, ont une surfaces limitées au préalable après un enrobage à froid réalisé au CURAI, université de Québec à Chicoutimi. Le polissage plan des échantillons, nous l'avons réalisé par ordre décroissant de rugosité du papier abrasif, allant de 220 à 500 mm, ce plan est choisi pour éviter toute déformation mécanique excessive, la force utilisée est d'ordre de 30 à 120N, afin de réduire la friction entre le papier et la surface de l'échantillon, nous avons poursuivi le polissage jusqu'à ce que toutes les rayures aient été éliminées, pour identifier les constituants solubles dans l'eau, nous avons utilisés un lubrifiants exempt d'eau, six étapes ont été nécessaires pour avoir le résultat attendu , la vérification à été effectuée à l'œil nu pour chaque étape, puis à l'aide d'un microscope optique comme ultime vérification.

Première étape :

- Nous avons placé le papier abrasif (220 à défaut de 240) sur le disque de la polisseuse.
- Nous avons actionné le robinet pour permettre l'écoulement d'eau.
- Puis nous avons disposé l'échantillon sur le papier abrasif.
- Nous avons mis en marche le disque de la polisseuse, avec une vitesse de 90 à 120 tours-minute, pendant 3minutes.

Nous avons conclu à l'œil nu qu'il faut continuer notre polissage, car notre échantillon présente encore des rayures.

Cette étape est résumée dans le tableau suivant :

Papier	220
Tours-minutes disque	90-120
Temps	30mn-30s
Forces	30N
Eau	ON

Deuxième étape :

Nous avons répété la même procédure, sauf que pour cette étape, la solution diamantée et le lubrifiant bleu ont été ajoutés avant de faire tourner le disque avec le nouveau papier plus fin (320mm), en suite à chaque fois que s'a sèche on a rajouté le lubrifiant bleu.

Troisième étape:

Nous avons refait l'étape précédente avec le changement du papier abrasif encore plus fin (500mm), puis avant l'écoulement d'eau on a versé quelques gouttes du lubrifiant bleu sur le papier abrasif et à chaque fois que s'a sèche on y rajoute le lubrifiant bleu.

Quatrième étape :

Le papier qu'on utilisé est de 6 μ , une fois que le papier est posé sur le disque, nous avons déposé la pate diamantée (6 μ) en petites quantité sur le papier, puis nous avons pulvérisé avec de la méthadine fluide sans omettre que nous avons coupé l'eau, versé quelques gouttes du lubrifiant bleu et la force appliquée été de 120 N.

Cinquième étape :

Pour cette expérience, nous avons refait toutes les étapes de la quatrième, à l'exception de la pate diamantée qui été de 1μ et on a pulvérisé avec de la méthadine, ainsi que nous avons utilisé le lubrifiant rose à la place du bleu. Puis nous avons vérifiés à l'aide d'un microscope optique que nos échantillons sont suffisamment polis, donc prêt pour l'étape de finition.

Sixième et dernière étape :

Cette étape de finition est réalisée avec la pate diamantée de 0.05μ , elle est caractérisée par le fait que nous avons déposé un master pur sur le disque puis chaque trente secondes on a ajouté du lubrifiant avec de l'eau, en parallèle avec le rajout du master.

Après avoir terminé cet essai nous avons déduit que nos échantillons sont suffisamment polis, donc prêt pour d'autres tests tel que ceux de la microscopie électronique à balayage et de la micro-dureté.

Le microscope optique utilisé est représenté sur la figure 8 suivante :

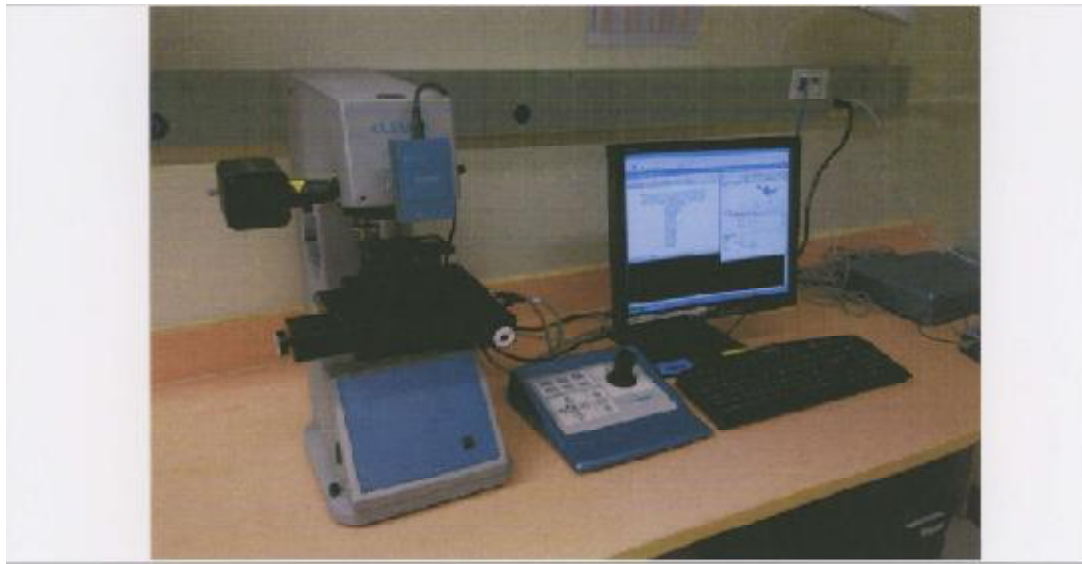


Figure 8 : Microscope optique équipé de logiciel clemex.

IV.3. L'analyse MEB :

Les résultats exploitables obtenus de l'analyse par MEB sont :

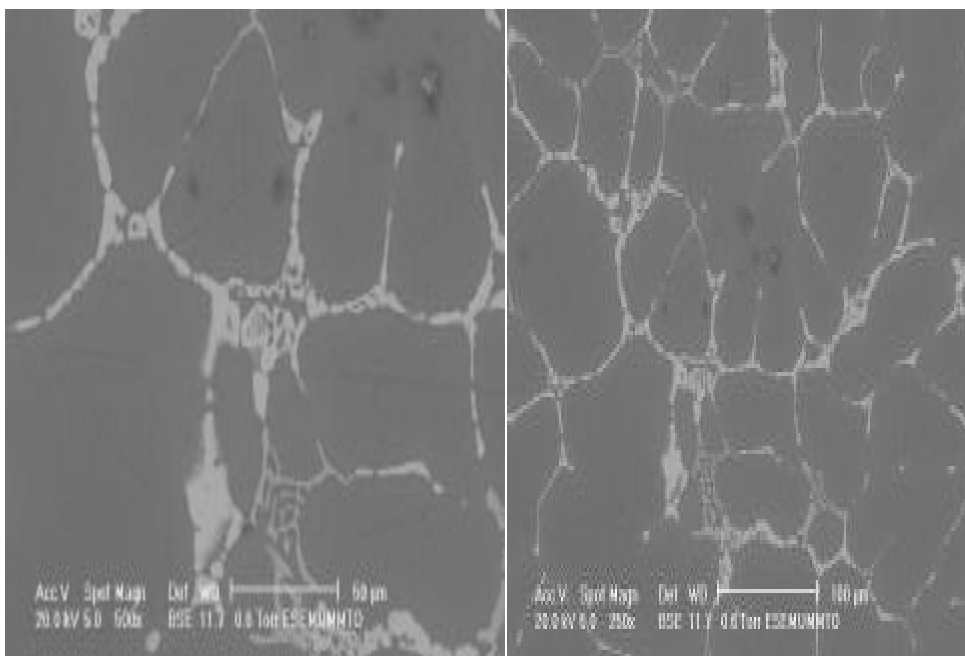


Fig 9 : ECHANTILLON 1B (0,3 % Mg, Sans affinage de grain)

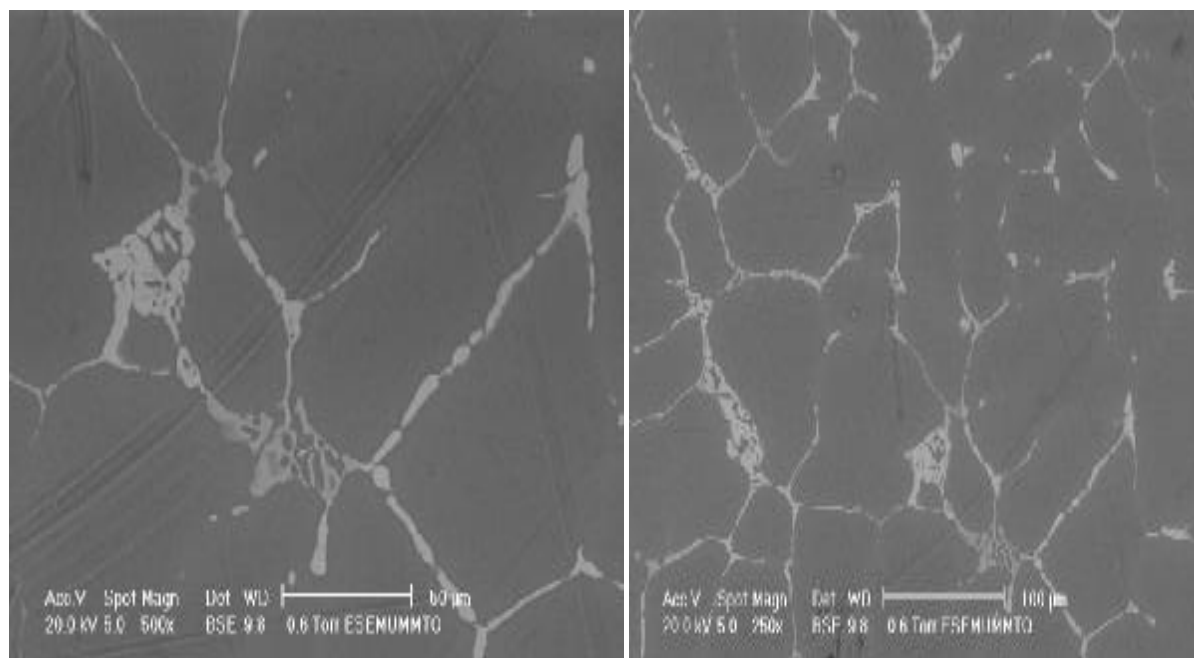


Fig 10: ECHANTILLON 1C (0,3 % Mg, Sans affinage de grain)

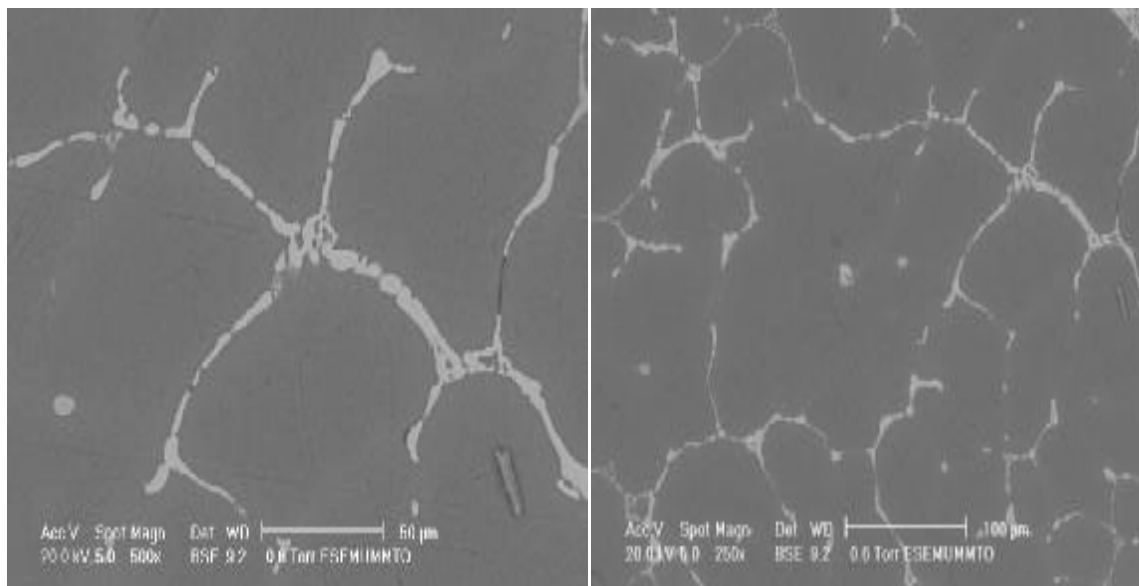


Fig 11 : ECHANTILLON 2B (0,3 % Mg, avec affinage de grain)

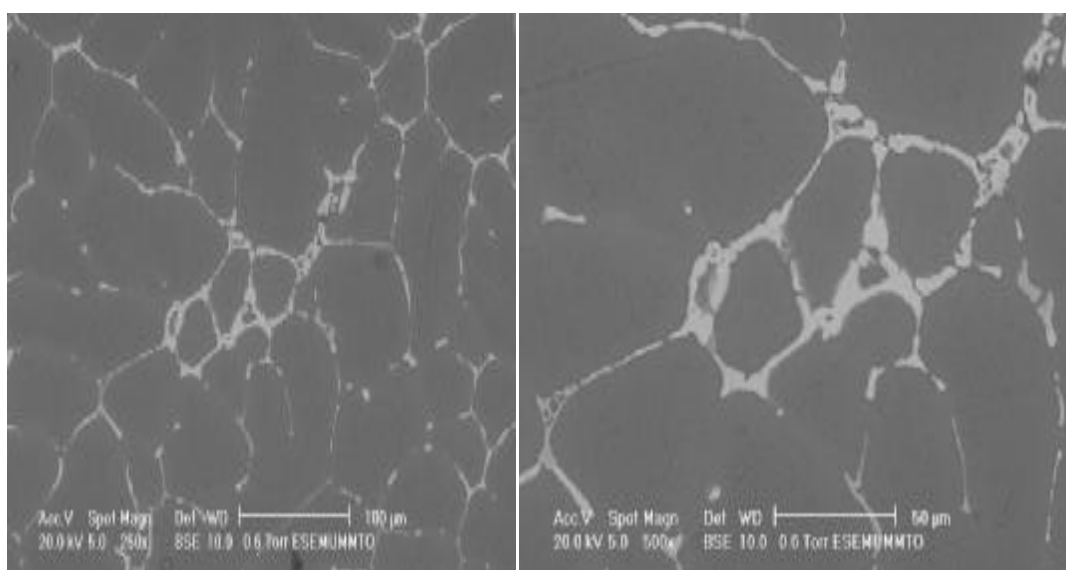


Fig 12 : ECHANTILLON 2C (0,3 % Mg, avec affinage de grain)

IV. 4. Essais de micro-dureté :

Après avoir achevé le polissage de nos échantillons nous avons entamés les essais de micro-dureté pour la caractérisation métallographique. Les tests ont été effectués avec un Microdurumètre Digital MICROHARDNESS Tester HVS-1000un, nous avons procédé avec la méthode de dureté Vickers pour réaliser cette analyse, Les mesures de la force et de la profondeur de l'empreinte permettent la détermination de la dureté et les propriétés des matériaux. Une représentation schématique de la sonde et son indentation Vickers (Figure 13

ci-dessous) représente le pénétrateur sur la gauche, illustrant les angles de la pyramide de la sonde. La profondeur «h» est illustrée sur la droite de l'empreinte et la partie inférieure représente la longueur de la diagonale indentation "D". La dureté Vickers est calculée en utilisant la formule suivante:

$$HV = 1,8454 P/D^2$$

Où: P est la charge d'essai (gf), et D est la durée moyenne diagonale (mm).

La diagonales peut être mesurée automatiquement ou semi-automatique. La force de charge utilisée était 500gf avec un temps de séjour de 15 secondes et le grossissement optique 100 X.



Figure.13 : Testeur Digitale de la micro-dureté

Les résultats obtenus lors des tests de micro-dureté réalisés sur différentes compositions d'alliage B206 modifiés à l'état brute de coulée sont illustrés dans les tableaux

Echantillon 1B

Teste	Diagonale D(u)	Dureté HV
T1	56.5	58
T2	49.9	74
T3	42.5	103
T4	50.3	73
T5	62.5	47
T6	68.5	40
T8	54.7	62
Moyenne	54.98	65.28

Echantillon 2B

Teste	Diagonale D(u)	Dureté HV
T1	54.9	62
T2	53.8	64
T3	65.8	43
T4	48.8	78
T5	50.9	72
T6	46.8	85
T8	55.9	59
Moyenne	53.84	66.14

Echantillon 1C

Teste	Diagonale D(u)	Dureté HV
T1	42.9	101
T2	49.5	76
T3	69.0	39
T4	62.1	48
T5	44.3	94
T6	48.1	80
Moyenne	52.65	73

Echantillon 2C

Teste	Diagonale D(u)	Dureté HV
T1	47.7	82
T2	47.1	84
T3	49.8	75
T4	50.9	72
T5	49.1	77
T6	50.5	73
Moyenne	49.18	77.16

IV.5. Analyse calorimétrique différentielle (DSC) :

L'analyse calorimétrique différentielle est réalisée pour obtenir des courbes de chauffage du matériau, allant de la température ambiante jusqu'à la température de fusion, c'est une technique d'optimisation de la différence du flux thermique, en fonction de la température ou du temps, entre l'échantillon et la référence, pendant un cycle thermique.

Elle présente une sensibilité très forte permettant la détection de très faible flux de chaleur. Cependant la DSC permet de suivre l'évolution structurale des matériaux dans des conditions prédéfinie et sous atmosphère contrôlée, avec plus de précision que l'analyse thermique.

En général les courbes obtenues présentent des pics exothermiques et endothermiques, respectivement au-dessus et au-dessous de la ligne de base associée à la recristallisation (dégagement de chaleur), et à la dissolution (absorbation de chaleur).

Des courbes de refroidissement ont été analysées pour déterminer les températures de précipitation, les périodes de croissance, les gammes et le temps de solidification, et les points de concordance de dendrite.

La calorimétrie à balayage différentiel (DSC) a été effectuée au taux de chauffage de 15°C/min sur a Calorimètre de compensateur de puissance de DSC 8000- PERKIN ELMER
Représenter par la figure 14 suivante :



Fig.14 : La DSC 8000

Les fours sont fabriqués par un alliage de platine, la vitesse de chauffage utilisée est de 15 °C/min. Et cela de 25 à 580 °C.

Le traitement des données est fait à l'aide d'un logiciel de calcul (PYRIS manager), Ainsi, on peut obtenir les enthalpies de fusion des composés purs et les températures de fusion de chaque mélange.

La DSC 8000 utilise la première méthode (compensation de puissance), qui consiste à mesurer en fonction du temps ou de la température, l'énergie nécessaire pour maintenir à zéro la différence de température entre l'échantillon et un corps de référence ($\Delta T = 0$).

L'apport d'énergie étant équivalent à l'énergie absorbée dans la transition par l'échantillon, la mesure de cette énergie de compensation est en réalité une mesure calorimétrique directe de l'enthalpie de transition.

Le calorimètre différentiel utilisé est composé de deux boucles de contrôle. L'une sert au contrôle de température moyenne de la référence et celle de l'échantillon à analyser, la seconde permet d'ajuster la puissance d'entrée lorsqu'une différence de température se produit entre l'échantillon et la référence (à cause d'une réaction exothermique ou endothermique dans l'échantillon).

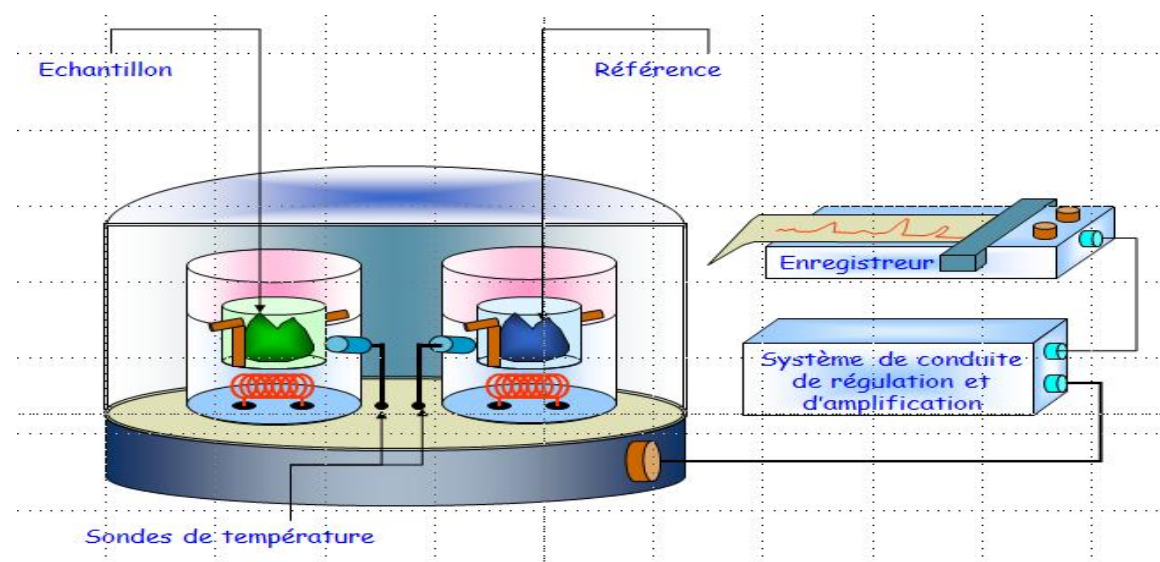
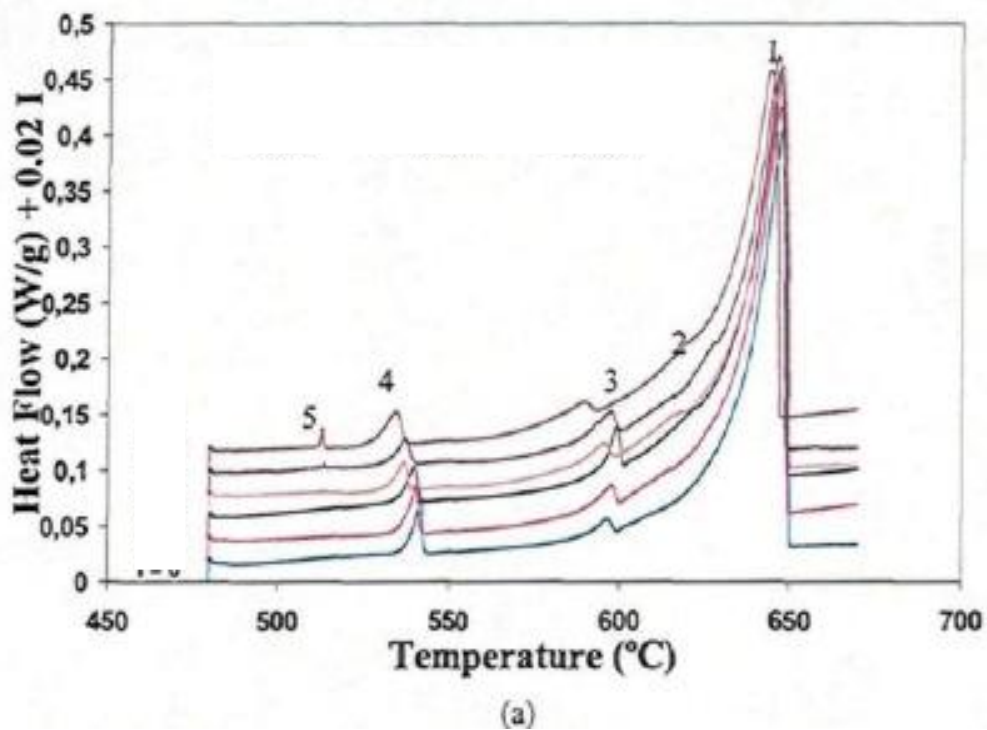


Fig.15. : Schéma des deux four de la DSC 8000

Les résultats obtenus par la DSC sont comme suit:



Fig; 16. Résultats de la DSC pour le B206 avec 0.2 % de Mg

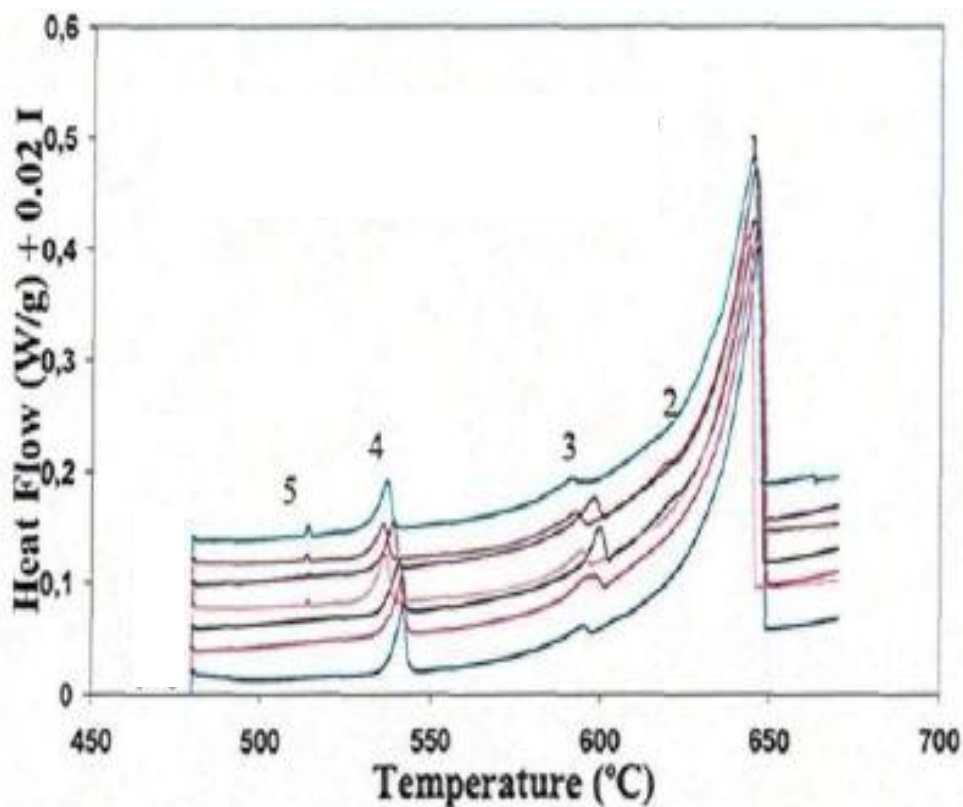


Fig 17. Résultats de la DSC pour le B206 avec 0.3 % de Mg

V. Interprétation des résultats obtenus

- A partir des graphes de la DSC, nous constatons que nous avons obtenus 5 pics ce qui correspondrait à l'existence de 5 phases minimum dans les alliages élaborés.
- A partir des courbes de l'analyse thermique à priori il n'y ont que 3 points de flexion correspondants à 3 phases d'où l'utilité de l'utilisation de la DSC pour nos échantillons.
- **Observation microscopique**
- L'analyse des résultats obtenus montre la présence de plusieurs phases intermétalliques avec des structures cristallines différentes de celle la matrice mère.
- La structure de la phase Al_7Cu_2Fe , également désignée comme β -fer, est tétragonale ; ses paramètres de maille sont comme suit : $a = 0.6336\text{nm}$ et $c = 1.4879\text{ nm}$.La présence des particules de cette phase est très nuisible aux propriétés mécaniques en raison de leur forme microstructurale sous forme d'aiguilles. Ces particules engendrent des microfissures dans la matrice mère. Lors de la solidification, celles-ci se développent avec la contraction thermique du métal solide et provoquent la fissuration à chaud du métal.
- La présence de la phase α - $Al_{15}(\text{Fe}, \text{Mn})_3\text{Si}_2$, appelée α -fer , a un effet positif sur les propriétés mécaniques grâce à la forme script que possède ses particules. Cette phase procure au matériau d'excellentes propriétés mécaniques en augmentant sa limite élastique, sa résistance à la traction, son allongement à la rupture et sa dureté.
- Il a été constaté que les faibles taux de refroidissement lors de la solidification favorisent la précipitation des particules β -fer en aiguilles, alors que des taux plus élevés ont tendance à favoriser la formation de particules α -fer . Les résultats expérimentaux montrent que la transition entre les phases β et α se déroule à un rythme plus lent en présence des faibles quantités de fer .
- La phase Al_2Cu , également désigné θ , a une structure tétragonale de paramètres de maille $a = 0.6063\text{ nm}$ et $c = 0.4872\text{nm}$. Sa densité dans les alliages binaires est 4.34 g/cm^3 . La présence de cette phase dans la structure du matériau procure aussi des bonnes propriétés mécaniques et notamment celles de traction.
- La phase Mg_2Si , a une structure cubique de paramètre de maille $a = 0,6350 - 0.6400\text{ nm}$. Sa densité est 1.88g/cm^3 .

- Il a été remarqué que l'augmentation de la teneur en Mg procure au silicium la tendance tout d'abord à se combiner en priorité avec le magnésium comme Mg_2Si , puis il peut se combiner avec le fer ou le manganèse. La phase Mg_2Si améliore les caractéristiques de la résistance à la déformation des alliages étudiés, mais malheureusement fait diminuer considérablement leur ductilité.
- La présence des défauts sous forme de pores ou d'inclusions réduit les propriétés mécaniques et influe négativement sur l'allongement à la rupture et procure aux matériaux une faible ductilité.

Conclusion

A travers cette étude on peut conclure que:

- Lors de la solidification des alliages de type B206, il y a précipitation de plusieurs phases intermétalliques (au moins 4). Dans l'alliage avec une teneur de l'ordre de 0.3% en Mg est favorisée plutôt la formation des particules des phases α -FeMn et Al_2Cu au détriment de celles de la phase Mg_2Si . Il en résulte alors une nette amélioration à la dureté .
- L'élévation de la teneur en Mg conduit à l'augmentation de la fraction volumique des précipités de la phase Mg_2Si . Ceci fait augmenter considérablement la dureté, la limite élastique et la résistance à la traction des alliages considérés, cependant cette élévation mène à une détérioration de leur ductilité exprimée par une décroissance de leur allongement à la rupture.

Perspectives

Dans un avenir proche, nous suggérons deux études :

- Au vieillissement des alliages considérés dans cette présente étude.
- À la variation du Mg dans le domaine de faibles teneurs.

Références bibliographiques

- 1-William D.Calister, Jr, sciences des matériaux, cinquième édition, DUNOD. 2001
- 2- C. Chaussin- G.Hilly, métallurgie, deuxième édition, DUNOD. 2004
- 3- Christian Varget, Corrosion de l'aluminium, DUNOD. 2002
- 4- Honoré Kamguo Kamga, m.sc, influence of alloying elements iron and silicon, on mechanical properties of aluminum-copper, type b206 alloys, , these, UQAC. 2010
- 5- Denis Beaulieu, les caractéristiques de l'aluminium structural, 2002, presse de l'université Lavat.
- 6-M.Dellah, h. kamguo kamga , m. bournane, y. sadaoui, m. bouazara solidification des alliages aluminium-cuivre de types b206 ,avec addition du magnesium, communication, UQAC, 2010
- 7- Li, K-D., Chang, E., "Explanation of the Porosity Distribution in A206 Aluminum Alloy Castings", AFS Transactions, 2003, Vol. 111, pp 267-273.
- 8-Kaufman, J.G., Rooy, Elwin.L., AFS., "Aluminum Alloy Castings", ASM International, Ohio, 2004.
- 9-Sigworth, G.K., Frank, D., Recent Development in the High Strength Aluminum-Copper Casting Alloy A206, AFS Transactions, Vol.111, 2003, pp 341-354.
- 10-Wannasin,J., Schwam, D., Yurko, J.A., Rohloff, C., Woycik, G., Hot Tearing Susceptibility and Fluidity of Semi-Solid Gravity Cast Al-Cu Alloy, Solid State Phenomena, Swizerland, Vols.116-117, 2006, pp 76-79.
- 11-Davis, J.R., "Aluminum and Aluminum Alloys", ASM, Materials Park, Ohio, 1993.
- 12-Chen, X.G., Engler, S., "Hydrogen and Porosity in Al-Si and Al-Mg Alloys, Part 1. Al-Si Alloys", Metall, 1991, Vol. 45, No. 10, pp.995-1000.
- 13-Major, J. F., Sigworth,G.K., Chemistry / Property Relationships in AA 206 Alloys, AFS Transactions, Vol.114, 2006, pp 117-128.