

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

École Nationale Polytechnique



DÉPARTEMENT DE MÉTALLURGIE

PROJET DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Métallurgie

Thème :

Caractérisation microstructurale d'un alliage pour piston de
véhicule.

Proposé et encadré par :

Pr. Mabrouk BOUABDALLAH

Réalisé par :

Billel RESSAF

Promotion juin 2013

Résumé

Ce travail consiste à faire une caractérisation d'un échantillon de piston issu d'un moteur d'automobile type DCI dans le but de déterminer sa composition chimique, sa microstructure ainsi que quelques propriétés mécaniques qui permettent de connaître la méthode de son élaboration et trouver est ce qu'il répond aux exigences techniques.

- Mots clés :Piston, alliage d'aluminium AS12, DRX, moteur DCI, micro-dureté, relation de BRAGG,

ملخص:

هذا العمل هو تقديم تمييز لعينة لمكبس سيارة محرك من نوع DCI من أجل تحديد تركيبها الكيميائية، بنيتها المجهرية وبعض الخصائص الميكانيكية التي تسمح بمعرفة طريقة صنعه ومعرفة هليمكنه تلبية المتطلبات التقنية.

- الكلمات المفتاحية: مكبس، خليط الألمنيوم AS12، إنكسار الأشعة السينية، محرك DCI، الصلابة الدقيقة، علاقة BRAGG،

Abstract:

This work is about make a characterization of a sample from a piston of automobile engine type DCI in order to determine its chemical composition, microstructure and some mechanical properties that allow to discover the method of its preparation and knowing if it answers to the technical requirements.

Key words:Piston, aluminum alloy AS12, XRD, DCI engine, micro-hardness, Bragg relationship.

Dédicace

A mes très chers parents, qui m'ont toujours été présent pour m'encourager et me soutenir pendant toutes mes épreuves, aucun autre ne m'est aussi trop chère que vous. Que dieu vous bénisse, vous assiste et vous soit en aide

A mon chère frère Hamid,

Mon cousin khaled mes amis Kheiro, Tarek, Anes, Elabas, Ouss Hamza et Hassen.

A mes amis

Remerciements

Je tiens à remercier Dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage, la patience et l'aide pour mener à bien ce modeste travail

Au terme de ce travail je tiens à remercier vivement Mr M.BOUABDALLAH mon encadreur pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail, pour sa disponibilité, ses conseils et son aide précieuse.

Je tiens à remercier également Mr SALHI pour m'avoir honoré en acceptant de présider le jury, Mr K.ABADLI et Mr A. DJEGHLAL d'avoir accepté de juger mon travail, cela fera un honneur pour moi

J'exprime ma gratitude et ma profonde reconnaissance à mes parents qui m'ont toujours soutenu et encouragé

Je remercie également mes collègues de l'ENP

Que toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'aboutissement de ce travail trouve ici l'expression de mes vifs remerciements et ma profonde gratitude

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Conception d'un piston	
I .1. Rôle du piston	2
I.1.1. Transmission des efforts	2
I.1.2. Étanchéité	2
I.1.3. Transmission de chaleur	3
I.2. Servitude	3
I.3. Étude du piston	4
I .4. Matériaux utilisés	5
I .4.1. Historique	5
I.4.2. Comparaison des propriétés des matériaux pour pistons	6
I.4.3. Classement des matériaux	11
Chapitre II. Alliages Al-Si utilisée pour les pistons	
II.1. Propriétés de l'aluminium pur	12
II .2.1. Alliages aluminium-silicium	12
II.2.2. Structure des alliages aluminium-silicium	14
II.2.3. Affinage des grains	16
II.2.4. Modification de la structure eutectique des alliages aluminium-silicium	16
II.2.5. Influence des impuretés	18
II.3. Les traitements thermiques	19
II.3.1. Généralités	19
II.3.2. Nomenclature	20
Chapitre III : Fabrication des piston en alliage d'aluminium	
III.1. Moulage en moule métallique par gravité (coquille)	22
III.1.2. Descriptif du moule	22
III.1.3. Règles de conception et d'utilisation	24
III.1.4. Microstructure obtenue	26
III.2. Moulage avec effet de compaction (Squeeze casting)	26
III.2.1. Principe	27
III.2.2. Caractéristiques principales du procédé	28
III.2.3. Caractéristiques des machines	30

III.2.4. Alliages utilisés	31
III.2.5. Possibilités spécifiques: fabrication de pièces avec renfort ou insertion	31
III.2.6. Limites du procédé	32
Chapitre IV : Techniques expérimentales	
IV.1. Composition chimique de l'alliage AS12	34
IV.2. préparation des échantillons.....	34
IV.3. Observation micrographique	34
VI.3.1. Enrobage	34
VI.3.2. Polissages	34
VI.3.3. L'attaque chimique.....	35
VI.3.4. Observation microscopique.....	35
IV.4. Analyse quantitative	36
IV.5. Essai de dureté	38
IV.5.1. Principe de l'essai de dureté Vickers (HV).....	38
IV.5.2. Essai de dureté.....	39
IV.6. Essai de microdureté.....	40
IV.7. Diffraction des rayons X.....	41
IV.8. fusion et trempe	42
Chapitre V : Résultats et Interprétations	
V.1. Spectroscopie	44
V.2. Observation microscopique.....	45
V.2.1. Échantillon du piston.....	45
V.2.1. Échantillon trempé.....	46
V.3. Analyse par diffraction des rayons X.....	47
V.4. Analyse quantitative.....	49
V.5. Essai de dureté	52
V.6. Essai de microdureté	53
Conclusion générale	54

Liste des tableaux

Tableau I.1. Caractéristiques des matériaux ferreux utilisés dans les pistons	6
Tableau I.2. Comparaison de rapport diamètre-masse entre les alliages ferreux et légers .6	
Tableau I.3. Diamètre, matériaux utilisé et masse de piston pour différentes ateliers.....6	
Tableau II.1. Propriétés mécaniques de l'aluminium pur à la température ambiante	7
Tableau II.2 les propriétés mécaniques et thermiques de silicium	12
Tableau III.1. Longueur de guidage selon le diamètre des avant-trous, pour le moulage en coquille	14
Tableau III.2 Exemple de caractéristiques mécaniques obtenues dans des pièces industrielles coulées en Squeeze casting direct	17
Tableau III.3 Applications des principaux alliages utilisés en Squeeze casting.....	24
Tableau III.2 Exemple de caractéristiques mécaniques obtenues dans des pièces industrielles coulées en Squeeze casting direct.....	31
Tableau .IV.1 Composition chimique de l'alliage AS12	34
Tableau V.1. Analyses chimiques des échantillons, effectués au sein de laboratoire BCL.....	44
Tableau V.2. tableau des calculs pour le dépouillement des RX.....	48
Tableau V.3. Résultat de dureté pour la charge 10Kg / 15 seconde.....	52
Tableau V.4. Résultats de la micro-dureté.....	53

Liste des figures

Figure I.1 vue de coupe pour un piston de véhicule.....	4
Figure I.2 Piston en fonte.....	5
Figure I.3 variation de diamètre de piston par rapport à la masse	7
Figure I.4 Évolution de la conductivité thermique des matériaux de piston en fonction de la température T	8
Figure I.5 Zones de températures atteintes dans le piston en fonctionnement.....	8
Figure I.6 Évolution de la dureté des matériaux de piston en fonction de la température T.....	9
Figure II.1 Diagramme d'équilibre Al-Si.....	13
Figure II.2 Structure cristalline du silicium montrant les liaisons tétraédriques.....	13
Figure II.3 Schéma d'une dendrite.....	15
Figure II.4 (a) Principe de la croissance compétitive, menant à un eutectique lamellaire (b) Schéma d'un eutectique lamellaire.....	15
Figure II.5 Micrographie MEB d'un cristal de silicium octaédrique dans un alliage hypereutectique, traces de croissance concentrique.....	19
Figure II.6 Schéma d'un traitement de mise en solution, trempe et revenu.....	20
Figure III.1 Détermination des dimensions d'un noyau	23
Figure III .2 Microstructure des différentes zones d'un piston fabriqué par coulée par gravité a) jupe de piston b) tête de piston (AS12).....	26
Figure III.3 Principe du Squeeze casting direct	27
Figure III.4 Principe de Squeeze casting indirect	28
Figure III.5 Comparaison des temps de solidification de cylindres coulés avec les procédés coquille par gravité et Squeeze casting	29
Figure III. 6 Coulée de piston avec préforme en Squeeze casting direct	32
Figure III.7 Squeeze casting indirect : ségrégation d'eutectique dans une pièce coulée en AlSi10Mg	33
Figure IV.1 Polisseuse mécanique de type hitecheurope, à vitesse maximum de 600 tr/min. (ENP, laboratoire de métallurgie).....	35

Figure IV.2 Microscope optique de type OPTIKA. (ENP, laboratoire de métallurgie).....	36
Figure IV.3 Capture écran du logiciel image-J traitant une image.....	37
Figure IV.4 Principe de l'essai de dureté Vickers.....	38
Figure IV.5 Duromètre de type INNOVATEST NEXUS 7000.....	39
Figure IV.6 Microduromètre de type SHIMADZU HMV-M3.....	40
Figure VI.7 Diffractomètre EXPERT-PRO.....	42
Figure IV.8 Four à résistance électrique CARBOLITE CWF 1300(ENP, laboratoire de métallurgie).....	43
Figure V.1. Structure de l'alliage AS12 pour un échantillon de piston.....	45
Figure V.2. Structure de l'alliage AS12 pour un échantillon trempé.....	46
Figure V.3. spectre de diffraction des RX pour l'échantillon du piston.....	47
Figure V.4 : Histogrammes de l'élongation.....	50
Figure V.5 Comparaison de la répartition en nombre par coefficient d'élongation des dendrites eutectiques.....	50
Figure V.6 : Histogrammes de la circularité.....	51
Figure V.7 comparaison de la répartition en nombre par coefficient de circularité des dendrites eutectique.....	51
Figure V.8 Essai de microdureté.....	53

Introduction générale

Introduction générale

Les pistons sont présents dans de nombreuses applications mécaniques. La plus courante est le moteur à combustion interne, notamment dans l'automobile. On trouve également un ou plusieurs pistons dans les compresseurs, les pompes, les vérins, les détendeurs.

Le piston issu d'un moteur DCI, est soumis à des contraintes mécaniques telles que les efforts de pression de gaz lors de la combustion et les frottements avec les chemises, et d'autres contraintes de type thermique tel que l'augmentation de la température qui affecte les propriétés mécaniques de la pièce, ainsi que le phénomène de la fatigue qui est dû au travail cyclique du piston.

La majorité des pistons existants sur le marché sont fabriqués à base d'alliages légers d'aluminium. L'utilisation de ces alliages présente des avantages majeurs par rapport à l'utilisation des autres types de matériaux comme les aciers et les fontes. L'importance de ces alliages se résume dans l'utilisation de l'aluminium combiné avec d'autres matériaux tel que le silicium qui améliore ses propriétés et satisfait les besoins de l'industrie.

Les alliages à base d'aluminium sont élaborés selon plusieurs méthodes qui influent sur les propriétés du produit final. En ce qui concerne la fabrication des pistons, on distingue deux méthodes qui mènent à la réalisation de deux types de pièces, soit simples, soit renforcées par des carbures de silicium.

Le présent travail consiste à prendre un échantillon d'un piston utilisé et lui faire une caractérisation microstructurale dans le but de déterminer sa microstructure et la méthode de fabrication utilisée lors de sa réalisation.

Chapitre I. Conception d'un piston

Le piston est l'organe mobile qui constitue l'une des parois de la chambre d'explosion. Il est animé d'un mouvement alternatif et rectiligne dans le cylindre. Il détermine ainsi l'admission, la compression et l'échappement.

Il transmet au vilebrequin, par l'intermédiaire de la bielle, l'effort exercé par la pression des gaz pendant la combustion et la détente [1].

I .1.Rôle du piston

Le piston a pour rôle :

- De transmettre à l'arbre moteur, par l'intermédiaire de la bielle, les efforts dus aux gaz ;
- D'assurer l'étanchéité aux gaz et à l'huile ;
- De transmettre les calories qu'il reçoit au cylindre et par conséquent aux fluides de refroidissement.

I.1.1. Transmission des efforts

Le piston doit être très résistant et cette résistance doit subsister à chaud; il subit des efforts extrêmement élevés et leur application est brutale puisque, aussi bien dans le moteur à allumage commandé que dans le diesel rapide, la combustion se fait pratiquement à volume constant.

Si on prend comme valeur de la pression maximale :

- 50 kg/cm² pour un moteur à allumage commandé,
- 100 kg/cm² pour un moteur Diesel (injection directe),

Un piston de 100 mm de diamètre doit supporter près de 4 tonnes dans le premier cas, près de 8 tonnes dans le second.

La courbe de l'effort du aux gaz, appliqué au piston, est donnée sur la figure suivante pour un moteur de 85 d'alésage.

En outre le piston est soumis aux efforts d'inertie, lesquels, maximaux en fin d'échappement, font travailler en traction les fonds de gorges de segments (racleur principalement), les attaches des bossages d'axe (cas des pistons fondus horizontalement).

I.1.2.Étanchéité

- L'étanchéité aux gaz est nécessaire :
 - Pour permettre la compression (rendement du cycle),
 - Pour éviter que les gaz chassent l'huile et provoquent : soit le grippage, soit le gommage des segments avec comme conséquence la détérioration de l'huile (dilution), la consommation d'huile, et les fumées au reniflard (Blow-by).
- L'étanchéité à l'huile est nécessaire :
 - Pour obtenir une faible consommation d'huile afin d'éviter :
 - L'encrassement de la chambre (augmentation du taux de compression –cliquetis),
 - L'encrassement des bougies,
 - Des allumages intempestifs par points chauds.

I.1.3. Transmission de chaleur

L'évacuation des calories est nécessaire, le piston devant être à une température peu élevés.

Pour que les segments jouent leur rôle correctement ;

Pour que la variation de jeu entre froid et chaud soit minimale.

I.2.Servitude

- Cette triple fonction impose un certain nombre de servitudes, le moteur à combustion interne devant fonctionner dans des conditions de charges et de vitesses très variées avec un silence relativement grand.
- Le piston devra être :
 - **Aussi léger que possible** pour réduire les efforts d'inertie, ces derniers ayant une grande influence sur la tenue des coussinets ;
 - **Silencieux** : le piston sera construit pour que la variation de jeu soit faible entre froid et chaud pour éviter : les claquements à froid et les grippages à chaud et en charge.
 - **Résistant en endurance** : on estime qu'un piston doit pouvoir tenir :

100 à 150 000 km pour les moteurs de voitures particulières

250 à 300 000 km pour les moteurs de véhicules industriels

400 à 500 000 km pour les moteurs d'autorails.

I.3.Étude du piston

Le piston peut être décomposé en quatre parties principales comme le montre la figure I.1 :

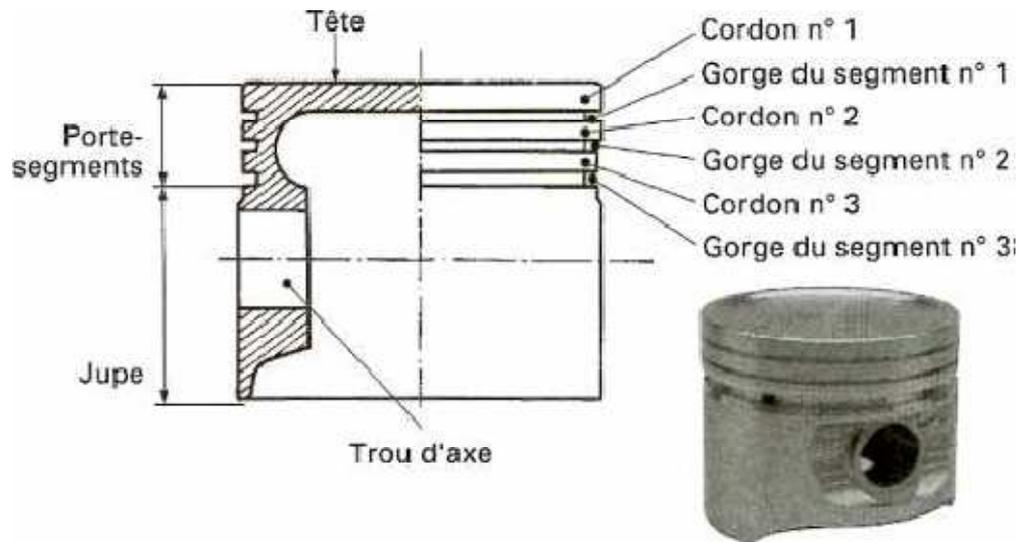


Figure I.1 vue en coupe et image d'un piston de véhicule [3].

- La tête ou fond qui reçoit les efforts dus aux gaz ;
- Le porte-segments qui, par l'intermédiaire des segments, assure l'étanchéité aux gaz et à l'huile et dissipe une partie des calories reçues vers le fluide de refroidissement ;
- le logement de l'axe de piston ou trou d'axe;
- la jupe, ou partie frottante, dont le rôle est de guider le porte-segments et de dissiper une partie des calories.

Le piston et les segments doivent transmettre au vilebrequin, par l'intermédiaire de la bielle, les efforts dus aux gaz (jusqu'à 7,5 MPa pour les moteurs à essence non suralimentés et jusqu'à 14 à 18 MPa pour les moteurs diesels suralimentés de camions).

Ils forment la chambre de combustion qui doit être étanche aux gaz et à l'huile. Ils doivent être suffisamment isolants pour ne pas fournir trop de calories au fluide de refroidissement, tout en évitant la formation de points chauds et de grippage.

Il faut que le piston soit aussi léger que possible et le moins encombrant possible (distance entre le trou d'axe et la tête la plus réduite pour avoir un moteur compact).

La dilatation du piston doit être telle que le jeu piston/chemise varie peu car trop de jeu à froid provoque des claquements et pas assez de jeu à froid un grippage.

Le piston doit avoir une bonne résistance mécanique en fatigue [2].

I .4.Matériaux utilisés

I .4.1.Historique

Les premiers moteurs a gaz, à essence et à huile lourde avait, comme les moteurs à vapeur, des pistons en fonte. On peut voir sur la figure 3 un piston monobloc en fonte.



Figure I.2. Piston en fonte [3].

C'est en 1911 que Hispano Suiza commença à fabriquer ceux-ci en alliages d'aluminium.

Le bénéfice que l'on pouvait tirer de l'allégement du piston était connu, mais on s'efforçait d'y parvenir en soignant particulièrement la fonderie des pistons en fonte (faibles épaisseurs).

A partir de 1918, les pistons aluminium ont détrôné rapidement les pistons en alliages ferreux, mais on assista aux U.S.A, en 1930, à une recrudescence du piston acier (60% des constructeurs) due plus à des conditions économiques qu'à des conditions techniques.

Depuis la deuxième guerre mondiale, les alliages légers ont repris leur place et on comptait aux U.S.A, en 1952, 8 moteurs seulement sur 60 équipés de pistons fonte ou acier.

I.4.2. Comparaison des propriétés des matériaux pour pistons

Les propriétés des matériaux utilisés pour les pistons sont données dans le tableau I.1.

Tableau I.1. Caractéristiques des matériaux ferreux utilisés dans les pistons [3].

Caractéristiques	AS12 UNG	AS12 UNG renforcé par fibre	Fonte GS	Acier austénitique	Acier (Cr-Mo)
Résistance à la traction à 350° C (MPa)	45	100	400	1 100	700
Limite de fatigue à 350°C à 10 ⁷ cycles (MPa)	30	50	200	400	250
Module d'Young à 350 °C (GPa)	55	55	160	190	190
Conductivité thermique à 100°C (W·m ⁻¹ · K ⁻¹)	150	100	35	20	40
Masse volumique (Kg/m ³)	2.7	2.7	7.2	7.8	7.7

I.4.2.1. Densité

On remarque que la densité des alliages légers est environ 3 fois plus faible que celle des alliages ferreux. Mais le poids des pistons ne suit pas rigoureusement la densité.

- Alliage léger comparé a la fonte, exemple : piston Renault tableau. I.2.

Tableau I.2. Comparaison de rapport diamètre-masse entre les alliages ferreux et légers [2].

	Piston de Ø 85	Piston de Ø 100
Fonte (moteur industriel)	0.800 kg	1.420 kg
Alliage léger	0.455 kg	0.50 kg

- Alliage léger comparé à l'acier : les Américains ont réalisé des pistons acier aussi légers que des pistons de même diamètre en alliages légers.

Ci-dessous quelques exemples (tableau .I.3):

Tableau I.3. Diamètre, matériaux utilisé et masse de piston pour différentes ateliers [2].

	Diamètre (mm)	Acier	Alliage léger
Ford U.S.A. –V8	78	0.333 kg	
Citroën	78		0.435 kg
Peugeot	78		0.390 kg
Mercury	80.6	0.47 kg	

Opel	80		0.396 kg
Renault	85		0.455 kg

La figure I.3 présente la variation du diamètre de piston par rapport à sa masse pour différentes écuries.

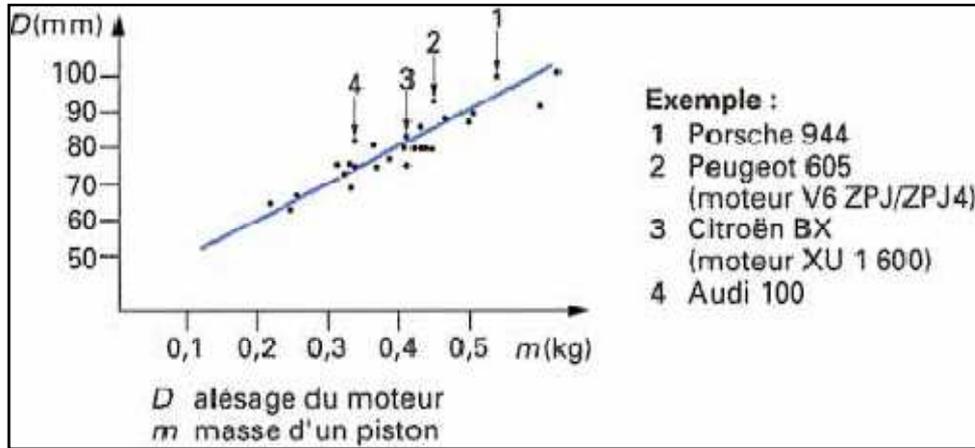


Figure I.3 variation de diamètre de piston par rapport à la masse [3].

I.4.2.2. Conductivité thermique

Celle des alliages légers est de 3 à 4 fois (à 200 °C) celle des alliages ferreux, elle croit avec la température alors que celle des alliages ferreux décroît légèrement.

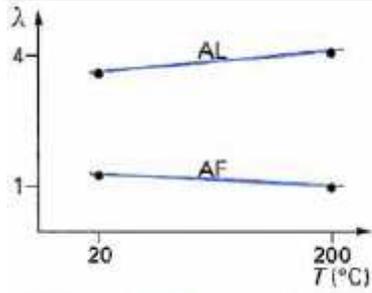
Il en résulte une diminution des températures du piston ; exemple pour un moteur à allumage commandé:

Tableau .I.4. Diminution de la température entre le centre et le cordon de piston [2].

	Acier ou fonte	Alliage léger
Centre du fond de piston	425°C	250°C
Cordon du coup de feu	300°C	240°C

En conséquence, le risque d'allumage par points chauds est diminué et permet une augmentation du rapport de compression en conservant un même carburant d'indice d'octane donné.

la figure I.4 illustre la variation de la dureté des alliages ferreux et légers entre 20 et 200°C .



AL : Alliage léger, AF : Alliage ferreux.

Figure I.4 Évolution de la conductivité thermique des matériaux de piston en fonction de la température T [3].

I.4.2.3. Dureté à chaud

La dureté à chaud est un élément important pour la tenue des gorges de segments.

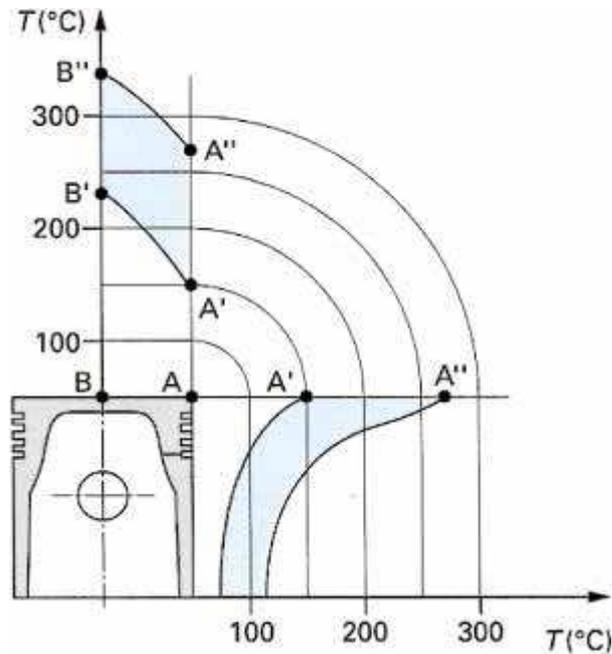


Figure I.5. Zones de températures atteintes dans le piston en fonctionnement [3].

Les températures atteintes sont de l'ordre de :

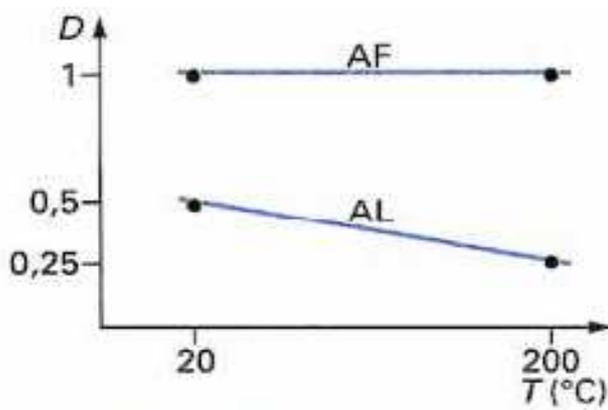
250 °C près de la tête ; 220 °C près du cordon no 1 ; 190 °C près du fond de gorge, no 1 ; 190 °C dans le bossage d'axe.

Si on examine la répartition des températures de pistons en alliages légers, par exemple : le moteur V6 PRV, on voit que les parties du piston, où la dureté à chaud est un facteur important (gorges de segments), sont à une température de 200°C pour le moteur à allumage commandé, et peuvent atteindre 300°C pour les moteurs à allumage par compression à préchambre.

Bien que cette température critique soit plus forte de 100°C environ pour les pistons en fonte ou acier que pour les pistons en alliage léger.

En effet, à froid la dureté des alliages légers est déjà moitié de celle des alliages ferreux ; et à 250°C, les alliages légers perdent 50% de leur dureté, alors que les alliages ferreux conservent la leur.

Ce qui présentait les avantages d'un faible coefficient de frottement et de bonnes caractéristiques mécaniques pour les alliages ferreux. Mais le poids représentait un inconvénient majeur [2].



AL : Alliage léger, AF : Alliage ferreux.

Figure I.6 Évolution de la dureté des matériaux de piston en fonction de la température T [3].

En réalité, on tient compte de ce fait dans la conception du piston et ceci conduit :

A descendre le segment de coup de feu plus bas dans le piston aluminium que dans le piston fonte ou acier et à avoir un intervalle entre segments plus grand.

A rapporter, dans certains moteurs Diesel, des porte-segments en fonte ou en bronze sur les pistons aluminium.

A utiliser des alliages hypersilicés pour lesquels la dureté à chaud est améliorée [2].

I.4.2.4. Dilatation

Le coefficient de dilatation des alliages d'aluminium est de 50 à 100% plus élevé que celui des alliages ferreux.

Alors que les pistons ferreux sont de forme simple sans correction auto thermique, il faut compenser la dilatation des alliages légers par des artifices de construction parfois difficiles à réaliser.

Notons néanmoins que l'addition de Si aux alliages d'aluminium diminue le coefficient de dilatation ; mais malheureusement, l'usinage des alliages hypersiliciés (>20% Si) est délicat et l'usure des outils est plus rapide.

Pour des petites séries, le passage d'un alliage au Cu à un alliage au Si à teneur moyenne peut permettre une réduction notable des jeux de fonctionnement, exemple, piston Ø 140 :

En 12% Cujeu 0.32

En 11% Sijeu 0.25 [2].

Qualité de frottement, résistance à l'usure et adhérence à la couche d'huile :

I.4.2.5. Usure des pistons

En général les usures de piston sont extrêmement faibles ; après 1000 heures de service, on note à peine 1 à 2/100 d'usure de jupe.

C'est la chemise qui s'use et cette usure est due à l'effet de rodoir des segments et du piston qui promènent des particules abrasives.

Pour les pistons en alliage d'aluminium, la présence de poussière (silice) due à un mauvais filtrage est catastrophique pour le cylindre ; les particules dures abrasives s'incrustent dans le piston plus tendre et usent la chemise.

C'est pour cette raison que certains moteurs industriels (travaux publics) ou moteurs de tracteurs agricoles qui travaillent dans la poussière sont munis de pistons fonte.

I.4.2.6. Adhérence a l'huile

L'huile adhère mieux sur la fonte que sur l'acier ou les alliages légers. On utilise parfois des dépôts superficiels sur les surfaces de frottement.

Pour améliorer le frottement piston-chemise, on peut sur le piston effectuer un traitement comme un étamage, un plombage, un graphitage, un ferrage, etc.

Sur les chemises, on peut effectuer une phosphatation, une nitruration, un chromage, etc.

Pour améliorer la résistance thermique, on peut ajouter des dépôts céramiques sur la tête des pistons surtout pour les moteurs diesels [2].

I.4.3. Classement des matériaux

Les propriétés des matériaux étudiés plus haut sont, comme nous l'avons vu, souvent contradictoires.

Le **coefficient de Fleury** est un facteur qui tient compte des principales caractéristiques des alliages, afin de classer les matériaux, est il est égale à

$$K = \text{conductivité thermique} / (\text{coefficient de dilatation} * \text{densité})$$

Plus grand K, meilleur est le matériau.

Le classement des matériaux serait le suivant :

Alliage Al à 25% Si	8.90
Alliage Al à 12% Si	7.35
Alliage Y (Al-Cu-Ni)	6.30
Alliage Al à 12% Cu	5.80
Fonte et acier	1.26

D'autres auteurs ont proposé de remplacer dans ce coefficient le coefficient de dilatation par la chaleur spécifique du matériau. La chaleur spécifique de la fonte étant 0.13, celle de l'aluminium 0.22, le classement resterait pratiquement inchangé.

Mais ces coefficients donnent une importance égale à chaque propriété et ne tiennent pas compte d'autres facteurs tels que : la facilité d'usinage et la facilité d'élaboration, qui rentrent en ligne de compte dans le prix de revient [2].

Actuellement, certains constructeurs font encore des études avec des pistons en fonte GS, mais on utilise surtout des alliages d'aluminium au silicium, souvent de l'AS 12 UNG dans les moteurs à essence.

Les avantages essentiels du silicium sont :

- la réduction de la densité ;
- la réduction du coefficient de dilatation linéique ;
- l'amélioration de la conductivité thermique ;
- l'augmentation de la dureté et de la résistance à la traction.

En revanche l'usinabilité est très réduite [3].

Chapitre II. Alliages Al-Si utilisés pour les pistons

Industriellement, les alliages Al-Si sont les plus utilisés pour leurs propriétés de fonderie, leur aptitude au soudage, leur bonne stabilité dimensionnelle et leur faible température de fusion. Ils ont de plus une bonne résistance aux éraflures lors des périodes de faible lubrification du moteur (démarrage à froid par exemple).

L'aluminium pur ne présente que peu d'intérêt, car ces propriétés physico-chimiques sont médiocres. Par contre ces alliages sont des matériaux de choix dans l'industrie aéronautique et automobile [4].

II.1. Propriétés de l'aluminium pur

L'aluminium pur possède une structure cristalline cubique à face centre (cfc) avec les valeurs suivantes :

- paramètre de la maille : 0.405 nm à 298k.
- masse volumique à 25°C 2698.7 kg/m³.
- points de fusion : 660°C.
- retrait volumique : 5.6% en cours de solidification.
- capacité thermique massique à 20 °C : $c = 950 \text{ J. Kg}^{-1} . \text{ K}^{-1}$.
- conductivité thermique à 20°C : $\lambda = 217.6 \text{ W.m. K}^{-1}$.
- résistivité électrique à 20°C : $\rho = 2.63 \mu\Omega.m$.

Le tableau II.1. les propriétés mécaniques de l'aluminium pur.

Tableau II.1. Propriétés mécaniques de l'aluminium pur à la température ambiante [4].

Module d'élasticité (MPa)	Charge de rupture (MPa)	Limite d'élasticité 0.2% (MPa)	A _R (%)
68 000	80 à 100	30 à 40	25 à 30

II .2.1. Alliages aluminium-silicium

Le système aluminium-silicium forme un eutectique pour une teneur en silicium de 12,6 % en masse (figure II.1). Les systèmes eutectiques possèdent en général d'excellentes propriétés de fonderie, et l'eutectique Al-Si a été l'un des premiers alliages de fonderie à être utilisé industriellement. Le traitement dit de « modification » par le sodium, découvert par AladarPacz en 1920, a permis d'améliorer considérablement les propriétés mécaniques de cet alliage par transformation de la structure naturellement aciculaire en structure fibreuse. Cela a contribué à l'essor des alliages de fonderie à cette époque [5].

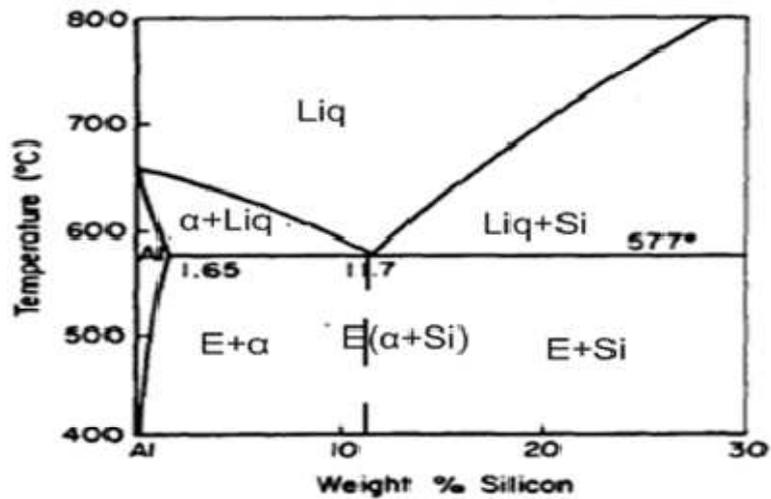


Figure II.1 Diagramme d'équilibre Al-Si [6].

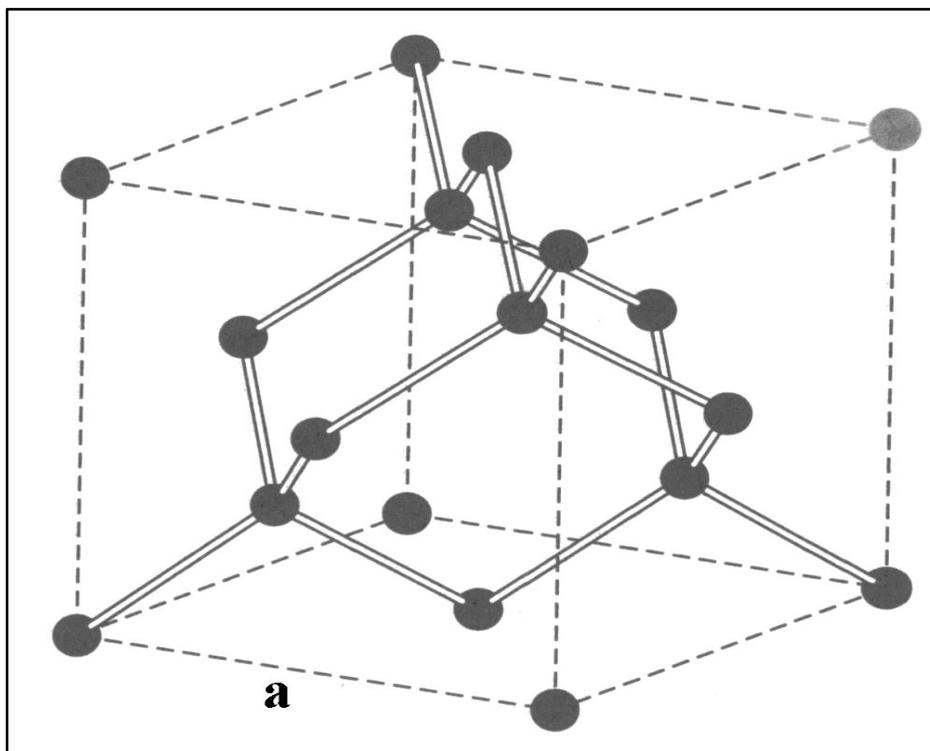


Figure II.2 : Structure cristalline du silicium montrant les liaisons tétraédriques[7].

Le silicium est le 2^{ème} élément du groupe IVA dans le tableau périodique des éléments, c'est un élément électropositif tétravalent Si^{+4} .

- Masse atomique = 28,08 ; numéro atomique = 14 ; rayon atomique = 0,39Å.
- A la pression atmosphérique le silicium se cristallise en une structure CFC diamant comme montré sur la figure II.2.

Il ne se trouve jamais seul dans la nature, mais en combinaison avec l'oxygène qui forme des oxydes et silicates.

Le silicium est un semi-conducteur avec une énergie de gap de 1.12 eV à 25°C. Avec les propriétés physiques suivantes (tableau. II.2).

Tableau II.2 : les propriétés mécaniques et thermiques de silicium [8].

Propriété	Valeur
Densité atomique (atomes/cm ³)	5.0×10^{22}
Point de fusion (°C)	1410
Point d'ébullition (°C)	2355
Densité (g/cm ³ à 25°C)	2.329
Volume de contraction à la fusion (%)	9.5
Conductivité thermique (300K)(W.cm ⁻¹ K ⁻¹)	1.5

II.2.2. Structure des alliages aluminium-silicium

L'importance notable d'alliages Al-Si dans l'industrie a motivé plusieurs chercheurs à explorer la microstructure de ces alliages avec leurs propriétés. La microstructure d'alliages Al-Si dépend de la composition chimique, et la chaleur de traitement à appliqué. La microstructure d'Al-Si alliages est composée de deux phases, c.-à-d. α et β , sous forme d'eutectique [$\alpha+\beta$] ou sous forme de [$\alpha+\beta$] + α ou [$\alpha+\beta$] + β [9].

Cette structure comprend des solutions solides sous forme de dendrites (hypo-eutectiques), eutectiques plus au moins complexes (binaires, ternaires) et des constituant intermétalliques.

Dans les alliages Al-Si, les cristaux solides de l'aluminium se forment sur les parois du moule (plus froides que le cœur) et croissent vers l'intérieur. Leur composition en Si est inférieure à celle du liquide qui les entoure car la solubilité du Si dans Al diminue avec la température.

Donc, le silicium est rejeté à la surface des cristaux en cours de croissance et abaisse la température de solidification du liquide à cet endroit par effet cryoscopique (dit surfusion). Ceci ralentit la solidification car plus de chaleur doit être évacuée pour solidifier le liquide de cette couche. Mais si un germe du cristal en croissance parvient à traverser cette couche de liquide en surfusion, il se trouve dans un milieu non enrichi en Si et peut se solidifier, ce qui est thermodynamiquement favorable. Cette protubérance est instable et croît rapidement ce qui explique que les cristaux d'aluminium se développent non sous forme de sphères ou d'aiguilles mais sous forme d'arborescences appelées dendrites. (Figure II.3) dans les bras secondaires ou SDAS (Secondary Dendrite Arm Spacing) sont espacés de quelques dizaines de micromètres, cette distance est appelée espacement des bras de dendrite, en anglais DAS (Dendrite Arm Spacing) [10].

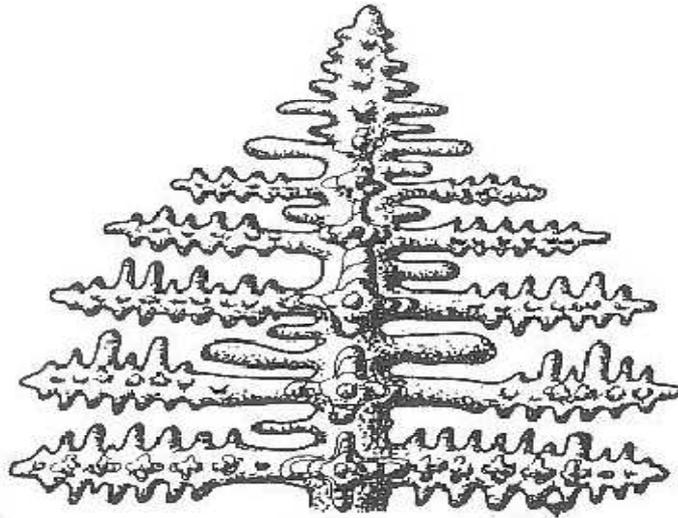


Figure II.3 Schéma d'une dendrite [4].

L'eutectique se solidifie alors entre les bras de dendrite, dans une zone riche en silicium rejeté à l'avant du front de solidification (silicium en large excès dans cette zone). Ceci a enrichi le métal environnant en silicium, qui va se précipiter sous forme d'une plaquette, ce qui draine le silicium en solution à proximité et crée juste à côté une zone d'aluminium presque pur. On va donc former une lamelle d'aluminium. De proche en proche on forme alors un eutectique lamellaire par croissance compétitive (figure II.4) [4].

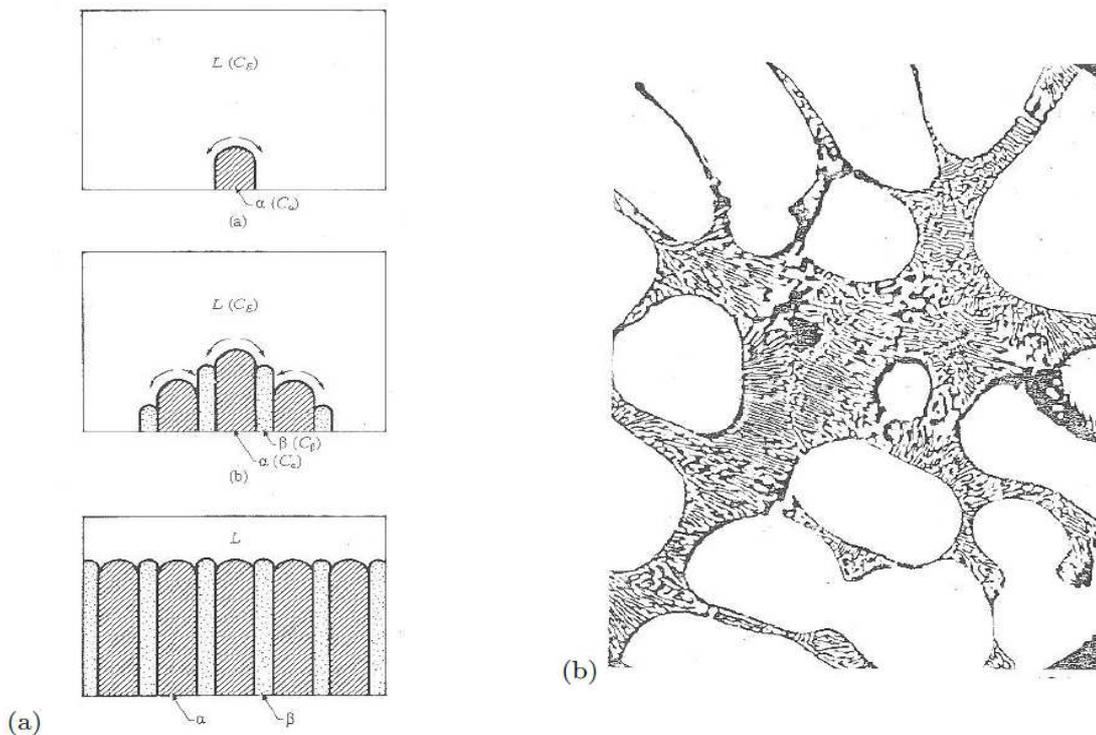


Figure II.4(a) Principe de la croissance compétitive, menant à un eutectique lamellaire (b) Schéma d'un eutectique lamellaire [4].

Chapitre II. Alliages Al-Si utilisés pour les pistons

Les alliages d'aluminium de fonderie constituent plusieurs familles de matériaux dont la composition est un compromis entre les propriétés de moulage (coulabilité, usinabilité, absence de criquabilité, retrait volumique) et les propriétés d'usage de la pièce (propriétés mécaniques, aspect de surface, aptitude au polissage, résistance à la corrosion ...).

L'obtention d'un type de propriété mécanique dépend aussi du procédé de moulage (sable, coquille, cire perdue, coulée sous pression ...). En effet, la coulée en coquille qui permet des refroidissements rapides donne aux pièces une structure métallurgique plus fine (faible DAS) et améliore, par rapport au même alliage coulé en sable, les charges à rupture et les allongements.

L'avantage des moules en sable, faciles à mettre en œuvre, est de permettre la réalisation rapide de prototypes permettant au constructeur de valider la géométrie, la puissance, le refroidissement du piston (mais pas la durée de vie). On notera qu'un faible DAS améliore la durée de vie en fatigue. Le DAS est d'autant plus faible que le temps de solidification T_s est court (refroidissement rapide) selon la loi empirique :

$DAS (\mu m) = K.T_s^{1/n}$ s ou K , n sont des constantes. Pour l'AS7G par exemple, on aura $K = 10$ et $n = 3$ [4].

II.2.3. Affinage des grains

Un grain fin conduit à l'amélioration de la qualité des pièces et à leur propriété d'utilisation. Ce traitement consiste à apporter dans le métal liquide des germes de recristallisation favorisant une germination hétérogène. Les éléments les plus efficaces pour l'aluminium et ses alliages sont le titane et le bore introduit soit sous forme d'alliages mères dont le plus utilisé est AlTi5B1, soit sous forme de sels contenant du fluo borate et du fluo titanate de potassium [11].

II.2.4. Modification de la structure eutectique des alliages aluminium-silicium

Les alliages d'aluminium-silicium (Al-Si) ont connu de nombreuses applications dans l'industrie grâce à leur haute résistance mécanique, leur poids faible, leur bonne résistance à la corrosion et à leur excellente coulabilité. Un des traitements du métal liquide, appliqué sur ces alliages, est la modification par certains éléments comme le strontium (Sr) et le sodium (Na)[11] comme illustré dans le (tableau .II.3). Elle s'applique à tous les alliages dont la teneur en silicium est comprise entre 4 et 13 %. Son principal avantage est d'améliorer la ductilité (allongements) des alliages en échangeant leurs morphologies eutectique aciculaire vers une forme fine et fibreuse. Les éléments chimiques « modificateurs » neutralisent les germes de phosphore d'aluminium et agissent sur la croissance des plaquettes de silicium en multipliant le nombre de ramifications. Ce qui conduit à une croissance sous forme de fibres ayant l'allure du corail. Les éléments les plus utilisés industriellement sont le sodium et le strontium, plus accessoirement le calcium [12].

Tableau .II.3 Avantages et inconvénients des agents modificateurs ou affinant de la structure des alliages eutectiques et hypoeutectiques [5].

Agent modifiant ou affinant	Avantages	Inconvénients
Sodium	<p>Il est bien connu est largement utilisé en fonderie. C'est un élément modificateur très efficace. Il est compatible avec le strontium et le calcium qui peuvent contribuer à réduire l'effet d'évanouissement de la modification.</p>	<p>Il est extrêmement volatile. Un contrôle rigoureux est nécessaire afin de maintenir l'alliage dans les fourchettes analytiques requises. Le contrôle métallurgique des pièces produites a tendance à être couteux. Il est agressif envers les poteyages des moules et les résistances électriques des fours. Il augmente l'aptitude à l'oxydation du métal à l'état liquide.</p>
Strontium	<p>C'est un élément modificateur efficace. lorsque le procédé du moulage est optimisé, le strontium est stable dans le temps et la production en est facilitée. Un bon niveau de dégazage peut être atteint avec des équipements existants. Il est moins agressif que le sodium envers les poteyages des moules. Le métal liquide est beaucoup moins sensible à l'oxydation qu'avec le sodium.</p>	<p>Il a tendance à rendre le dégazage de l'alliage plus difficile. L'alliage présente un plus grand risque de regazage. Pour une teneur d'hydrogène donnée, le strontium conduit à une porosité importante. Les cellules eutectiques solidifient de façon endogène dans la masse du métal défavorisant l'alimentation interdendritique et favorisant la micro retassure dispersée.</p>
Antimoine	<p>Il affine la structure dans la phase dendritique. Son effet est permanent lors de refusions ou de maintiens de l'état liquide. Il ne rend pas l'alliage sensible au regazage. Il permet la production de pièces ou est recherché l'absence totale de porosité. Les fronts de solidification sont généralement lisses et favorisent l'alimentation interdendritique.</p>	<p>Il est incompatible avec le sodium et le strontium et par conséquent en réduit l'effet modificateur. ce qui nécessite impérativement une gestion rigoureuse des retours en fonderie. Sa permanence combinée a ses incompatibilités pose un sérieux problème pour le recyclage des pièces en fin de vie (2eme fusion) .</p>

II.2.5. Influence des impuretés

Les impuretés contenues dans ces alliages sont importantes car elles modifient, volontairement ou non, les diverses propriétés du matériau. On trouve principalement comme impuretés :

Le fer : c'est une impureté naturelle du silicium et de l'aluminium. Il fragilise la pièce produite par formation de composés intermétalliques durs et fragiles qui peuvent faciliter l'amorçage d'une fissure par cohésion lors d'une sollicitation mécanique. De plus, il gêne l'alimentation en métal liquide des pièces dans le moule par formation de plaquettes d'éléments intermétalliques et diminue l'étanchéité. Pour avoir de bonnes propriétés mécaniques, sa teneur est limitée à moins de 0.14% dans les alliages de première fusion dits à haute pureté; le chrome et le manganèse ont sensiblement les mêmes effets ;

Le nickel : améliore légèrement les propriétés à chaud mais coûte cher ;

Le plomb : au delà de 0.05% il neutralise la modification au strontium et diminue les propriétés mécaniques de l'alliage ;

L'étain : abaisse les caractéristiques mécaniques, augmente la porosité, améliore très peu la coulabilité ;

Le phosphore : est un poison pour les alliages hypo-eutectiques car il constitue un site de germination du silicium, par contre, ce sera un élément affinant pour les alliages hypereutectiques (hyper-silicés). En effet dans ces alliages, ce sont les plaquettes de Si qui germent en premier et il n'y a donc pas de dendrites d'aluminium ;

Le lithium : très oxydable, réagit instantanément et considérablement l'alliage.

Les éléments que l'on ajoute volontairement pour leurs propriétés bénéfiques sont indiqués ci-dessous.

Le titane : c'est une impureté de l'aluminium, mais il permet d'affiner la dendrite de solution solide riche en aluminium : c'est un affinant. L'opération d'affinage consiste à ajouter dans l'alliage liquide des germes de cristallisation comme TiB₂ en grand nombre afin d'augmenter le nombre de grains de l'alliage pour diminuer la taille de dendrite et augmenter les caractéristiques mécaniques ainsi que la durée de vie en fatigue. Au delà de 0.4% il se forme TiAl₃ qui diminue l'usinabilité mais améliore encore l'affinage.

Le calcium : prolonge le temps de modification par le sodium [4].

II.3. Les traitements thermiques

La composition de l'alliage seule n'est pas suffisante pour conférer au matériau les propriétés mécaniques requises pour les applications industrielles, c'est pourquoi on a recours à des traitements thermiques, qui, selon les cas, produisent un adoucissement ou un durcissement, ainsi que des changements de comportement vis-à-vis de la résistance à la corrosion, de la fatigue, du fluage, de l'allongement...

II.3.1. Généralités

Trois types de traitements thermiques sont généralement pratiqués :

– L'homogénéisation ou mise en solution permettant de mettre en solution solide certains éléments d'alliage et d'obtenir une composition chimique uniforme, ceci à une température juste inférieure à celle de fusion de l'eutectique (figure II.5). (Sinon on crée des défauts appelées brulures);

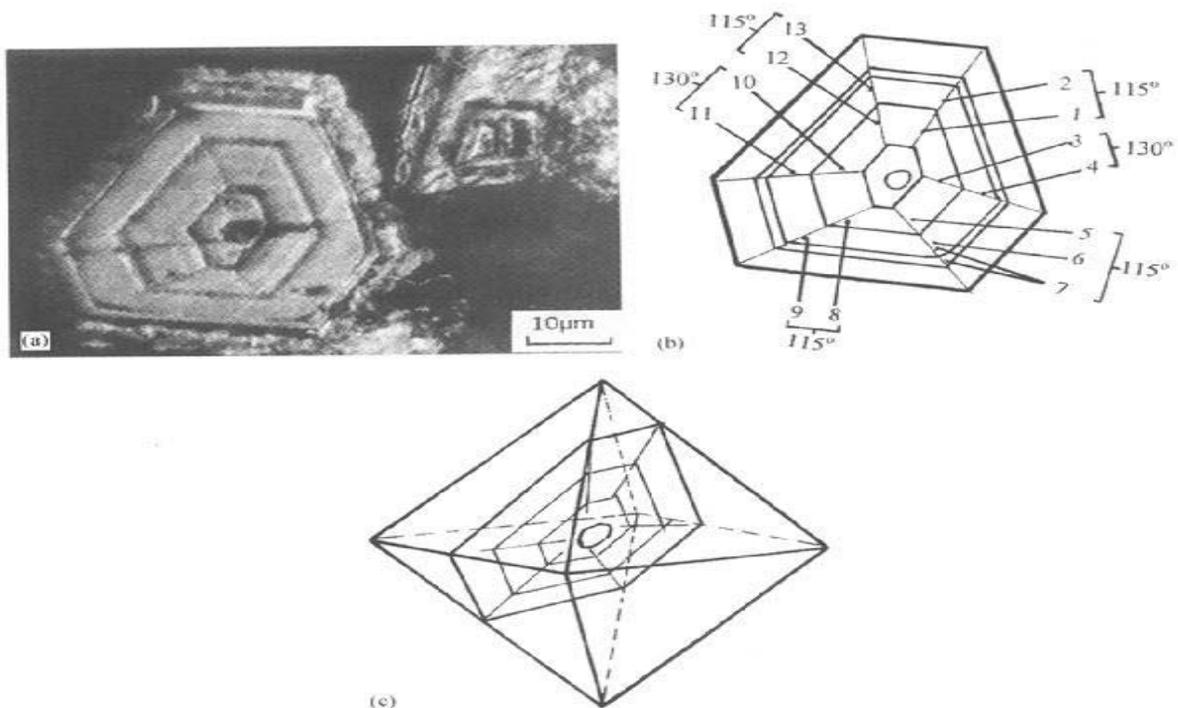


Figure II.5 Micrographie MEB d'un cristal de silicium octaédrique dans un alliage hypereutectique, traces de croissance concentrique [4].

– La trempe structurale (ou par précipitation) qui consiste à prendre un alliage en équilibre à une température donnée et à le refroidir le plus rapidement possible en évitant tout changement de phase. Un traitement de revenu suit généralement la trempe ;

– Le revenu (ou stabilisation), ou l'on porte le métal à une température appropriée pendant un temps suffisant pour qu'un état d'équilibre puisse être atteint. Le but est de produire une relaxation des contraintes internes résiduelles dues au choc thermique de la trempe et de permettre la formation de phases durcissantes par précipitation.

Le traitement de trempe suivi d'un revenu est présenté dans la figure II.6.

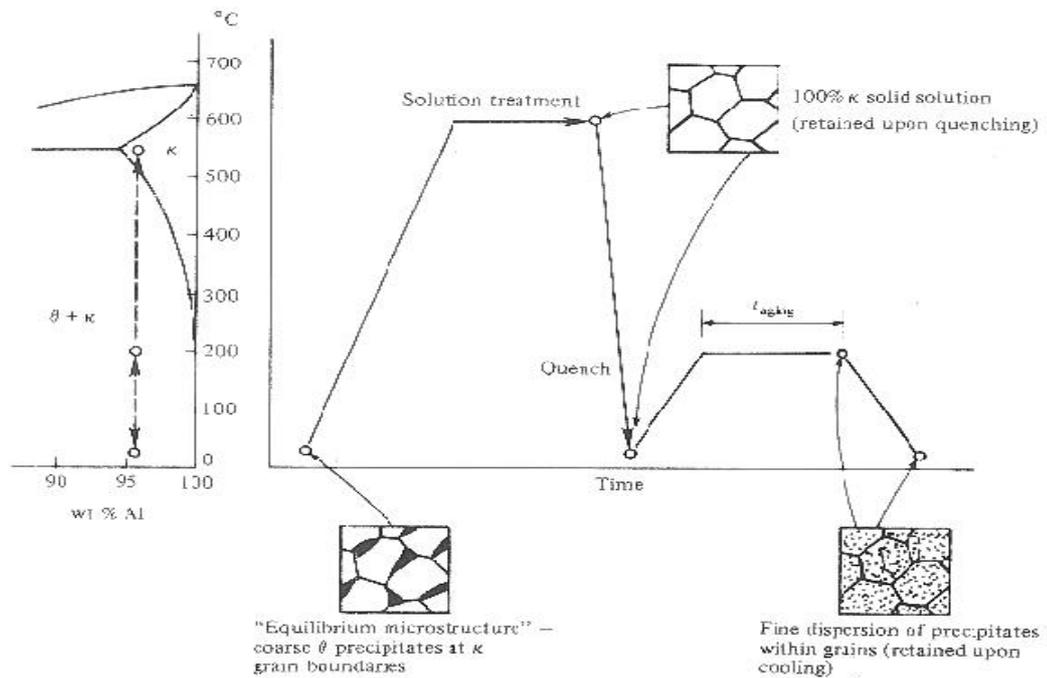


Figure II.6 Schéma d'un traitement de mise en solution, trempe et revenu [4].

II.3.2. Nomenclature

On distingue les différents traitements thermiques par les notations : T1, T2...T10.

Les plus utilisés pour les pièces de fonderie sont :

- F: état brut de fonderie sans traitement thermique;
- T1: mise en solution, refroidissement contrôlé après solidification et maturation (vieillessement naturel à 20°C);
- T4: mise en solution, trempe et maturation;
- T5 (pour les alliages au Cu): mise en solution à 495 °C (et non 540°C car la température de l'eutectique est abaissée par la présence du Cu), puis refroidissement contrôlé après solidification de 450°C à 220°C par tunnel à air forcé. Avantage de la méthode : pas de trempe donc peu de contraintes résiduelles et pas de revenu donc coût moindre ;

Chapitre II. Alliages Al-Si utilisés pour les pistons

- T6: mise en solution à 540°C, trempe et revenu au pic de dureté. Une trempe à l'échaude (90°C) permet de limiter les chocs thermiques et donc les tapures de trempe;
- T64: mise en solution à 540°C, trempe et revenu légèrement avant le pic de dureté (sous-vieillissement);
- T7: mise en solution à 540°C, trempe et revenu légèrement après le pic de dureté (sur-vieillissement) [12].

**Chapitre III. Fabrication
de piston en alliage
d'aluminium**

Les pistons en alliages d'aluminium sont généralement obtenus par coulée par gravité, mais on utilise parfois la coulée sous méga pression (aussi appelée squeeze casting ou moulage-forgeage) qui conduit à de meilleures caractéristiques mécaniques. Ces pistons peuvent être renforcés au niveau du porte-segments par l'adjonction de fibres (oxydes d'aluminium par exemple) dans le moule avant de faire la coulée sous méga pression [14].

III.1.Moulage en moule métallique par gravité (coquille)

C'est un procédé très répandu en fonderie d'aluminium.

Ses principaux avantages sont les suivants :

- possibilité de fabrications de grandes séries avec un haut degré de mécanisation ;
- possibilité de fabrication en moyennes et petites séries avec des investissements modestes ;
- — fiabilité et faible dispersion des résultats à condition d'assurer une maîtrise et un contrôle des paramètres ;
- — propriétés mécaniques excellentes et possibilité de traitements thermiques.

Le moule peut être réalisé, selon les contraintes, en différents matériaux : fonte grise, fonte GS, aciers de diverses nuances y compris alliés. Les différentes parties du moule peuvent être soit usinées dans la masse, soit produites par moulage.

III.1.2.Descriptif du moule

Il est constitué d'autant de parties moulantes qu'il est nécessaire pour permettre l'extraction de la pièce. Les parties non démoulantes sont réalisées sous la forme de noyaux en sable, détruits à chaque coulée.

Les broches et les noyaux métalliques sont fabriqués dans les mêmes nuances que les parties moulantes principales appelées chape. Quelquefois certaines broches sont fabriquées en métaux meilleurs conducteurs de la chaleur : cuproalliages au nickel. Les parties du moule très sollicitées thermiquement et qui doivent assurer un grand nombre de cycles sans se fissurer sont réalisées de plus en plus en nuances d'aciers alliés du type X38CrMoV5.

Les systèmes de remplissage et de masselottage obéissent aux mêmes règles qu'en moulage sable. Ils sont disposés généralement au joint du moule. Si ce n'est pas possible, on les dispose dans un noyau en sable, renouvelé à chaque pièce.

Les dépouilles sont indispensables pour pouvoir extraire la pièce de la coquille sans la déformer ; des éjecteurs contribuent à un démoulage équilibré.

La figure III.1 est accompagnée d'un abaque qui permet de déterminer la dépouille des noyaux et des broches en fonction de leur longueur et la longueur de la partie guidée.

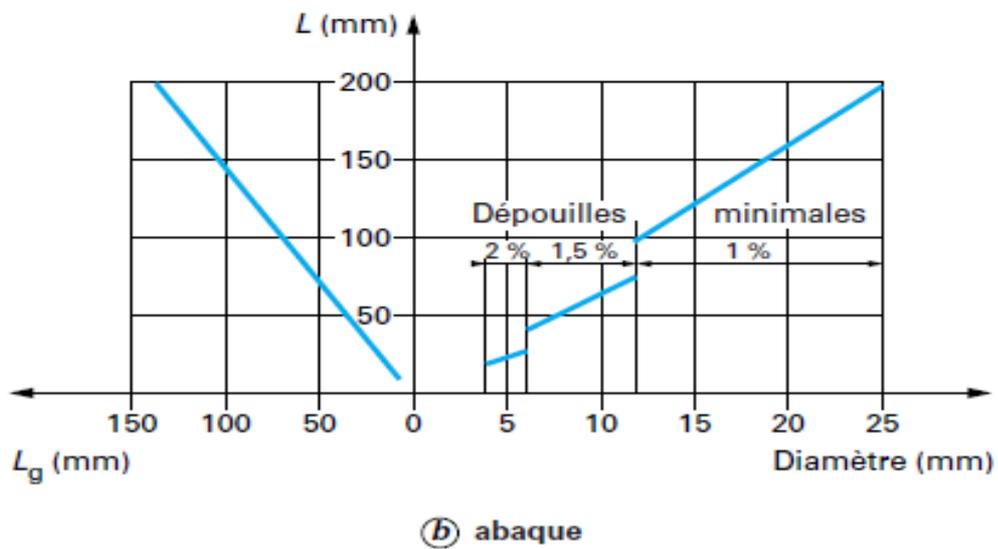
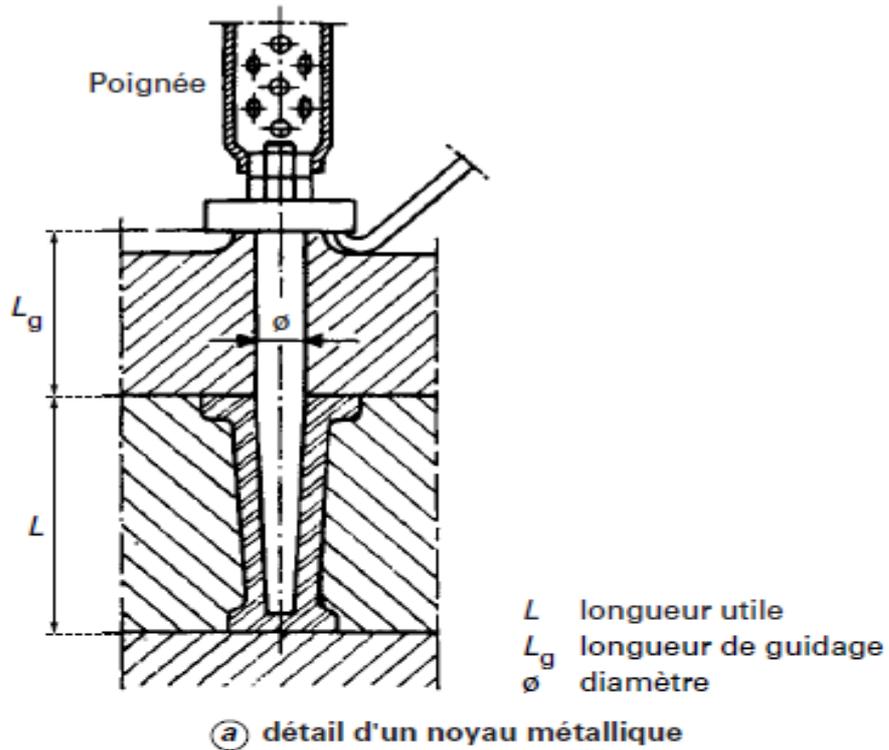


Figure III.1 Détermination des dimensions d'un noyau [15].

En moulage coquille, il est possible de réaliser des avant-trous de faibles diamètres. On admet comme limites de longueur de guidage des valeurs maximales notées dans le tableau III.1.

Tableau III.1. Longueur de guidage selon le diamètre des avant-trous, pour le moulage en coquille [15].

Diamètre	Longueur de guidage
$\varnothing \leq 4 \text{ mm}$	2 \varnothing
$4 < \varnothing \leq 6 \text{ mm}$	4 \varnothing
$6 < \varnothing \leq 12 \text{ mm}$	6 \varnothing
$12 < \varnothing \leq 25 \text{ mm}$	8 \varnothing
$\varnothing > 25 \text{ mm}$	10 à 12 \varnothing

On peut se reporter également à l'abaque de la figure III.1.

Les tolérances dimensionnelles sont fonction de la taille de la pièce, de sa complexité, du nombre de joints de moulage (assemblage de pièces moulantes) et également de la composition de l'alliage (serrage de la pièce sur le moule, dû au plus ou moins grand retrait à l'état solide). Il en résulte des frottements au démoulage qui usent les noyaux. Par ailleurs, le sablage du moule et l'usage de papiers abrasifs, pour éliminer le poteyage pour le refaire, contribuent à user les moules. Ces pratiques sont remplacées par les techniques cryogéniques (glace ou billes de CO₂).

Les parties (guidages) de noyaux ou broches subissent des usures, ce qui peut provoquer des décalages angulaires de ces éléments de moule et des écarts de tolérances.

Les moules de grande série sont contrôlés par prélèvement régulier de pièces qui subissent un contrôle métrologique complet ce qui permet de suivre l'usure des moules.

III.1.3.Règles de conception et d'utilisation

-Si le moule est destiné à produire de très grandes séries de pièces, les parties moulantes les plus sensibles à l'usure et aux déformations doivent pouvoir être changées facilement au moindre coût. Dans ce cas, les parties moulantes ou « mises » sont insérées dans une carcasse.

-Les différentes parties du moule (chapes et tiroirs) doivent pouvoir être désolidarisées de la machine rapidement.

- Choisir les épaisseurs de la coquille en tenant compte du volume de la pièce (si celui-ci est faible, il sera difficile d'atteindre un régime stable sans avoir recours à des chauffages additionnels), des risques de déformation dans le cas de grandes pièces, et des temps de remise en régime après un arrêt de production. Il est plutôt favorable en général d'avoir un moule dont les épaisseurs suivent le profil de la pièce.

Cependant, dans le cas de coquilles à régime thermique naturel, les échanges thermiques sont contrôlés pour l'essentiel aux passages pièce-coquille et coquille-atmosphère [11]. Lorsque l'on désire modifier la température ou la cadence, c'est au niveau de la surface extérieure qu'il faut agir. Pour essayer de diriger la solidification, on prévoira par exemple des épaisseurs plus fortes aux endroits où l'on veut évacuer rapidement la chaleur, et des épaisseurs plus faibles aux endroits de dernière solidification, masselottes par exemple.

Les règles de base suivantes sont à respecter :

- Concevoir et dimensionner les systèmes de remplissage, en utilisant les manuels ou logiciels spécialisés.

Les systèmes de coulées doivent permettre de répartir correctement le métal et d'éviter les entraînements d'air générateurs d'oxydes.

- Concevoir et dimensionner les masselottes.

- Il est possible d'améliorer l'efficacité des masselottes tout en diminuant leur volume en prévoyant une coupure thermique ou une isolation.

L'évacuation de l'air du moule est assurée par des tirées d'air de faible épaisseur (0,1 à 0,2 mm) usinées dans les joints de moulage ou de construction et, pour les parties de moules en retrait, par des goupilles d'air.

- Prévoir la possibilité de montage d'un ou deux thermocouples à des emplacements judicieusement choisis pour enregistrer le régime thermique du moule lors de sa mise au point. Cela permet de bien caler le régime thermique stabilisé en fonction de la cadence de coulée. Les données recueillies servent à valider les résultats de simulation numérique.

- Définir la « carte » de poteyages des différentes parties de l'empreinte.

- La nature et les conditions d'application des poteyages constituent un point clef pour la qualité des pièces.

Les poteyages ont pour rôle de :

- protéger le moule contre l'agressivité des alliages d'aluminium vis-à-vis des matériaux du moule (dissolution du fer) ;

- favoriser la venue des pièces, et régler ou corriger les échanges thermiques lors de la solidification. La nature du poteyage et l'épaisseur de la couche appliquée interviennent en premier ;

- conférer à la pièce de bons états de surface. La granulométrie de la charge réfractaire constituant le poteyage est variable selon les produits proposés.

Le choix des poteyages et les conditions d'application sont affaire d'expérience et il existe sur le marché une grande variété de produits très élaborés. Des poteyages spécifiques, appliqués en premier sur l'empreinte assurent une bonne adhérence de ceux appliqués ultérieurement (couche dite d'accrochage).

III.1.4. Microstructure obtenue

Les microstructures des différentes zones du piston AS12 fabriqué par coulée par gravité sont présentées sur la Figure. III.2. Cela montre que les microstructures dans les deux zones se composent de des particules de silicium primaire et de structures eutectiques. Et il n'y a presque pas de différence dans les microstructures entre ces deux zones (la tête et la jupe du piston) et on a comme fractions volumiques de silicium primaire dans le piston à la jupe 15.2% et 17.6% à la tête.

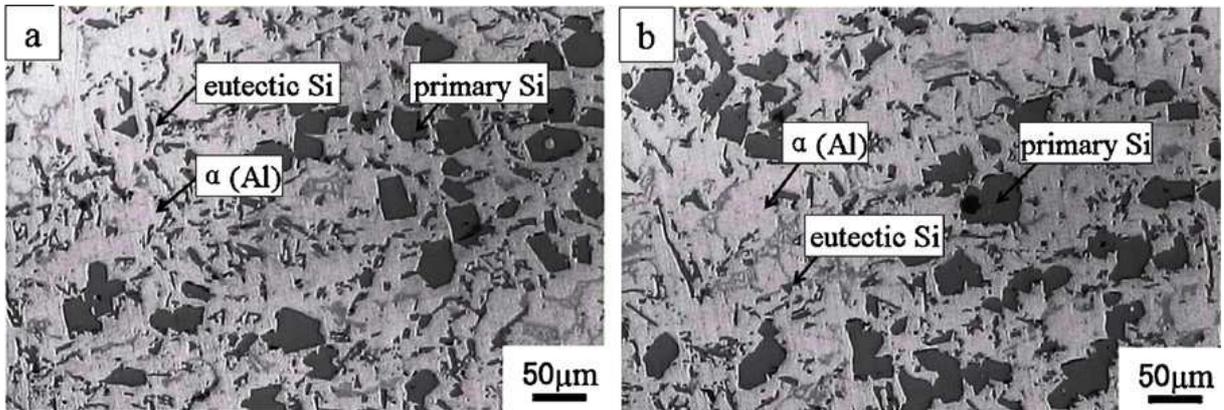


Figure III .2 Microstructure des différentes zones d'un piston fabriqué par coulée par gravité a) jupe de piston b) tête de piston (AS12) [14].

III.2. Moulage avec effet de compaction (Squeeze casting)

Ce procédé est connu sous diverses appellations comme par exemple « moulage-forgeage » ou « forgeage liquide ». Le terme Squeeze casting reste cependant le plus répandu.

III.2.1.Principe

Le procédé consiste à appliquer une pression sur le métal liquide après remplissage de l'empreinte jusqu'à solidification complète.

L'idée de base est d'éliminer les retassures en les empêchant de se former. On distingue deux variantes de ce procédé :

- le Squeeze casting direct ;
- le Squeeze casting indirect.

- Squeeze casting direct

Le principe est décrit à la figure III.3. L'alliage est coulé à découvert dans la partie inférieure du moule. Le poinçon, en venant fermer le moule, provoque le refoulement du métal dans l'empreinte et conforme ainsi la pièce. Une pression importante, qui peut varier entre 50 et 100 MPa, est appliquée pendant la solidification de l'alliage par le poinçon. Pour maintenir les épaisseurs de la pièce dans des tolérances acceptables, le dosage de la quantité de métal à verser doit être très précis (si possible $\pm 1\%$).

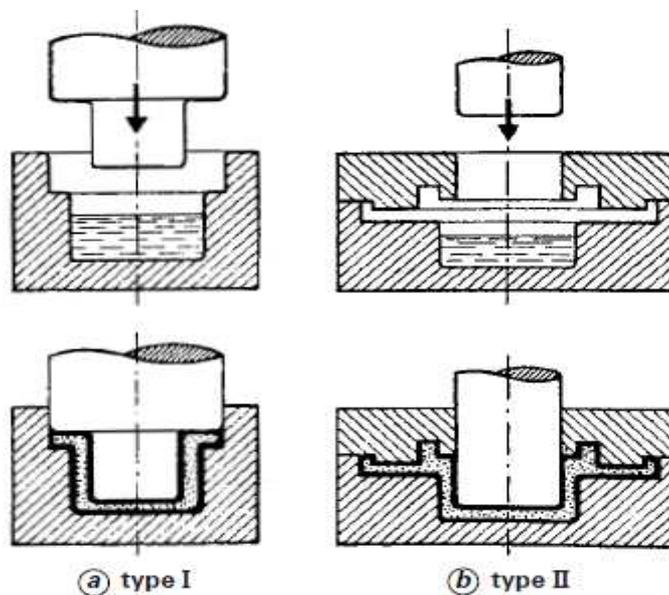


Figure III.3 Principe du Squeeze casting direct [13].

- Squeeze casting indirect

Le principe est décrit à la figure III.4. Il s'agit en fait d'une variante du moulage sous pression, où l'on recherche un remplissage lent pour éviter les turbulences. On utilise un moule fermé que l'on remplit au moyen d'un système de canaux et d'attaques. Le remplissage et l'application de la pression sont assurés par un piston et un conteneur. Leur disposition peut être soit horizontale, soit verticale.

Le remplissage se fait avec des vitesses de piston faibles, de l'ordre de 0,015 à 0,05 m/s. Les canaux et les attaques doivent avoir un module de refroidissement suffisant, de manière à rester liquide suffisamment longtemps pour que la pression puisse être transmise pendant la solidification et compenser le retrait volumétrique.

Les précisions dimensionnelles sont équivalentes à celles obtenues en coulée sous pression.

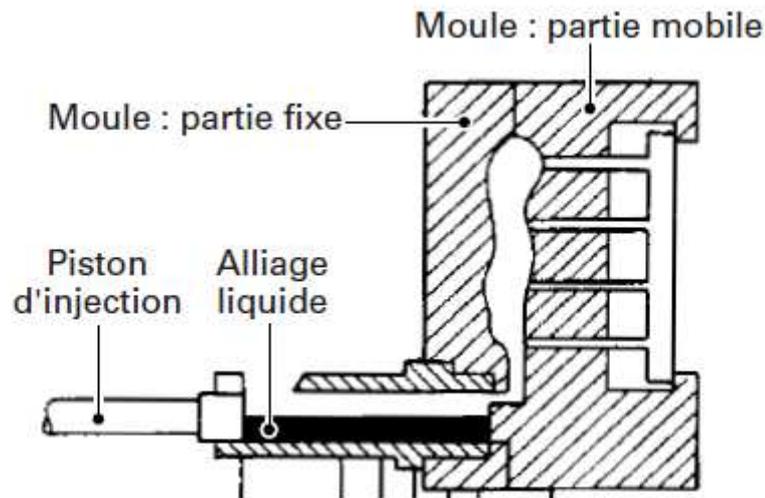


Figure III.4 Principe de Squeeze casting indirect [13].

III.2.2. Caractéristiques principales du procédé

Cette technique de moulage permet d'obtenir des pièces précises, relativement massives, avec des alliages pouvant subir un traitement thermique de type T4, T6 ou T7 sans apparition du phénomène de cloquage caractéristique de la sous pression conventionnelle.

- Par rapport à la coulée en coquille gravité, il apporte :
 - ✓ Une meilleure précision dimensionnelle ;
 - ✓ Une diminution des usinages ;
 - ✓ Une augmentation de la limite d'endurance du fait d'une meilleure compacité et de l'excellent état de surface.
- Par rapport à la coulée sous pression : il offre la possibilité :
 - ✓ De faire des traitements thermiques complets en utilisant des alliages comme les AISi7Mg 0,3 ou AISi7Mg0,6 ;
 - ✓ De couler des pièces d'épaisseurs moyennes à forte (8 à 25 mm) tout en conservant une excellente compacité.

Le maintien en contact du métal en cours de solidification avec l'outillage métallique permet d'augmenter les vitesses de refroidissement.

Les formules qui suivent, traduites par les graphiques de la figure III.5 donnent une comparaison entre les temps de solidification t_s du moulage en coquille par gravité et la coulée en Squeeze casting, en fonction du module de refroidissement :

Squeeze casting $t_s = 41,2 \left(\frac{V}{S} \right)^2$

Gravité $t_s = 21,2 \left(\frac{V}{S} \right)^2$

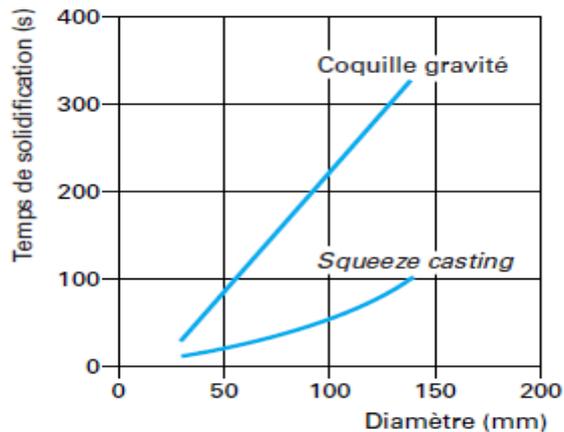


Figure III.5 Comparaison des temps de solidification de cylindres coulés avec les procédés coquille par gravité et Squeeze casting [15].

L'augmentation de la vitesse de refroidissement, qui se traduit par une augmentation du DAS (Dendrite Arm Spacing) et une meilleure compacité, contribue à l'amélioration des propriétés mécaniques : charge de rupture R_m , allongements à rupture ainsi que la limite d'endurance. Ces améliorations sont mises en évidence dans le tableau III.2.

Le procédé est recommandé pour des pièces de petite taille et relativement massives, comme par exemple des corps de pompe ou des pivots de moyeu pour automobiles. Il est impératif de prévoir un tracé de pièce avec des modules progressifs pour que la pression puisse être transmise pendant la solidification à travers des chenaux d'alimentation de préférence à section carrée. Il est possible, comme dans d'autres procédés, de diriger la solidification en adaptant des systèmes de refroidissements locaux (circuits ou puits).

Tableau III.2 Exemple de caractéristiques mécaniques obtenues dans des pièces industrielles coulées en Squeeze casting direct [15].

Alliage	État	R _m (MPa)	R _{p0.2} (MPa)	A (%)	Q indice de qualité (MPa)	Dureté HB	Fatigue (limite d'endurance à 5* 10 ⁷ cycle)	Observation
AlSi7Mg 0.3	F	210	100	11		60		Pièces automobile diverse de 12 à 30mm d'épaisseur
	T6	329 à 334	245 à 258	12.2 à 13.6	492 à 499	107		
	T4	240	100	18			130	
	T5	260	161	6		86		
AlSi7Mg 0.6	T6	340	270	8			140	
	T5	267	179	4.3				
AlSi7Mg 0.6	T6	301 à 330	224 à 253	10.8 à 13.9	456 à 501			Pivot de moyeu squeeze casting à plan de joint vertical

III.2.3. Caractéristiques des machines

a) Pour le Squeeze casting direct

On utilise des presses verticales, le plan de joint des moules étant horizontal. Les machines utilisées industriellement sont des adaptations de presses à forger. Le métal est versé directement dans la partie inférieure du moule.

b) Pour le Squeeze casting indirect

Les machines sont ou dérivées ou semblables à celles utilisées en fonderie sous pression, sous réserve qu'elles puissent assurer un remplissage lent et appliquer une forte pression (pouvant atteindre 200 MPa) sur le métal en cours de solidification. On distingue :

— les presses verticales, avec conteneur vertical dans lequel on vient verser le métal liquide ;

— les machines horizontales à injection verticale. Le conteneur de ces machines est vertical et basculant pour en faciliter le remplissage et éviter les turbulences. Les machines décrites à la figure 33 ont été conçues spécialement pour le procédé.

— les machines horizontales à injection horizontale semblables aux machines sous pression classiques, avec groupe d'injection adapté et pilotage dit en boucle fermée.

III.2.4. Alliages utilisés

Les alliages à intervalle de solidification moyen ou faible conviennent bien à ce procédé. Les alliages à intervalle de solidification élevé, donc sensibles à la crique, ne sont pratiquement pas utilisés.

Le tableau III.3 indique les alliages les plus employés, et leur champ d'applications.

Tableau III.3. Applications des principaux alliages utilisés en Squeezecasting [53].

Alliage utilisé en squeeze casting indirect	Propriétés recherchées
AlSi7Mg0.3 AlSi7Mg0.6 AlSi10Mg	Pièces à hautes caractéristiques mécaniques Ductilité importante (T6 et T7) Très bonne tenue à la corrosion Utilisation jusqu'à 150°C
AlSi12CuNiMg AlSi17Cu4Mg	Résistance à l'usure et au frottement Travail à température élevée Bonne stabilité dimensionnelle (T5)
AlSi9Cu3 AlSi12Cu2	Pièces simples ne nécessitent pas de ductilité Résistance mécanique très élevée (état T6) Pièces étanches

III.2.5. Possibilités spécifiques: fabrication de pièces avec renfort ou insertion

a) Renforts

Il est possible d'imprégner directement une préforme en fibres céramiques (type silico-alumineux par exemple) pendant l'opération de coulée. Cette technologie est appliquée, par exemple, pour renforcer localement certains types de pistons de moteurs Diesel suralimentés (figure III.6).

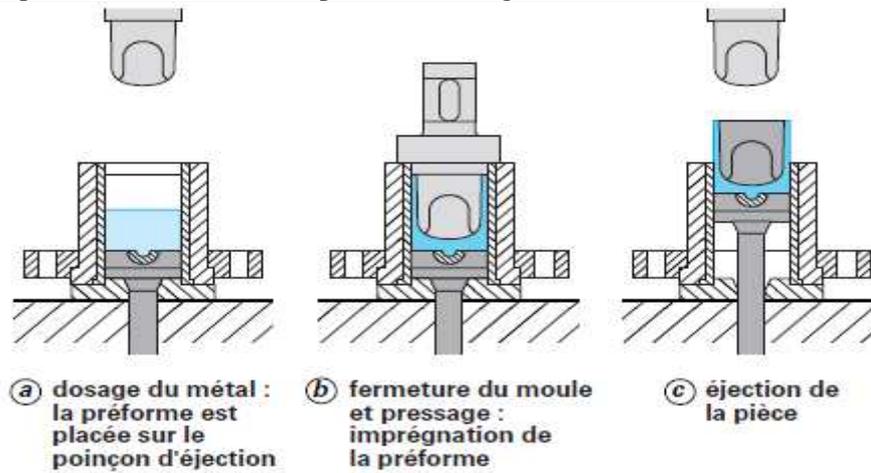


Figure III. 6Coulée de piston avec préforme en Squeeze casting direct [15].

b) Insertion

Un insert métallique ou une préforme céramique peuvent être placés dans le moule et insérées directement. Une pression très élevée assure un meilleur contact entre l'insert et la pièce en aluminium. Parmi les applications, on peut citer l'insertion d'un fond en aluminium sur des récipients alimentaires en acier inoxydable.

III.2.6.Limites du procédé

a) Pour le Squeeze casting direct

Ce procédé ne permet pas de réaliser des pièces de formes compliquées, surtout lorsqu'elles comportent des parois verticales.

Par ailleurs, on doit toujours doser le métal en excès pour obtenir une pièce complète. L'excédent de métal doit être absorbé par des dégorgeoirs ou bien reporté sur des surfaces usinées. Il est recommandé d'utiliser des alliages à intervalle de solidification moyen comme par exemple l'AlSi7Mg, dont la fraction eutectique n'est pas trop importante, de manière à éviter les ségrégations.

Le remplissage de la partie inférieure doit être réalisé avec le plus grand soin pour éviter d'introduire des peaux d'oxydes qui peuvent se retrouver au sein de la pièce ou en surface.

b) Pour le Squeeze casting indirect

Le procédé ne convient qu'à des pièces dont le tracé est adapté aux contraintes de solidification. On peut observer dans les pièces des zones de ségrégation d'eutectique ternaire Al-Si-Mg qui a été refoulé à travers le réseau dendritique dans les zones de fin de solidification (figure III.7). Cet eutectique, plus fragile que la matrice, peut affecter la résilience, mais pas globalement la résistance mécanique de la pièce, surtout si elle est livrée à l'état T6.

Il est recommandé de tester mécaniquement les pièces et d'éviter d'en extraire des éprouvettes, car les résultats d'essais mécaniques risquent d'être affectés si une zone enrichie en eutectique se trouve au milieu de la section d'essai.

Dans beaucoup de cas, le coût des pièces est plus élevé qu'en coquille gravité. Cela est lié aux facteurs suivants :

- investissements en matériels élevés, comme en sous pression ;
- coût des outillages élevés ;
- augmentation des cadences par multiplication des outillages limitée. Pas de carrousel possible (ou très limité) ;
- contraintes de tracé des pièces ;
- tenue des outillages limitée à cause des températures de coulée élevées ;
- découpage des attaques massives plus difficile qu'en sous pression.

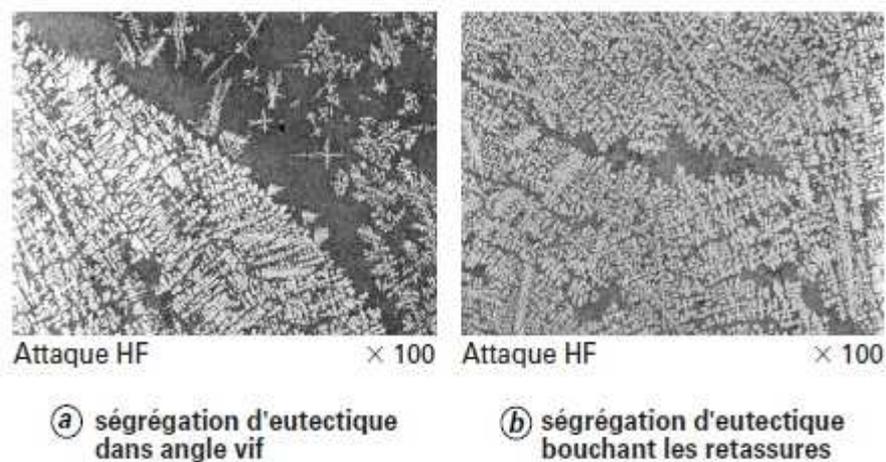


Figure III.7 Squeeze casting indirect : ségrégation d'eutectique dans une pièce coulée en AlSi10Mg [15].

Chapitre IV. Techniques expérimentales

Ce présent chapitre contient les principes ainsi que les modes opératoires des techniques expérimentales utilisées durant ce travail.

IV.1.Composition chimique de l'alliage AS12

La composition de l'AS12 est illustrée dans le tableau IV.1.

Tableau .IV.1 Composition chimique de l'alliage AS12 [2].

Élément Chimique	Si	Cu	Mg	Ni	Zn	Mn	Fe
%	12.02	1	1.2	1	0.15	0.1	0.7

IV.2.préparation des échantillons

Avant de commencer notre travail expérimental, on a découpé des échantillons de forme cubique dimension 10 x 10 x 10 mm³ de différentes zones (surface et profil) à partir d'un piston Renault DCI. Le découpage était avec une scie à métaux manuelle tout en lubrifiant avec de l'eau pour éviter le chauffage de la pièce susceptible de changer la microstructure de nos échantillons.

IV.3.Observation micrographique

VI.3.1.Enrobage

L'enrobage se fait pour faciliter le polissage et l'observation par la microscopie. Il consiste à mettre les échantillons dans des petits moules puis de remplir ces moules par une résine polymère qui après solidification piège l'échantillon. Nous avons utilisé l'enrobage à froid pour éviter toutes transformations et changements structuraux.

VI.3.2.Polissages

Le polissage a pour but principal l'obtention d'une surface plane et la qualité de Surface miroir avec une polisseuse (voir figure IV.1). Cette opération de polissage est effectuée en deux étapes :

- La première consiste en un polissage grossier de la surface à l'aide de papiers recouverts de poudre abrasive de granulométrie de 400 à 1200 µm en utilisant l'eau comme lubrifiant. L'échantillon est rincé à l'eau à chaque changement de papier pour éviter que des particules de grand diamètre n'affectent le stade de polissage à plus faible granulométrie. Il faut aussi effectuer une rotation de 90° pour diminuer les stries.
-
- La seconde étape est effectuée par une polisseuse de finition sur un papier feutre avec une solution d'alumine pour la lubrification. Avant l'attaque chimique, nous

Chapitre IV. Techniques expérimentales

avons vérifié au microscope optique que les échantillons ne possèdent aucune rayure pour pouvoir finalement accéder à l'attaque chimique.



Figure IV.1 Polisseuse mécanique de type hitecheurope, à vitesse maximum de 600 tr/min. (ENP, laboratoire de métallurgie).

VI.3.3.L'attaque chimique

Après le rinçage et le séchage des échantillons, on passe à l'attaque chimique pour l'observation microscopique en utilisant une solution 0.5 % HF [16] avec la composition suivante :

- 30 ml d'acide nitrique (HNO₃) ;
- 60mlacidechloridrique (HCl) ;
- 5 ml acide fluoridrique (HF) ;
- 5 ml d'eau(H₂O).

La durée d'attaque est de 15 à 20 s à la température ordinaire. Pour la préparation de la solution d'attaque, l'utilisation des acides très concentrés est très dangereuse, et nécessite des précautions comme utiliser des moyens de protections et travailler dans un espace aéré.

VI.3.4.Observation microscopique

Le microscope optique est un instrument d'optique muni d'un objectif et d'un oculaire qui permet de grossir l'image d'un objet de petites dimensions (ce qui caractérise son grossissement) et de séparer les détails de cette image (et son pouvoir de résolution) afin qu'il soit observable par l'œil humain. Il est utilisé en métallurgie et en métallographie pour examiner la structure d'un métal ou d'un alliage.

Chapitre IV. Techniques expérimentales

Pour cette observation on a utilisé un microscope optique de type OPTIKA muni d'un logiciel d'analyse « OPTIKA View » qui permet de lire, de traiter et de sauvegarder les images sur le micro-ordinateur (figure IV.2).



Figure IV.2 Microscope optique de type OPTIKA. (ENP, laboratoire de métallurgie).

IV.4. Analyse quantitative

Les micrographies issues de l'observation microscopique sont traitées au moyen d'un logiciel de traitement d'image « *image J* » qui permet de calculer :

- La taille moyenne des grains D_{moy} et leur fraction surfacique ;
- Les différents paramètres de forme pour les dendrites (longueur, largeur, périmètre, circularité, élongation et le logarithme de longueur sur la largeur) ;

Les résultats sont donnés sous forme d'un tableau de valeurs qui nous permet de caractériser notre alliage.

Une capture écran du logiciel *image J* traitant une image est représentée sur la figure IV.3.

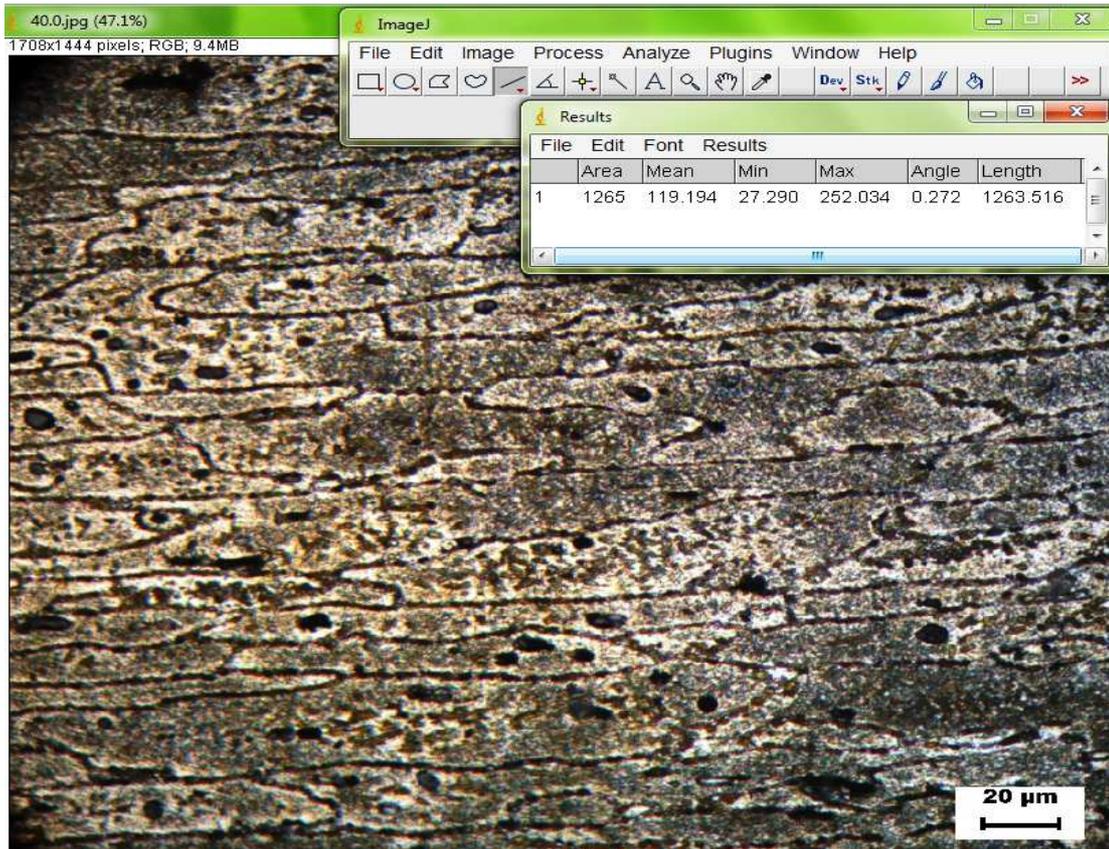


Figure IV.3 Capture écran du logiciel image-J traitant une image.

La procédure du calcul passe par les étapes suivantes :

- Correction et réglage des images à l'aide du *Microsoft Office Picture Manager*.
- Calibrage du logiciel *image-J* par l'option *set scale*.
- Calcul de :
 - ✓ Surface (nombre total de pixels inclus dans la particule choisit).
 - ✓ Périmètre en pixels.
 - ✓ Longueur X : nombre des interceptes de la dendrite selon l'horizontale.
 - ✓ Largeur Y : nombre des interceptes de la dendrite selon la verticale.
 - ✓ $\text{Log}_{10}(X/Y)$: le logarithme décimal de la largeur sur la longueur en %.
 - ✓ Circularité en % $C = \frac{4\pi * \text{surface}}{\text{périmètre}^2} * 100$.
 - ✓ Elongation en % $E = \frac{|X-Y|}{X+Y}$.

IV.5. Essai de dureté

La dureté d'un matériau définit la résistance qu'oppose une surface de l'échantillon à la pénétration d'un corps plus dur, par exemple la bille ou la pointe d'un duromètre.

Les tests de dureté impliquent l'utilisation d'un pénétrateur dur, généralement en diamant, pressé verticalement à la surface de l'échantillon.

IV.5.1. Principe de l'essai de dureté Vickers (HV)

La mesure de dureté Vickers se fait avec une pointe pyramidale normalisée en diamant de base carrée et d'angle au sommet entre faces égal à 136° . L'empreinte a donc la forme d'un carré ; on mesure les deux diagonales d_1 et d_2 de ce carré à l'aide d'un appareil optique. On obtient la valeur d en effectuant la moyenne de d_1 et d_2 . C'est d qui sera utilisé pour le calcul de la dureté. La force et la durée de l'appui sont également normalisées.

$$HV = \frac{2F \cdot \sin\left(\frac{136}{2}\right)}{G \cdot d^2} \text{ en (Kgf/ mm}^2\text{)}.$$

F = Force appliquée [N]

d = Moyenne des diagonales de l'empreinte [mm]

g = Accélération terrestre. [m s^{-2}] (9.80665).

La figure IV.4 présente le principe de l'essai de dureté Vickers.

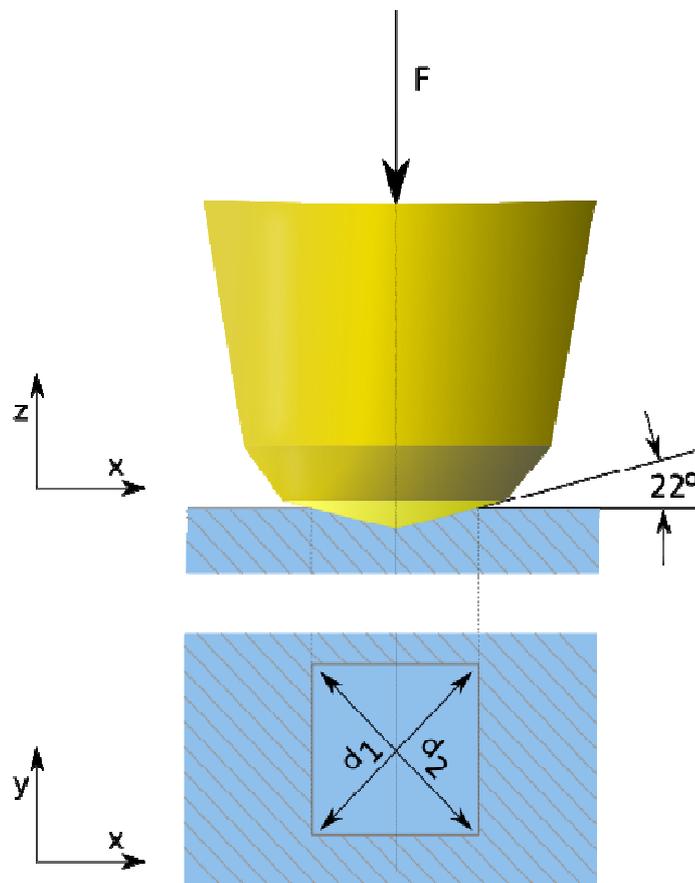


Figure IV.4 Principe de l'essai de dureté Vickers.

IV.5.2 .Essai de dureté

L'essai de dureté a été effectué à l'aide d'un duromètre de type *INNOVATEST NEXUS 7000*, présenté sur la figure IV.5. C'est un appareil qui permet de mesurer la dureté Rockwell, Vickers et Brinell. Il possède :

- Un système de mesure de haute qualité ;
- Un système numérique de pointe qui permet des lectures numériques directes, la mémorisation et la conversion à d'autre échelle de dureté ;
- Une gamme de charges d'essai variant de 1 Kgf à 250 Kgf.

Les échantillons doivent avoir une épaisseur suffisante afin que la charge appliquée ne les déforme pas, et une surface, dans la mesure du possible, non endommagée. Les tests de dureté ont été réalisés dans les conditions suivantes :

- Temps d'appui est de 10 secondes ;
- La force appliquée F est de 10 Kgf

La valeur finale HV relevée est la moyenne de trois mesures consécutives, sur différentes plages.



Figure IV.5Duromètre de type INNOVATEST NEXUS 7000.

IV.6.Essai de microdureté

Les essais de micro-dureté, de même principe que ceux de la dureté, ils permettent de définir les propriétés à l'intérieur des grains, la matrice, et les divers constituants.

Les mesures de la microdureté sont effectuées avec un microduromètre de type SHIMADZU HMV-M3, présenté sur la figure IV.6, à pénétration Vickers avec une charge $F = 100\text{g}$ pendant 10 s. La valeur finale est la moyenne de trois mesures.

Le microduromètre vise la zone souhaitée sur l'échantillon poli, puis le microscope permet de mesurer les diagonales de l'empreinte (en microns) et faire leurs moyennes. on peut avoir les valeurs de la microdureté directement par l'application de la relation suivante :

$$HV = 1854,4 * F/d_{2\text{moy}}$$



Figure IV.6Microduromètre de type SHIMADZU HMV-M3.

IV.7. Diffraction des rayons X

La diffractométrie de rayons X (DRX, on utilise aussi souvent l'abréviation anglaise XRD pour X-ray diffraction) est une technique d'analyse fondée sur la diffraction des rayons X sur la matière.

La diffraction n'ayant lieu que sur la matière cristalline, on parle aussi de radiocristallographie. Pour les matériaux non-cristallins, on parle de diffusion. La diffraction fait partie des méthodes de diffusion élastique.

L'appareil de mesure s'appelle un diffractomètre. Les données collectées forment le diagramme de diffraction ou diffractogramme.

- Principes de l'identification des phases

L'idée d'utiliser la diffraction des rayons X pour identifier une phase fut développée au début du XXe siècle de manière indépendante par Albert W. Hull en 1919 d'une part, et par Peter Debye et Paul Scherrer d'autre part.

Une poudre formée d'une phase cristalline donnée va toujours donner lieu à des pics de diffraction dans les mêmes directions, suivant un certain angle incident, pour un certain rayonnement incident (rayon X = $0,5 \leq \lambda \leq 2 \text{ \AA}$), afin de satisfaire la loi de Bragg. Les intensités relatives des pics de diffraction restent à peu près constantes d'une mesure d'échantillon à une autre. Ce diagramme de diffraction forme ainsi une véritable signature de la phase cristalline. Il est donc possible de déterminer la nature de chaque phase cristalline au sein d'un mélange (mélange de poudre ou échantillon massif polyphasique), à condition d'avoir auparavant déterminé la signature de chaque phase.

Au final, c'est l'utilisateur qui détermine si un produit est présent ou pas : en raison des possibilités de confusion (plusieurs produits très différents pouvant avoir des signatures très proches), un algorithme automatisé ne peut pas prendre seul la décision. C'est en dernier ressort la compétence de l'utilisateur, son habileté et sa connaissance de l'échantillon qui interviennent.

Le diffractomètre utilisé dans cette étude est de type EXPERT-PRO (figure VI.7) disponible au sein de laboratoire du département de physique à l'université de Bejaia.



Figure VI.7 Diffractomètre EXPERT-PRO.

IV.8. fusion et trempe

Afin de pouvoir évaluer l'effet de la méthode de fabrication sur les caractéristiques de la pièce, on a pris des échantillons du piston, et on les a traités pour les utiliser comme des échantillons de comparaison.

La séquence de traitement est la suivante

a) La fusion

Chauffage de la pièce jusqu'à une température suffisante pour la fusion (pour l'AS12 la température doit être supérieure à 588°C),

b) La trempe

Refroidissement rapide dans l'air en versant le métal liquide dans un moule à une très grande conductivité thermique.

Le traitement de mise en solution est effectué dans un four à résistance électrique de type CARBOLITE CWF 1300 (figure IV.8).



Figure IV.8 Four à résistance électrique CARBOLITE CWF 1300(ENP, laboratoire de métallurgie.

Chapitre V. Résultats et interprétations

Chapitre V. Résultats et interprétation

Dans ce chapitre, nous allons présenter tous les résultats et tenter d'expliquer les résultats des différentes expériences effectuées le long de notre travail afin de caractériser l'alliage utilisé pour le piston.

V.1. Spectroscopie

Les résultats des analyses chimiques effectués au niveau de la BCL sont exposés dans le tableau V.1.

Tableau V.1. Analyses chimiques des échantillons, effectués au sein de laboratoire BCL.

Élément	Al	Si	Cu	Mg	Ni	Zn	Mn	Co
% massique (selon BCL)	Matrice	12.02	2.9	1.14	0.44	0.32	0.16	0.22

Si on compare ce tableau avec l'analyse théorique dans le tableau IV.1, on remarque l'absence du Fe dans le piston ce qui est étonnant vu que le fer constitue une impureté naturelle du silicium et de l'aluminium, mais il faut noter que pour les pièces qui travaillent sous une sollicitation mécanique la teneur du Fe doit être inférieure à 0.14% pour éviter la formation des composés intermétalliques durs responsables de la fragilisation de notre pièce voire la rupture.

La valeur de 2.9% de Cu peut être considérée comme une anomalie si on tient compte des résultats des expériences qui vont suivre .

Le Mn est utilisé pour augmenter la résistance à la corrosion, et malgré sa cherté le Ni est utilisé pour améliorer le comportement mécanique à chaud, mais pour les deux il ne faut pas dépasser une limite de 0.15% toujours à cause des composés intermétalliques.

Le Zn améliore surtout sur la ductilité en l'améliorant.

V.2. Observation microscopique

L'observation des échantillons après polissage et attaque chimique à l'aide du microscope optique est présentée sur les figures suivantes

V.2.1. Échantillon du piston

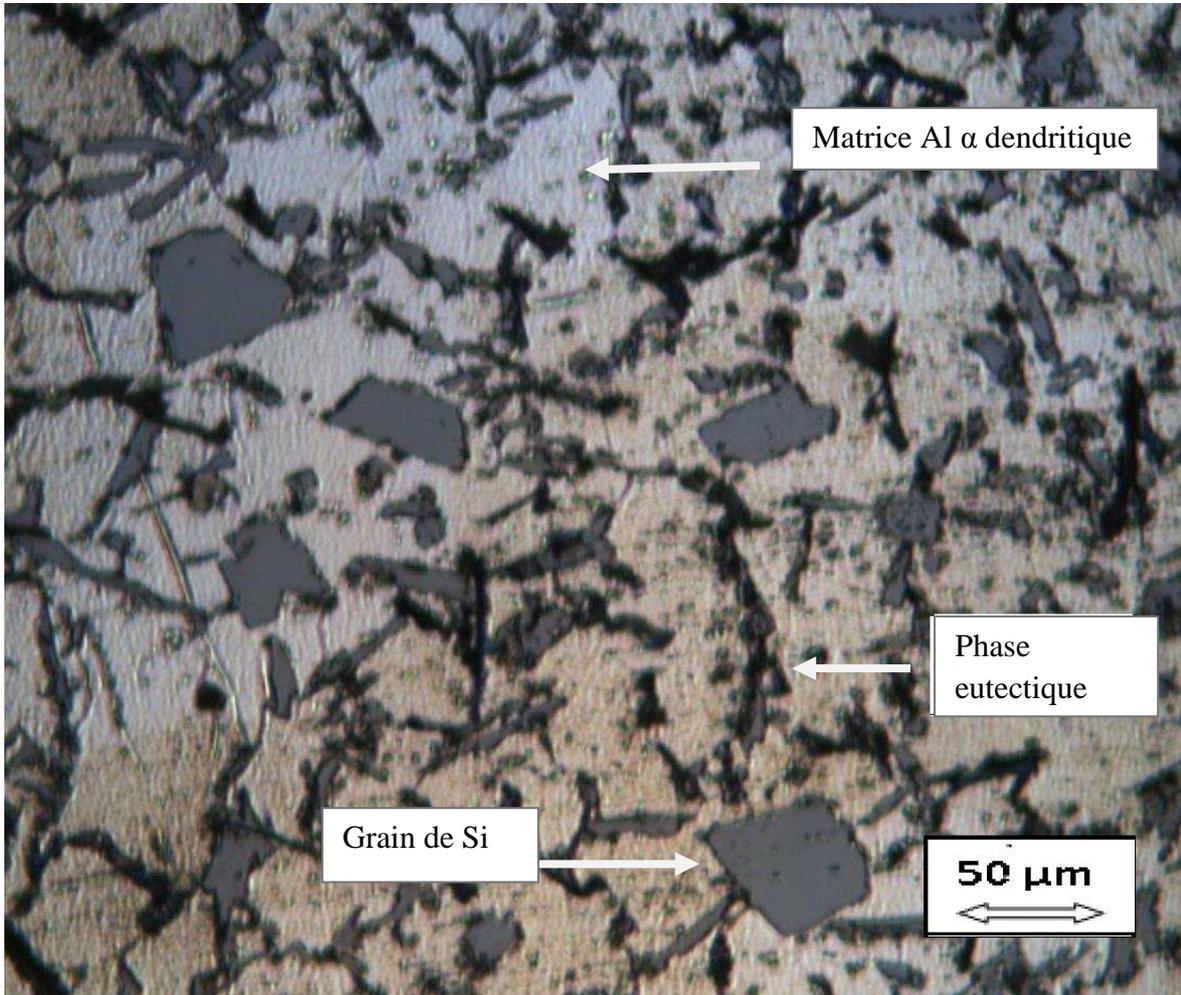


Figure V.1. Structure de l'alliage AS12 pour un échantillon de piston.

La microstructure de l'échantillon (figure V.1) présente un eutectique aciculaire de Si eutectique avec de nombreux cristaux libres du silicium primaire dans une matrice d'aluminium dendritique. La forme des dendrites aciculaires et la présence de précipités de silicium primaire montre que l'alliage n'a pas subi un traitement efficace d'affinage de grains à la poudre de sodium ou bien peut être pour éviter l'oxydation du métal à l'état liquide et la formation des porosités, qui est due à la réduction de la tension de surface de l'aluminium fondu facilite la nucléation des pores, et augmente également le volume des pores et leurs tailles[17].

V.2.1. Échantillon trempé

L'observation microscopique de l'échantillon trempé (figure V.2) révèle l'absence des grains de silicium primaire, et on constate aussi que la structure de Si eutectique est aussi aciculaire mais plus fine, tout ça est due à la cinétique rapide de refroidissement qui ne laisse pas le temps suffisant pour la croissance des dendrites et à la précipitation du silicium.

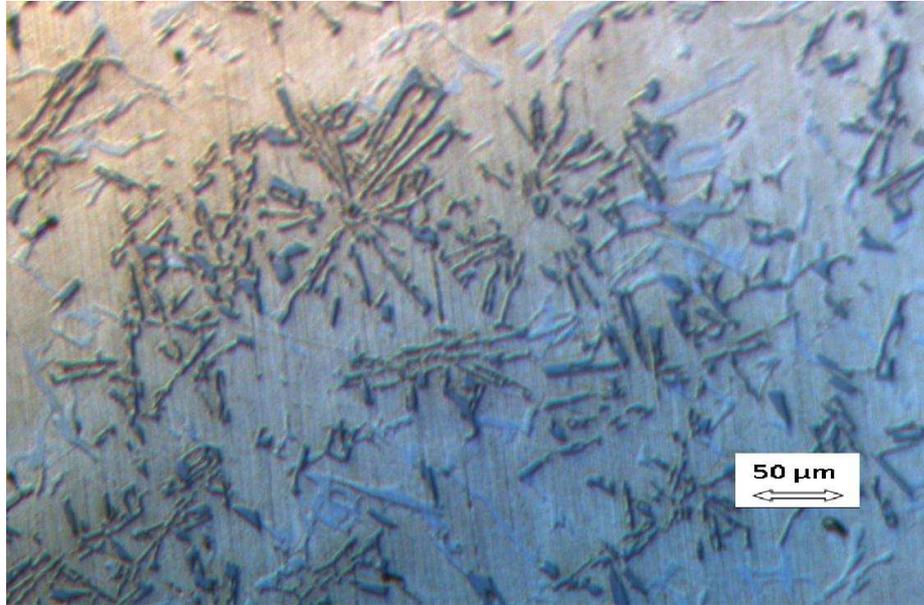


Figure V.2. Structure de l'alliage AS12 pour un échantillon trempé.

Les zones grises correspondent aux grains de silicium solidifiés lors de la trempe, chose expliquée par le diagramme d'équilibre Al-Si (figure II.1) dans la zone hypereutectique.

V.3. Analyse par diffraction des rayons X

La technique d'analyse par diffraction de rayons X repose sur l'interaction élastique d'un faisceau monochromatique de photons X avec la matière cristallisée. La diffraction résultante aboutit à l'obtention d'un diffractogramme et permet la détermination des distances réticulaires des plans de diffraction. La loi de Bragg définit la relation entre la longueur d'onde du faisceau incident (λ), la distance interréticulaire repéré par les indices de Miller (dhkl) et l'angle de diffraction (θ), l'entier naturel n représentant l'ordre de diffraction.

$$n \lambda = 2 d_{hkl} \sin(\theta)$$

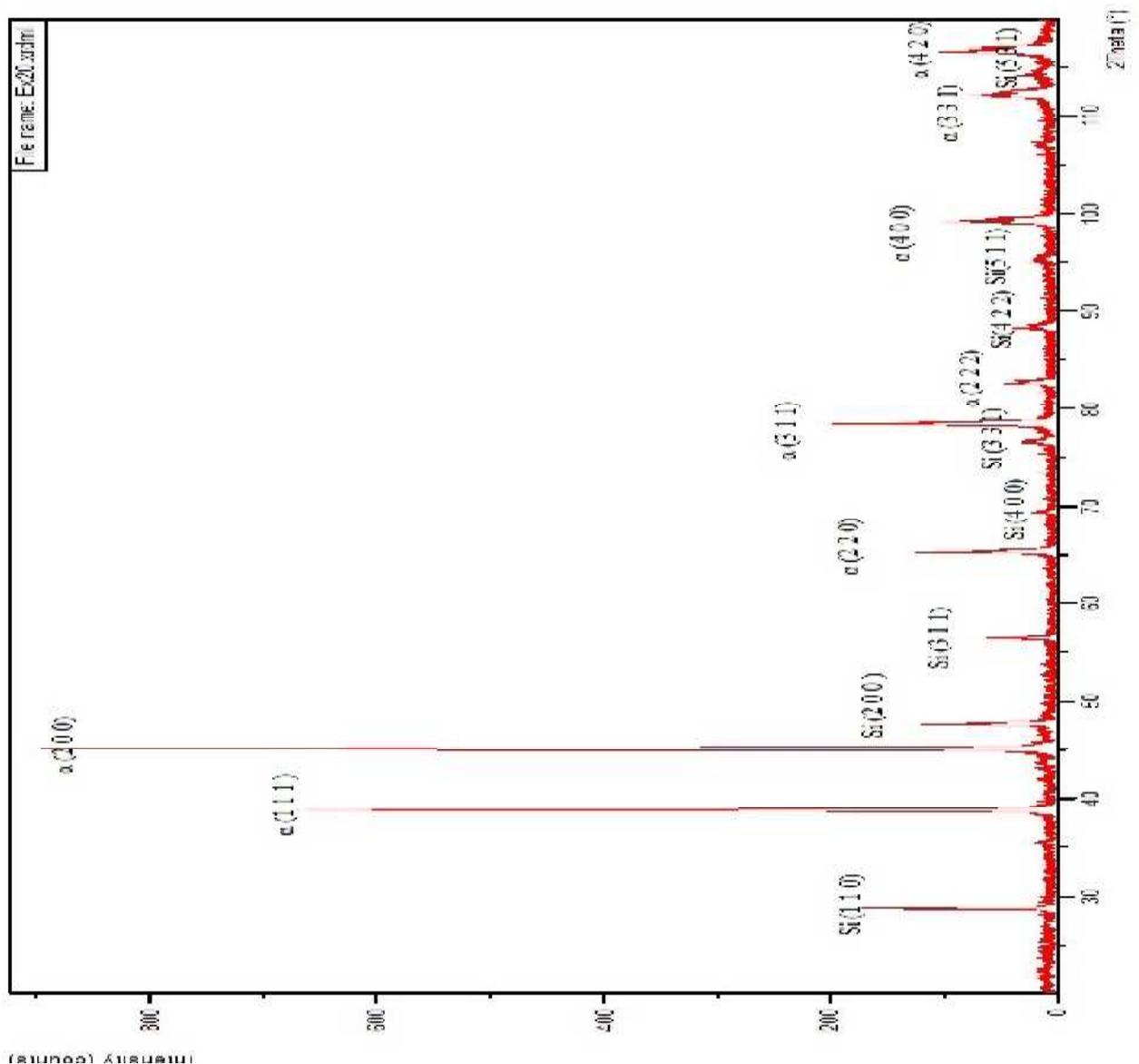


Figure V.3. spectre de diffraction des RX pour l'échantillon du piston.

Chapitre V. Résultats et interprétation

La source de rayon X est constituée d'un tube scellé à anticathode de cuivre ($\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$) couplé à un monochromateur arrière en graphite afin de filtrer le raie $K\beta$ du cuivre et éventuellement la fluorescence de l'échantillon.

Le spectre de diffraction des RX (figure V.3) pour notre échantillon a donné des résultats conformes avec l'hypothèse sur la composition chimique de l'alliage AS12.

Le tableau V.2 présente les étapes de calcul pour le dépouillement des rayons X :

Tableau V.2. tableau des calculs pour le dépouillement des RX.

2tetha	thêta	d	d ²	d ² /d _i ²		3d ² /d _i ²		k	k	l	a(Å)	
28,84615	14,42307	3,092576	9,564031	1		3.0	3	1	1	1	5,357	Si
38,84615	19,42307	2,316403	5,365723	1,78243	1	3,0	3	1	1	1	4,012	Al
45,38461	22,69230	1,99672	3,986890	2,39886	1,3	4,0	4	2	0	0	3,993	Al
47,88461	23,94230	1,898145	3,602957	2,65449	1,4	8.0	8	2	2	0	5,369	Si
56,53846	28,26923	1,626423	2,645253	3,61554	2,0	10.8	11	3	1	1	5,394	Si
65,38461	32,69230	1,426143	2,033884	4,70234	2,6	7,9	8	2	2	0	4,034	Al
69,61538	34,80769	1,349451	1,821019	5,25202	2,9	15.8	16	4	0	0	5,398	Si
76,73076	38,36538	1,241068	1,540250	6,20940	3,7	18.6	19	3	3	1	5,410	Si
78,65384	39,32692	1,215472	1,477373	6,47367	3,6	10,9	11	3	1	1	4,031	Al
82,69230	41,34615	1,16604	1,359667	7,03409	3,9	11,8	12	2	2	2	4,039	Al
88,46153	44,23076	1,104292	1,219461	7,84283	4,4	23.5	24	4	2	2	5,410	Si
95,38461	47,69230	1,041591	1,084911	8,81549	4,9	26.4	27	5	1	1	5,412	Si
99,23076	49,61538	1,011272	1,022672	9,35199	5,2	15,7	16	4	0	0	4,045	Al
112,3076	56,15384	0,927472	0,860204	11,1183	6,2	18,7	19	3	3	1	4,043	Al
114,6153	57,30769	0,915297	0,837769	11,4160	6,4	34.2	35	5	3	1	5,415	Si
116,9230	58,46153	0,903799	0,816854	11,7083	6,5	19,7	20	4	2	0	4,042	Al

Les résultats ont montré que l'échantillon est essentiellement biphasé.les deux phases détectées sont :

Chapitre V. Résultats et interprétation

La phase α de l'aluminium contenant une faible proportion de silicium (<1.6%).

Le silicium cristallin qui d'après le diagramme d'équilibre ne dissout que très peu d'aluminium.

L'aluminium se cristallise dans une structure cristalline cfc. Par contre, la structure du silicium est cubique du type. Les paramètres de maille déterminés expérimentalement sont de 5.39Å pour le silicium et de 4.03Å pour l'aluminium.

Compte tenu des valeurs théoriques des paramètres de mailles de l'aluminium et du silicium qui sont respectivement 4.01 et 5.43, et en les comparant à nos valeurs obtenus suite à nos expériences, on constate qu'il existe une petite différence entre les valeurs théoriques et expérimentales, chose qui peut être expliquée par la déformation du réseau dû à l'insertion des atomes de silicium dans le réseau cristallin de l'aluminium.

V.4. Analyse quantitative

Le logiciel de traitement d'image « *image J* » nous a permis de mieux caractériser notre alliage par le calcul de diamètre moyen des précipités de silicium primaire D_{moy} .

$$D_{\text{moy}} = 942.24 \mu\text{m}.$$

Et on a calculé la fraction surfacique des cristaux de silicium primaire qui est égale à 14%.

La structure des dendrites eutectiques joue un rôle majeur pour les propriétés mécaniques de l'alliage AS12, en particulier le DAS (espacement entre bras des dendrites) [16], pour cela on a comparé deux facteurs de forme pour les dendrites de l'échantillon de piston et les échantillons trempés :

- (i) L'élongation
- (ii) La circularité.

a) Facteur d'élongation

Également appelé facteur d'élançement, c'est le rapport de la différence entre la longueur et la largeur des particules sur leur somme. Les mesures donnent une moyenne de 0.4219 pour l'échantillon du piston contre 0,12842242 pour l'échantillon trempé ce qui tend à confirmer que les dendrites de l'échantillon du piston sont plus allongées que celles trempées, résultat qu'on peut expliquer par la cinétique de refroidissement.

Les figures V.4 et V.5 illustrent les histogrammes de circularité

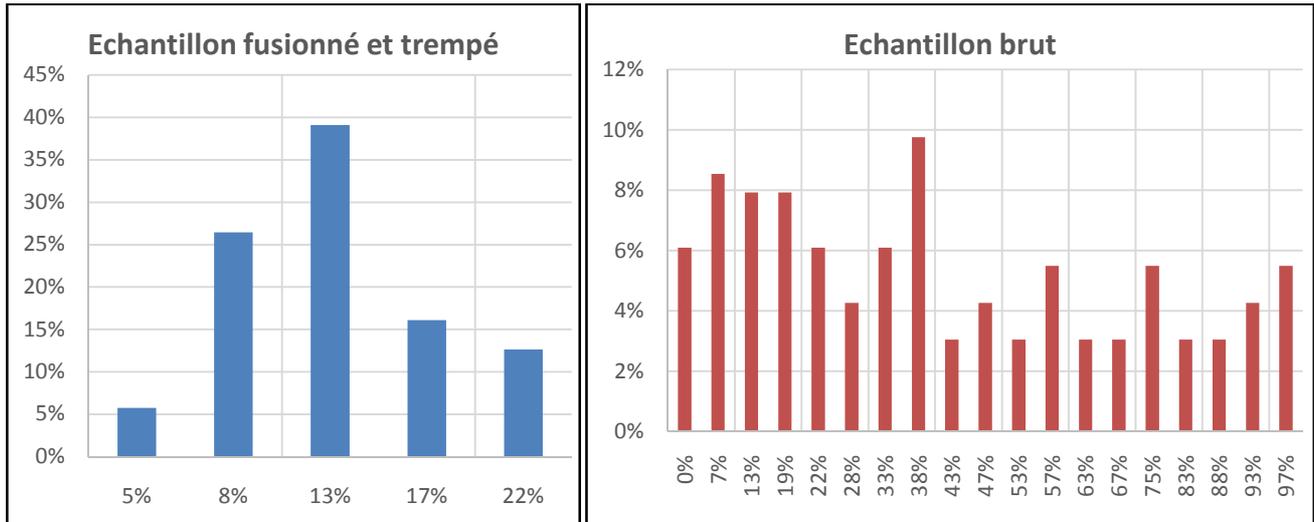


Figure V.4 Histogrammes de l'élongation.

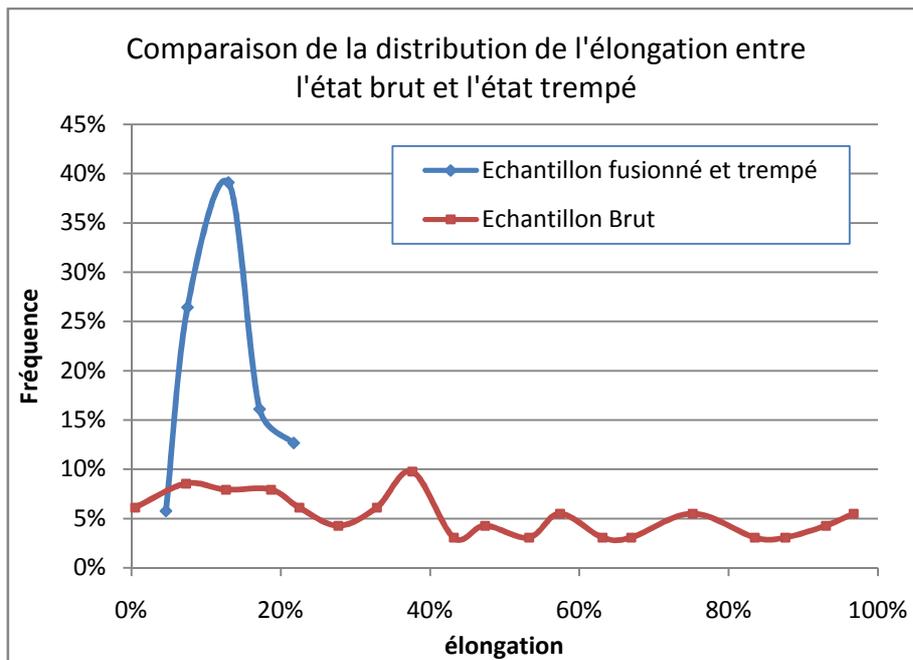


Figure V.5 comparaison de la répartition en nombre par coefficient d'élongation des dendrites eutectique.

b) Coefficient de circularité

Ce paramètre de forme nous donne une idée sur la forme géométrique des dendrites, le coefficient est proche de 1 pour une forme circulaire est de 0 pour une ellipse longue et aplatie.

Chapitre V. Résultats et interprétation

Les résultats présentés sous forme d'histogrammes des figures V.6 et V.7 illustrent l'évolution de la circularité des deux échantillons.

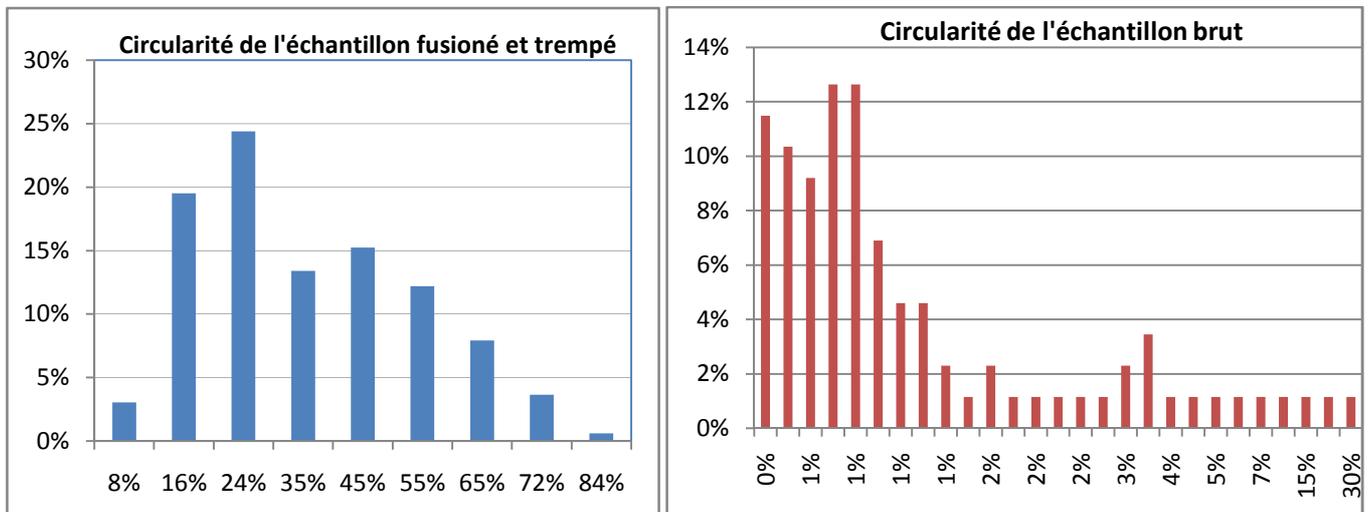


Figure V.6 : Histogrammes de la circularité.

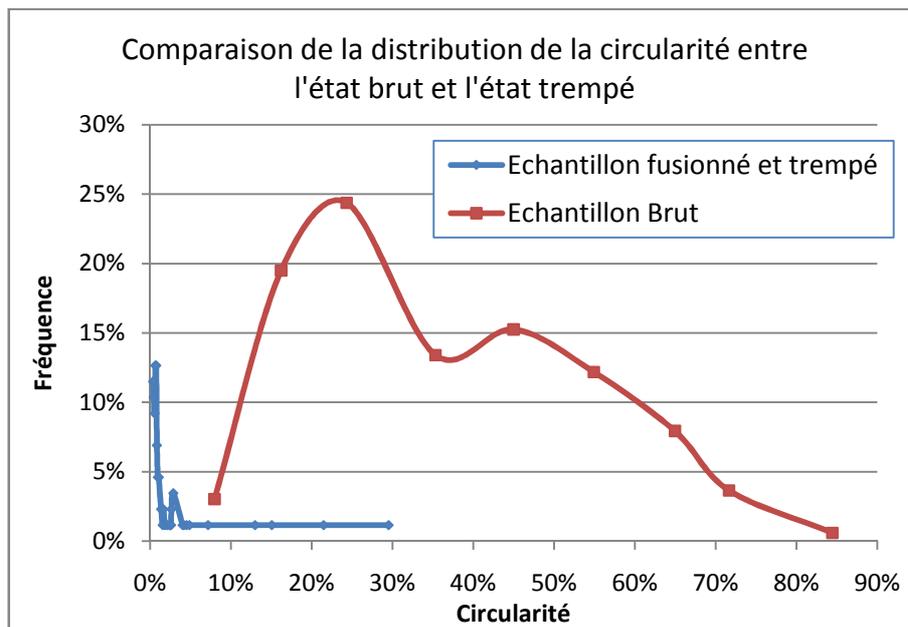


Figure V.7 comparaison de la répartition en nombre par coefficient de circularité des dendrites eutectique.

La mesure de la circularité et l'élongation en % des dendrites eutectiques nous a permis de donner la répartition sous forme d'histogramme. La superposition des courbes nous permet de comparer la morphologie des dendrites entre l'état brut et l'état fusionné et

Chapitre V. Résultats et interprétation

trempe. On voit clairement que la circularité à l'état trempé est limitée à 30% tandis qu'à l'état brut, la courbe de distribution continue jusqu'à 85%. Aussi, on note une chute du point maximal de 24% à l'état brut jusqu'à moins de 15% après trempe.

Concernant l'élongation, on remarque une grande différence entre les deux états. La courbe de l'échantillon brut possède une allure étalée et plate avec un point maximal ne dépassant 10%. A l'état fusionné et trempé, les valeurs de l'élongation subissent une chute jusqu'à 20% alors que le point maxima passe à 39%.

Les résultats d'analyse d'images reflètent la remarque de l'observation micrographique concernant la finesse des dendrites trempées par rapport aux dendrites du piston. En effet, à l'état trempé la cinétique de refroidissement ne permet pas aux dendrites eutectiques de croître et d'arriver à un stade avancé de croissance [19, 20].

V.5.Essai de dureté

Les résultats de la dureté moyenne sur la surface et le cœur du piston sont donnés dans le tableau V.3.

Tableau V.3 Résultat de dureté pour la charge 10Kg / 15 seconde.

Dureté superficielle	Tête de piston	95.4 HV _{10kg}
	Jupe de piston	95 HV _{10kg}
Dureté au niveau du cœur	Tête de piston	94.6 HV _{10kg}
	Jupe de piston	90.3 HV _{10kg}

Pour les échantillons de comparaison on a obtenu une dureté moyenne de 60.175 HV_{10 Kg}.

On remarque qu'il n'y a pas une grande différence de dureté entre la surface et le cœur du piston ce qui nous amène à dire que le traitement de surface appliqué sur le piston est destiné principalement à l'amélioration de la résistance à la corrosion et à l'usure.

La comparaison de dureté entre la tête et la jupe du piston nous aide à tirer une conclusion concernant la méthode de fabrication qui exclut la coulée sous méga pression destinée aux pistons renforcés par des fibres (oxyde d'aluminium ou carbure de silicium) au niveau de porte segments entraînant une différence remarquable de la dureté entre la tête et la jupe, or ce n'est pas le cas dans notre piston.

La valeur relativement faible de la dureté pour l'échantillon trempé peut être expliquée par la faible quantité des précipités de silicium primaire qui sont considérées comme des phases durcissantes de l'alliage Al-Si.

V.6. Essai de microdureté

Pour la microdureté les résultats obtenus sont représentés dans le tableau V.4

Tableau V.4 Résultats de la microdureté.

Essai 1	128.1 HV ₁₀
Essai 2	138.8 HV ₁₀
Essai 3	119.3 HV ₁₀
Essai 3	117.3 HV ₁₀

On peut expliquer la variation de la microdureté pendant les essais par la proportion des précipités de silicium primaire touchés par l’empreinte pour chaque essai, a cause des dimensions de l’empreinte qui sont trop importantes par rapport a la microstructure (figure.5) plus il ya de silicium primaire plus la microdureté sera grande.

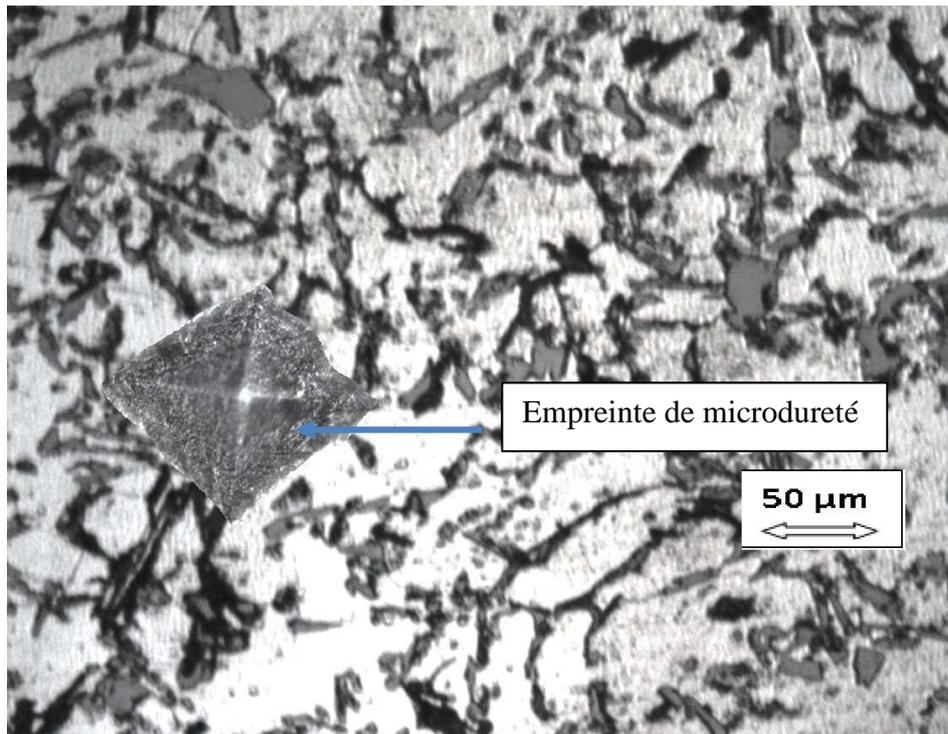


Figure V.8 Essai de microdureté.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail effectué durant ces deux derniers mois au niveau de notre laboratoire de génie métallurgique m'a permis de sortir avec les résultats suivants :

- Cette étude est la clé pour expliquer le comportement mécanique d'un matériau lors de son utilisation à travers sa microstructure et sa composition chimique.
- La méthode d'élaboration constitue un facteur majeur qui influe sur le comportement des matériaux lors de l'utilisation et peut être déterminé suite à l'ensemble des expériences illustrées dans ce travail.
- La première conclusion qu'on peut tirer est que le piston étudié est fabriqué d'un alliage d'aluminium-silicium de type AS12.
- La caractérisation de l'alliage d'aluminium-silicium de type AS12 effectué dans ce projet nous a révélé une microstructure et une composition chimique qui justifient l'utilisation abondante de cet alliage pour des pièces travaillantes sous des conditions sévères notamment en moteurs d'automobiles.
- La méthode d'élaboration de notre échantillon est la méthode de coulé par gravité qui est l'une des méthodes très répandues dans la fonderie notamment en Algérie.
- Il est recommandé de faire une étude comparative entre des pistons de même type mais avec différentes durées de travail afin d'évaluer le comportement de l'alliage après un certain temps et déterminer la durée de vie du piston.
- Il est à noter que le présent travail constitue une base pour des futures études dans le but de comparer entre des pistons fabriqués avec autres types d'alliages légers ou même des alliages ferreux.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] **J. CHAGETTE**. “Technique automobile” (pp.55-60). Dunod éditeurs. Paris (1968).
- [2] **L. BUTY et M. PETRICENKO**. “L’attelage mobile des moteurs rapides” (pp.13-68). édition technip (1964).
- [3] **CHRISTIAN CLOS**. “Technologie des moteurs alternatifs à combustion interne” Techniques de l’ingénieur, B2800, (année 1996).
- [4] **B. BARLAS**. “Étude du comportement et de l’endommagement en fatigue d’alliages d’aluminium de fonderie”. thèse de doctorat. école des mines de Paris (2004).
- [5] **MICHEL. GARAT**. “Propriétés des alliages d’aluminium de fonderie” techniques de l’ingénieur. M4675 (année 2012).
- [6] **S. Bensaada et D. FELIACHI**. “Technologie”. (pp.260-265). Office des publications universitaires. Alger (2007).
- [7] **KITTEL, C.** “Physique de l’état solide, 7^{ème} édition”. Dunod, 1998.
- [8] **BUTTI, K, PERLIN, J.** “The History of Terrestrial Uses of Solar Energy”. in Kreider J, Kreith F, Eds, Solar Energy Handbook, McGraw-Hill, New York (1981).
- [9] **BECHTAOUI. MOHEND**. “Influence du dégazage à l’état liquide et solide sur l’alliage d’aluminium AS13 moulé en coquille”. mémoire de fin d’étude. Enp. (2009).
- [10] **SUMANTH, YANCY W. RIDDLE, MAKHLOUF M. MAKHLOUF**. “Nucleation mechanism of the eutectic phases in aluminum–silicon hypoeutectic alloys”. Science direct. (2004).
- [11] **S. ELHADAD**. “Effect of trace elements on the microstructure and porosity formation in 319 type al-si-cu alloys” Thèse de doctorat. Université du Québec à Chicoutimi (2003).
- [12] **JEAN JACQUES. PERRIER**. “ Fusion des alliages d’aluminium” Techniques de l’ingénieur, fasc. M3635, (Année 2009).
- [13] **SYLVAIN. JACOB**. “Propriétés des alliages d’aluminium de fonderie” techniques de l’ingénieur. M4600 (année 2009).
- [14] **XIAOYU HUANG, CHANG MING LIU, XUNJIA, GUANGHUI LIU, FUQIANG LI**. “Aluminum alloy pistons reinforced with SiC fabricated by centrifugal casting”. Journal of Materials Processing Technology (année 2010).
- [15] **JEAN JACQUES. PERRIER. Et SYLVAIN. JACOB**. “Moulage des alliages d’aluminium”. techniques de l’ingénieur. M3637 (année 2004).
- [16] **ASM Handbook**. “vol.9 metallography & microstructures”. (p.265). (2004).

Références bibliographiques

[17] BUFFIERE J.Y, SAVELLI S, JOUNOU P.H., MAIRE E, FOUGERES R. “Experimental study of porosity and its relation to fatigue mechanisms of model Al-Si7-Mg0.3 cast Al alloys”. Mater.Sci. Eng.A, vol. 316, (pp 115-126). (2001).

[18] A.K. DAHLE, K. NOGITA, S.D. MCDONALD, C. DINNIS, L. LUC “Eutectic modification and microstructure development in Al-Si Alloys”. Materials Science and Engineering (2005).

[19] PHYLIBERT. J, VIGNES. A, BRECHET. Y, COMBRADE. P, “Métallurgie : Du Minerais Au Matériau”, Edition MASSON (1998).

[20] BARRALIS J, MAEDER G, “Précis de Métallurgie-AFNOR/NATHAN”. (2005).