République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Yahia Farés de Médéa

Faculté de Technologie

Département du Génie Mécanique

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention d'un Diplôme de Master en Génie Mécanique

Option: Ingénierie des matériaux et des surfaces

Thème

Caractérisation expérimentale et modélisation des propriétés mécaniques d'un alliage poreux à base d'étain-plomb lors de l'essai de traction uniaxiale.

Présenté par :

BOUCHENAFA Billel

ANNANE Billel

Proposé par :

Encadreur : Dr.BELHADJ Abd-Elmouneïm

Promotion : 2017/2018



REMERCIEMENTS

En Premier lieu, Je remercie **ALLAH,** le Tout Puissant pour m'avoir donné la volonté, la santé et le courage pour réaliser ce travail.

Je remercie infiniment **Docteur** : **Abd-Elmouneïm BELHADJ** qui avoir assuré la codirection de ce mémoire, pour ces conseils précieux le long de mon travail de mémoire. Je ne saurais trop le remercier pour l'intérêt qu'il a accordé à ce travail et pour les longues heures de discussion qu'il m'a réservée avec une patience inégale. Et tous les enseignants du département Génie de la mécanique.

Je remercie également tous les membres de jury qui ont bien voulu examiner ce modeste travail. Je suis certaine de pouvoir compter sur leurs vastes connaissances et leur esprit critique constructif pour m'aider, par leurs commentaires et leurs discussions, à mieux comprendre certains problèmes rencontrés au cours de ce travail de recherche.

Il est difficile, dans un petit espace, de remercier toutes les personnes qui ont eu une influence sur ma vie de tous les jours pendant la durée de réalisation de mon mémoire de fin d'études. Ces personnes se reconnaitront facilement et sauront combien ma tendresse et mon amitié sont grandes pour eux.

Ce travail n'aurait jamais pu se réaliser sans le soutien continu de ma famille et sans leur éducation basée sur des valeurs morales fondées sur le respect des autres et du travail.

Dédicace

Je dédie ce travail :

A ma chère maman qui n'a jamais cessé de ménager ses efforts pour que j'atteigne ce niveau. Ses sacrifices et privations ne l'ont pas empêché d'accomplir son devoir de mère soucieuse de l'avenir de ses enfants.

A mon père décédé qui a su se montrer patiente, compréhensif et encourageant, sa chaleur paternelle a été et sera toujours pour moi d'un grand réconfort.

A mes frères , mes sœurs , ma femme .

A ma famille, grande et petite.

A mes chères copines.

À tous mes amies et mes collègues, pour les sympathiques moments qu'on a passé ensemble.

À tous ceux qui me connaissent, et surtout qui m'aiment.

ANNANE

Dédicace

Je dédie ce travail :

A ma chère maman qui n'a jamais cessé de ménager ses efforts pour que j'atteigne ce niveau. Ses sacrifices et privations ne l'ont pas empêché d'accomplir son devoir de mère soucieuse de l'avenir de ses enfants.

A mon père décédé qui a su se montrer patiente, compréhensif et encourageant, sa chaleur paternelle a été et sera toujours pour moi d'un grand réconfort.

A mes frères , mes sœurs .

A ma famille, grande et petite.

A mes chères copines.

À tous mes amies et mes collègues, pour les sympathiques moments qu'on a passé ensemble.

À tous ceux qui me connaissent, et surtout qui m'aiment.

BOUCHENAFA

Résumé : Les matériaux cellulaires à une grande importance en termes de la dureté, la résistance et la qualité, ainsi que la densité relative élevée, il est utilisé dans divers domaines de la technologie moderne et plus particulièrement le domaine de l'aviation. On a étudié dans ce travail quelques généralités sur les mousses métalliques, ensuite on a travaillé sur les méthodes d'élaborations des matériaux poreux. En ce qui concerne l'objectif principal de ce travail est de mesurer la porosité pour certains échantillons des matériaux poreux et pour créer un model expérimentale.

Mots clés : matériaux poreux, procédés d'élaboration, pores ouverts, densité relative, propriétés mécanique, métallographie, traction.

ملخص: تعتبر المواد الخلوية ذات أهمية كبيرة من حيث الصلابة والقوة والجودة، وكذلك الكثافة النسبية العالية، وهي تستخدم في مختلف مجالات التكنولوجيا الحديثة وبشكل أخص مجال الطيران. لقد درسنا في هذا العمل بعض العموميات على الرغاوي المعدنية، ثم عملنا على طرق تفصيل المواد المسامية. بقدر ما يكون الغرض الرئيسي من هذا العمل هو قياس المسامية لبعض عينات المواد الخلوية ولإنشاء نموذج تجريبي.

الكلمات المفتاحية: المواد المسامية، عمليات التصنيع، المسام المفتوحة، الكثافة النسبية، الخواص الميكانيكية، فحص المعادن، الشد.

Abstract: Cellular materials are of great importance in terms of hardness, strength and quality, as well as the high relative density, it is used in various fields of modern technology and more particularly the field of aviation. We have studied in this work some generalities on metallic foams, then we worked on the methods of elaborations of porous materials. As far as the main purpose of this work is to measure the porosity for some samples of cellular materials and to create an experimental model.

Key words: porous materials, production processes, open pores, relative density, mechanical properties, and metallography, tensile.

SOMMAIRE

Sommaire

Remerciement …….

Dédicace ……..

Sommaire …….

Résumé …….

Introduction générale……..…… 1

Chapitre I : Les matériaux poreux

I.1-Introduction……..……..……... 3

I.2-Matériaux poreux …….……..…..…….4

I.2.1- Définition …….……..……4

I.2.2-Les différents types des mousses ……..……..……5

I.2.3-Pores fermés ……..……5

I.2.4-Pores ouverts …….…..……...6

I.2.5-Réticulations ……...……...6

I.3-Techniques de fabrication …….……7

I.3.1- Pores fermés : Fonderie et métallurgie des poudres…….…..……7

I.3.2-Pores ouverts : Infiltration…….……...12

I.3.3-Réticulations : Infiltration et dépôt……..……14

I.4- Caractéristiques des mousses métalliques …….…...16

I.4.1- Caractéristiques générales ……...…….……..16

I.4.2- Quelques caractéristiques mécaniques ……..16

I.5-Applications…….…..……..18

I.5.1- Actuelles et potentielles……...……18

I.5.2- Structures sandwichs à noyaux mousse métallique……..……...27

I.5.3- Rigidité des structures sandwichs…….……..28

I.5.4- Résistance à l'impact ……..…….…...30

I.5.5- Métal poreux polymère composite (MPPC)……...…….……31

I.6- Conclusion …….…….…...32

Chapitre II : Techniques expérimentales et matériaux de l'étude

II.1Matériaux utilisés……...……..…34

II.2 Mesure de la conductivité électrique……..35

II.3 Découpe des échantillons par le processus d'électroérosion…….…….……34

II.4 Techniques de caractérisation structurale……..…….…37

II.4.1 Observations métallographiques…….…….…37

II.5 Caractérisations mécaniques des échantillons…….……...38

Chapitre III : Matériaux cellulaires de Sn-Pb Résultats & discussions

III.1. Procédé d'élaboration de matériau cellulaire de l'alliage binaire Sn-Pb ……..…….42

III.2. Technique de caractérisation structurale……...……...45

III.2.1. Observations métallographiques…….……..45

III.3. Caractérisations mécaniques des matériaux poreux Sn-Pb……49

III.3.1. Mesure de la densité relative……..…….……49

III.3.2. Essais mécaniques de traction uniaxiale…….……..51

Conclusion générale ……..…..……..57

Références bibliographiques……..……..… 59

Liste des figures :

Chapitre I

Figure 1 : Matériaux naturels : (a) liège, (b) bois balsa, (c) éponge, (d) os…….……**4**

Figure 2 : Mousse fermée……..……**5**

Figure 3 : Mousse ouverte…….…..…...**6**

Figure 4 : Mousse réticulée…….…..….**6**

Figure 5 : Mise en œuvre d'une mousse d'aluminium par injection de gaz .Procédé utilisé par CYMAT® et HYDRO® …….……..…...**8**

Figure 6 : Obtention d'une mousse métallique par introduction de TiH2.Procédé utilisé par ALPORAS® …….……..….**9**

Figure 7 : Obtention d'une mousse métallique par métallurgie des poudres. Procédé utilisé par ALPORAS® …….……..…...**11**

Figure 8 : Obtention d'une mousse métallique à pores ouverts et à pores réticulés…….…..….**13**

Figure 9 : Obtention d'une mousse métallique par pression négative. Procédé utilisé pour les MPPC…….....…...**14**

Figure 10 : Obtention d'une mousse métallique par décomposition chimique phase vapeur…..….**15**

Figure 11: Courbes récapitulative des valeurs de module d'Young VS. le pourcentage de porosité de la mousse métallique …….……**17**

Figure 12: Relation linéaire entre l'énergie et la porosité…….….**18**

Figure 13 : un implant dentaire avec pores ouverts……**21**

Figure 14 : Crash box utilisant des mousses métalliques régulières d'aluminium…….……**22**

Figure 15: Tube profile en acier pour structure pare-chocs. (a) Tube creux. (b) Tube rempli de sphères creuses métalliques …….…….. **23**

Figure 16 : Des turboréacteurs…….…..**24**

Figure 17 : la distribution de la chaleur autour d'une mousse métallique à pores ouverts……**25**

Figure 18 : Système de refroidissement dans les machines frigorifiques……. **25**

Figure 19 : Système de refroidissement d'ordinateur (carte mère)…….**26**

Figure 20: Photographie d'un caloduc qui sert au domaine de pétrochimie ……..…**27**

Figure 21 : Comparaison entre une poutre IPN et une structure sandwich……**28**

Figure 22 : Comparaison de structure sandwich : en haut mousse métallique Alporas® à cellules fermées, en bas mousse polymère Divinycell® ……..…….**29**

Figure 23 : Comparaison entre deux structures sandwichs Dinivycell & Alporas…….…**30**

Figure 24 : Microscopie d'un matériau poreux composite…… **31**

Chapitre II

Figure 25: Photographie de l'échantillon obtenu par le procédé de réplication inverse de granulométrie de 2 mm…….……...**34**

Figure 26 : Principe de la méthode d'élaboration des matériaux poreux par le procédé de réplication inverse…….…..**35**

Figure 27 : Schéma du principe du processus d'électroérosion……..**37**

Figure 28 : Photographie d'un microscope optique (type ZEISS Axiovert 450)…….……..**38**

Figure 29 : Dispositif expérimental pour les essais de traction sur les matériaux cellulaires élaborés au cours cette étude…….……..**39**

Figure 30 : Croquis des plateaux de la machine d'essai de traction sur lesquels est monté un capteur de déplacement linéaire LVDT…….……**40**

Chapitre III

Figure 31 : Photographies des échantillons de traction Sn50 Pb obtenus par infiltration de métal liquide en utilisant diverses granulometries de sel…….…….**45**

Figure 32: Diagramme d'équilibre de phases de l'alliage binaire Sn-Pb…….……..**46**

Figure 33: Observation micrographique de l'alliage Sn50-Pb50, de granulométrie moyenne des pores de 1,6mm…….…..**48**

Figure 34: Observation micrographique de la mousse métallique Sn50-Pb50, de granulométrie moyenne des pores de 3,15mm……...**48**

Figure 35: Observation micrographique de la mousse métallique Sn50-Pb50, de granulométrie moyenne des pores de 2.50mm …….……**49**

Figure 36: Courbe contrainte déformation obtenue au cours de l'essai de traction uniaxiale sur l'échantillon de classe B…….…….**51**

Figure 37: Propriété mécanique du matériau déduites de l'essai de traction…….……....**52**

Figure 38 : Courbes contrainte déformation obtenue au cours de l'essai de traction uniaxiale sur l'échantillon de classe B…….…….**53**

Figure 39: Agrandissement de la courbe de traction pour les faibles déformations. Schématisation de la méthode de détermination de la contrainte plateau σ_p ……..….**54**

Figure 40 : Courbes contrainte-déformation obtenues au cours des essais de traction uniaxiale sur cinq échantillons type de leur classe de granulométrie …….**55**

Figure 41 : Histogramme de la contrainte en fonction de la densité relative des matériaux poreux de différentes classes de granulométries étudiées au cours de l'essai de traction uniaxiale ……**57**

Figure 42 : Courbe représentative de contrainte de plateau versus densité relative……..**58**

Liste des tableaux :

Tableau 1 : Avantages et inconvénients des batteries NiMH et NiCd……..…..…..…**20**

Tableau 2 : Valeurs de conductivités électriques mesurées des trois séries d'échantillons de Sn-Pb de taille de pores successivement 1,6mm, 2mm et 3,15mm……..**44**

Tableau 3 : Récapitulatif des résultats obtenus lors des mesures des densités relatives…...…….**50**

Tableau 4: Valeurs des contraintes de plateau correspondantes à chaque échantillonne valeur moyenne pour chaque mousse. ……..….**56**

Tableau 5: Les valeurs des contraintes d'écoulement σp correspondant à chaque échantillon et leurs densités relatives.……..…...**58**

Introduction générale

Introduction générale :

Les matériaux poreux, ont une structure légère par rapport aux matériaux dense, ayant des caractéristiques mécaniques particulières. De nombreux tests ont également montré qu'ils ont une grande capacité d'absorption d'énergie, absorption des chocs, une réduction significative du bruit et ayant aussi de nombreuses applications.

Ce travail est consacré au développement et à la caractérisation des matériaux poreux, à pores ouverts, basés de l'alliage étain-plomb (avec 50% de teneur en étain) par la méthode de réplication inverse. Le but de cette étude est triple. Notre premier objectif sera la synthèse des matériaux poreux. Le deuxième objectif est dédié à la réponse du comportement des échantillons poreux ayant différentes densités relatives aux tests de traction uniaxiale , et évaluer les propriétés et les phases présentent dans ce type de matériaux. Enfin, le dernier approfondissement se concentre sur les interprétations des résultats et des conclusions de nos expériences décrites dans cette étude et de les comparer avec les propriétés des matériaux poreux existants dans la littérature proposant des modèles physique modifiés.

En conséquence, nous avons récapitulé l'ensemble de nos travaux dans ce manuscrit comme suit :

Une introduction générale, suivie par le premier chapitre qui est consacré à une étude bibliographique très approfondie. Un second chapitre est dédié aux techniques expérimentales et matériaux qui ont servi à cette étude. Les résultats et les discussions sur les matériaux poreux élaborés ont été exposés dans le chapitre 3. Finalement on termine par une conclusion générale.

Chapitre I:

Les matériaux poreux

I.1-Introduction

Au début du XIXe siècle, les matériaux conventionnels comme l'acier ont été largement utilisés pour un large éventail d'applications, en commençant par la fabrication d'armure de protection jusqu'à la construction navale en passant par l'industrie automobile. Ces matériaux ont été choisis comme matériaux de construction de parleurs propriétés physiques intéressantes (hautes résistances mécaniques et comportement ductile). Cependant, leur inconvénient majeur est leur importante densité. Par conséquent, de nombreuses recherches sont en cours afin de développer ou de concevoir de nouveaux matériaux qui possèdent les mêmes propriétés mécaniques mais avec des densités réduites.

Afin d'optimiser le poids d'un composant, les matériaux de faible densité sont très recherchés et l'un des moyens choisis pour les concevoir a été de réduire la quantité de matière solide utilisée dans la fabrication, tout en préservant le dimensionnement géométrique de la structure. Ainsi, des matériaux de type cellulaire ont été fabriqués à partir de métaux en adaptant et en copiant la conception naturelle (liège, mousse, os…) [1,2]. C'est ainsi que les mousses métalliques ont été inventées. Les mousses métalliques possèdent de bonnes caractéristiques mécaniques. De nombreux tests ont également démontré qu'elles possèdent une grande capacité d'absorption d'énergie. En outre, les performances de ces matériaux peuvent être améliorées lorsqu'ils sont assemblés en sandwich avec des fibres de carbone ou d'aramide (Kevlar).Cette combinaison a conduit à la fabrication de composites avec un rapport performances mécaniques/poids très intéressant. Aujourd'hui de nombreuses recherches dans des pays tels que les États-Unis, Allemagne, le Royaume Unis, le Japon et la France sont en cours car les applications des mousses métalliques sont nombreuses, et laisse entrevoir d'importantes retombées économiques [3].

Dans ce chapitre, nous allons dans un premier temps présenter les différents types des mousses métalliques et leurs procédés de fabrications. Ensuite, nous étudierons les propriétés de ces différentes mousses. Enfin nous terminerons en passant en revue les principales applications.

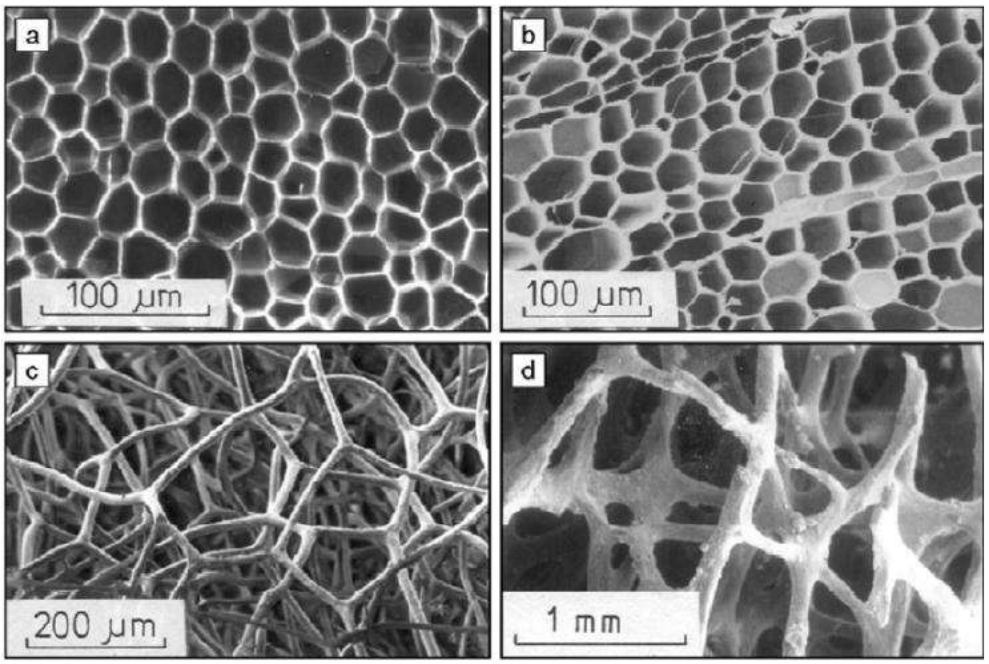


Figure 1 : Matériaux naturels : (a) liège, (b) bois balsa, (c) éponge, (d) os [4].

I.2-matériaux poreux

I.2.1- Définition

Un matériau poreux est une structure alvéolaire constituée d'un métal solide, souvent en aluminium, contenant un volume important de gaz (des pores remplis). Les pores peuvent être scellés (mousse à cellules fermées) ou ils peuvent former un réseau interconnecté (mousse à cellules ouvertes). La principale caractéristique des mousses métalliques est une porosité très élevée, en général 75-95% du volume, ce qui rend ces matériaux ultralégers. La stabilité de la mousse métallique est inversement proportionnelle à sa densité, ainsi un matériau dense à 20% est plus de deux fois plus robuste que le même matériau dense à 10%.

En général, les mousses métalliques conservent certaines propriétés physiques de leur matériau de base. Les mousses à base de métal non inflammable restent non inflammables et la mousse est généralement recyclable, comme son matériau de base. Le coefficient de dilatation thermique reste également similaire tandis que la conductivité thermique est généralement réduite [5].

I.2.2-Les différents types des mousses

Les mousses métalliques sont des matériaux macroscopiquement cellulaires, caractérisés par leurs structures topologiques (cellules ouvertes, cellules fermées), la densité relative, la taille et la forme des cellules et l'anisotropie [6]. On distingue alors 3 types de mousses [7]:

- Les mousses métalliques à pores fermées,
- Les mousses métalliques à pores ouverts,
- Les mousses métalliques réticulées.

I.2.3-Pores fermés

Les mousses à pores fermées se caractérisent par leurs cellules sphériques isolées par des parois souvent épaisses.

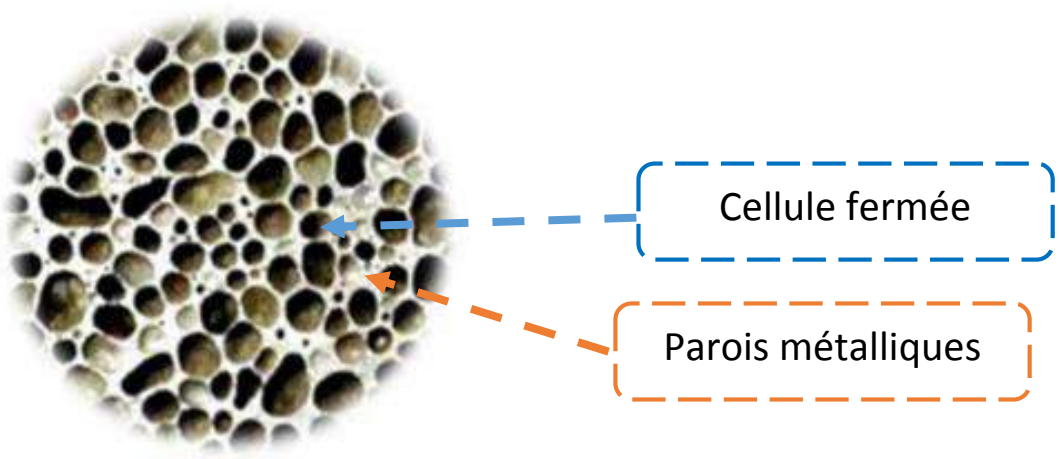


Figure 2 : photographie d'une mousse à pores fermés [8].

I.2.4-Pores ouverts

Les mousses à pores ouverts présentent des cellules connectées. La structure géométrique d'une mousse ouverte est généralement plus complexe que celle des mousses à cellules fermées.

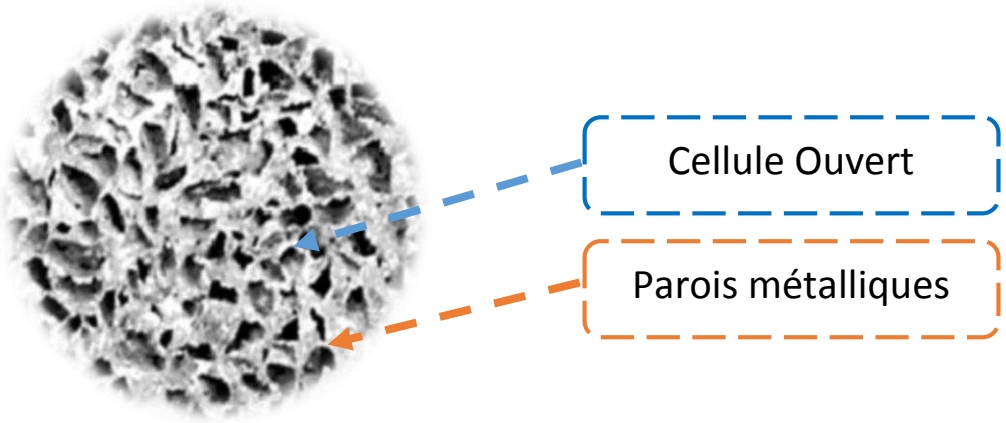


Figure 3 : photographie d'une mousse à pores ouverte [9].

I.2.5-Réticulations

Les mousses métalliques réticulées sont similaires aux mousses métallique à pores ouverts, cependant elles ne présentent pas de pores mais des réticulations. Pour les plus fines d'entre ces mousses il est même possible de voir au travers. Ces mousses métalliques sont donc les plus poreuses de ces matériaux cellulaires.

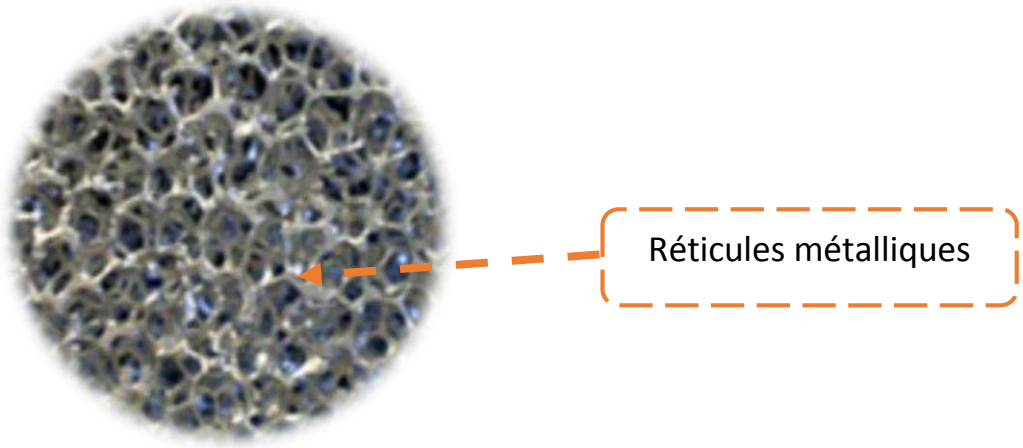


Figure 4 : photographie d'une mousse à pores réticulée [10].

Ces structures sont obtenues suivant différents moyens de mise en œuvre que nous détaillerons par la suite. Il est important de noter que les mousses réticulées sont très semblables aux mousses à pores ouverts, elles possèdent d'ailleurs un procédé de fabrication en commun.

Les différentes structures de ses mousses conditionnent les propriétés du matériau obtenu. Par la suite nous détaillerons les divergences entre ces trois types de mousses notamment lorsque l'on abordera les différentes applications propres à chacune [11].

I.3-Techniques de fabrication

I.3.1- Pores fermés : Fonderie et métallurgie des poudres

A) Fonderie

-Injection de gaz

Ce procédé est majoritairement utilisé pour mettre en forme des mousses d'aluminium. Il est difficile de réaliser des mousses métalliques à partir de métaux purs fondus, par injection de gaz. En effet, les métaux fondus moussent puis retombent par gravité à l'état liquide sans avoir le temps de se solidifier. C'est pourquoi il faut insérer des particules insolubles (ou à lente dissolution) comme les particules de carbure de silicium (SiC), d'oxyde d'aluminium ou encore d'oxyde de magnésium. Cet ajout permet d'augmenter la viscosité du métal en fusion et ainsi permettre la solidification de la mousse. Généralement on utilise de l'air pour créer les bulles mais on peut également se servir de dioxyde de carbone, d'oxygène, d'un gaz inerte ou même d'eau.

On peut effectuer du calandrage afin de dimensionner la pièce obtenue (méthode semblable à l'extrusion). Le diamètre des pores obtenus peut varier de 0,5 à 5 mm .

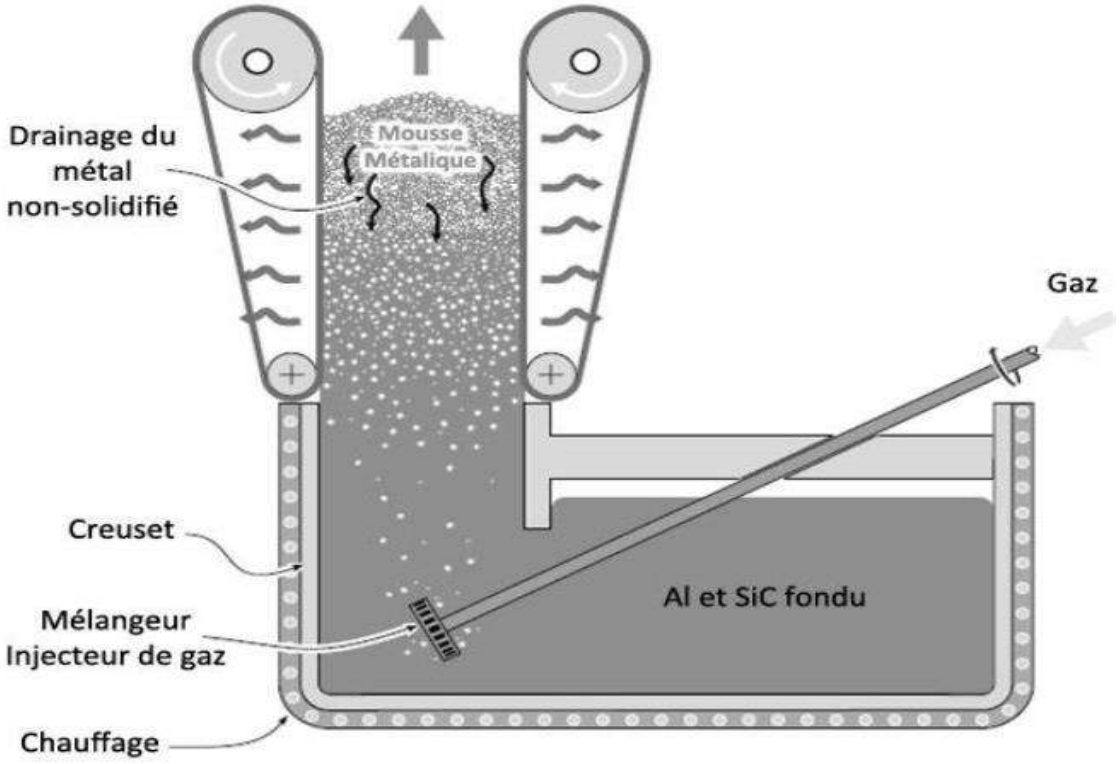


Figure 5 : Mise en œuvre d'une mousse d'aluminium par injection de gaz.
Procédé utilisé par CYMAT® et HYDRO® [12, 13,14].

-Introduction d'agent moussant

Les mousses métalliques peuvent être mise en œuvre grâce à l'introduction d'un agent moussant. Cependant pour les mêmes raisons que par injection de gaz il faut épaissir le métal fondu avant de pouvoir créer notre mousse métallique.

L'augmentation de la viscosité ne se fait pas à l'aide de SiC mais de Calcium (environ 2% en masse).

Ce procédé est également utilisé pour créer des mousses d'aluminium. En effet, les autres métaux ont généralement une température de fusion plus élevé ce qui pose problème lors de la décomposition de l'agent moussant.

L'agent moussant utilisé est un Hydrure de Titane (TiH_2), environ 2% en masse. En chauffant il libère du dihydrogène qui forme des bulles tandis que le titane est rejeté dans l'aluminium. Si la température de fusion du métal est trop élevée la décomposition est trop rapide et endommage la structure [15].

La mousse d'aluminium remplie ensuite le moule dans lequel elle est contenue. Il est donc important de noter que ce procédé est discontinu.

Le diamètre des pores obtenus varie de 0,5 à 5mm.

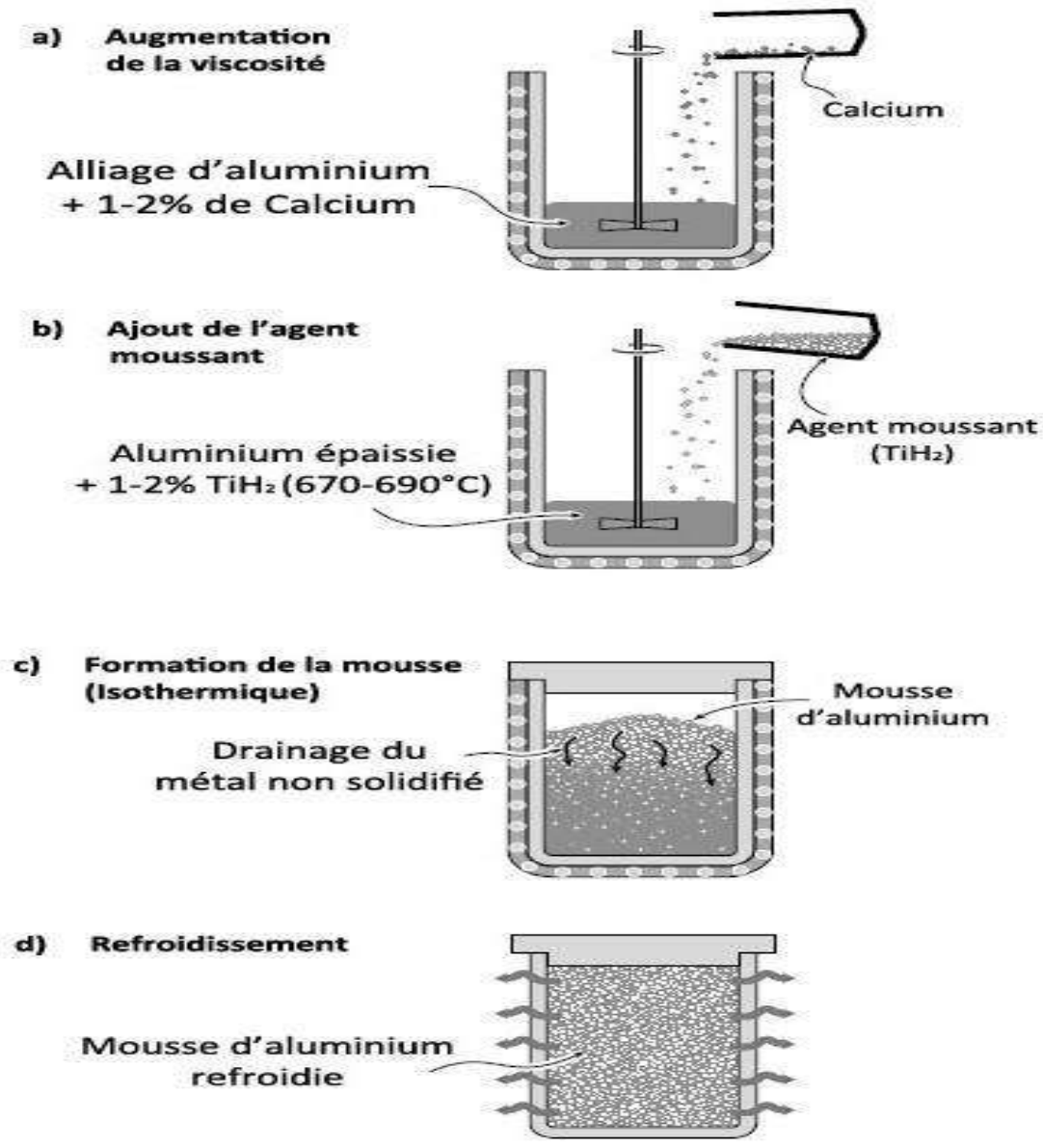


Figure 6 : Obtention d'une mousse métallique par introduction de TiH_2.

Procédé utilisé par ALPORAS® [16].

B) -Métallurgie des poudres

Cette méthode de mise en œuvre s'inspire en partie de la métallurgie des poudres. Une fois le mélange de l'agent moussant et des poudres métallique réalisé, il est compacté et extrudé à froid sous forme de barre ou de plaque. Ces préformes sont ensuite placées dans un moule que l'on va chauffer. Souvent utilisé pour des mousses d'alliages d'aluminium ce procédé utilise également le TiH_2 comme agent moussant.

La température de décomposition de TiH_2 étant d'environ 465°C, elle est plus faible que celle de l'alliage métallique (Al et ses alliages : T° de fusion ≈ 660°C). Lors du chauffage le TiH2 se décompose avant la fusion du métal, ce qui donne lieu à des porosités à fortes pressions internes. Une fois la température proche de la température de fusion de l'aluminium les préformes sont de moins en moins visqueuses et gonflent sous l'effet de leurs pressions internes.

La mousse prend donc la forme du moule. Le diamètre des pores obtenus varie de 1 à 5 mm.

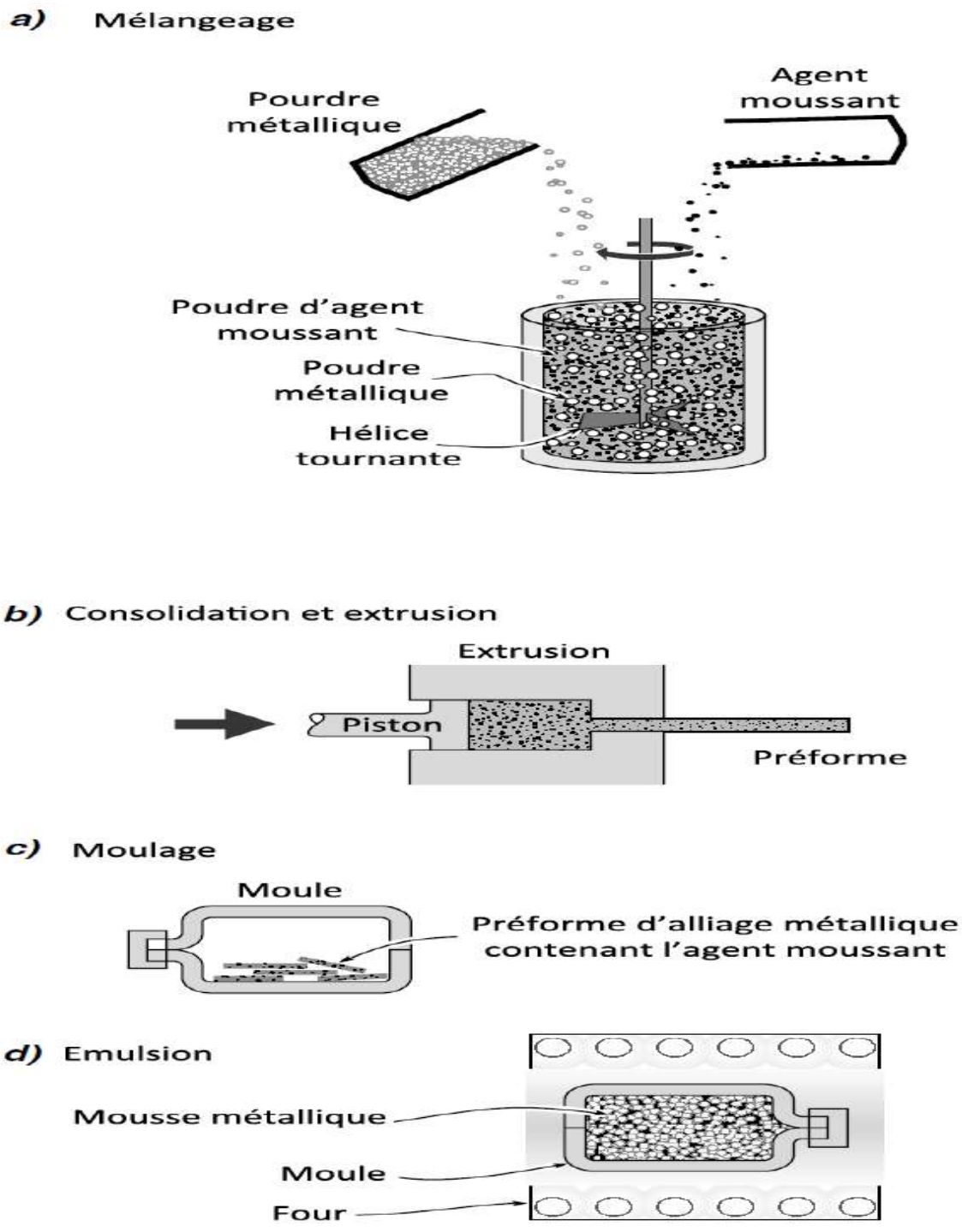


Figure 7 : Obtention d'une mousse métallique par métallurgie des poudres

Procédé utilisé par ALPORAS® [17].

I.3.2-Pores ouverts : Infiltration

De nombreux procédés de fabrication permettent de fabriquer des mousses polymères à cellules ouvertes avec de faibles densités relatives. L'une d'elle est la fabrication par procédés d'infiltration, procédé utilisé par DUOCEL [18, 42,43].

Ce procédé ce déroule de la façon suivante :

Premièrement, on crée un polymère possédant la forme, la taille des cellules et la densité désirée. Ce polymère servira de master pour la mousse métallique que l'on va synthétisée. Ce polymère est ensuite revêtu d'un mortier (boue, sable...) afin de créer un moule avec une image inversé de la future mousse métallique.

Ce moule est ensuite placé dans un four. Grâce à la température importante, le polymère va se décomposer et libérer le moule.

Ensuite le moule est rempli d'un alliage métallique puis refroidit. On peut utiliser dans certain cas, une presse qui va permettre de surmonter la résistance à l'écoulement de certains alliages métalliques et donc d'avoir une meilleure répartition du métal en fusion dans le moule.

Après refroidissement, le mortier est retiré par friction (chocs…) pour ne laisser que la mousse métallique qui est la réplique parfaite de la mousse de polymère initiale. Ce procédé simple permet aussi l'utilisation de poudres métalliques et d'obtenir des mousses métalliques à cellules ouvertes avec des tailles de pores de 1 à 5 mm.

Aussi grâce à cette méthode, un grand nombre de métaux peuvent être utilisés ce qui permet de créer une grande variété de mousses métalliques.

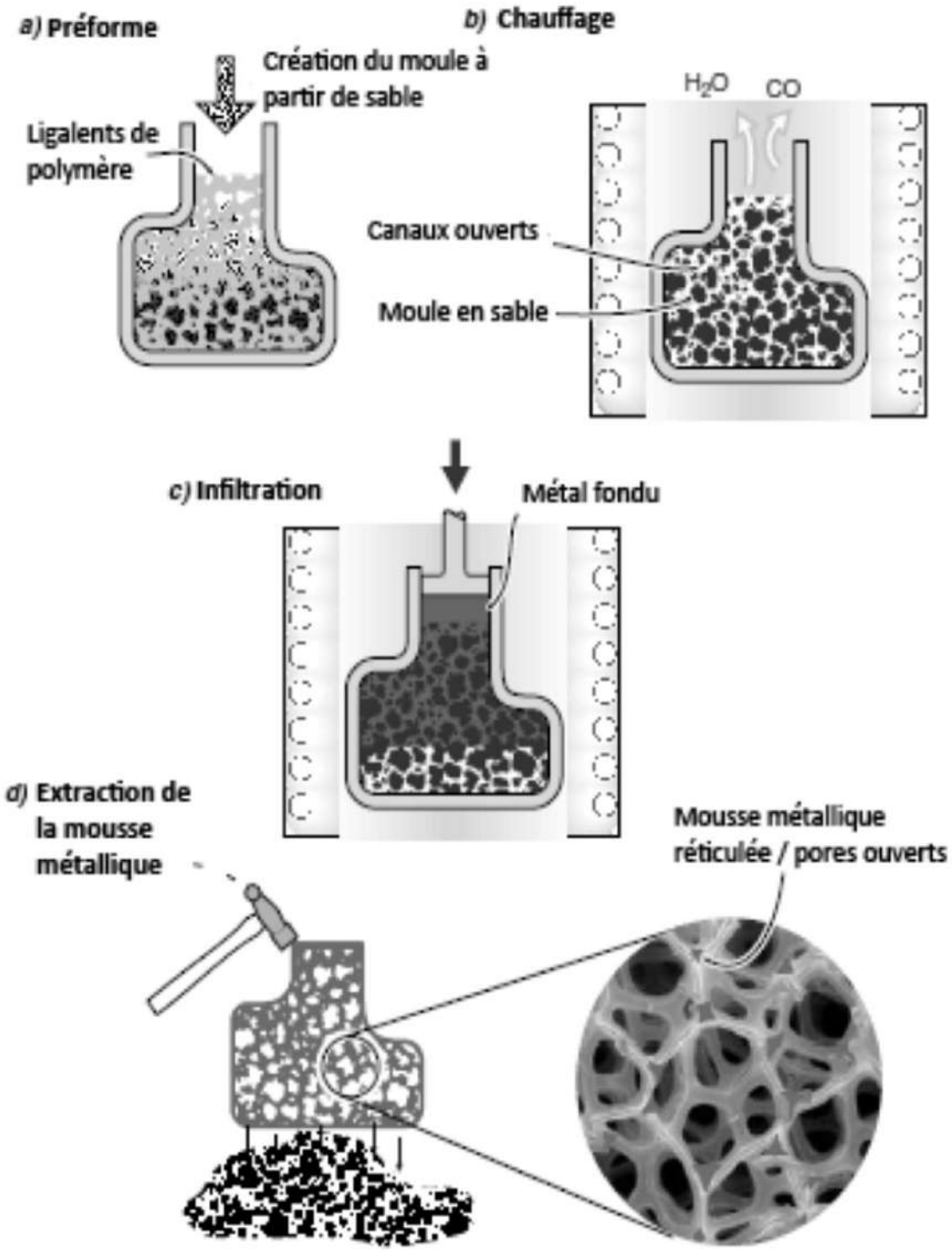


Figure 8 : Obtention d'une mousse métallique à pores ouverts et à pores réticulés [19].

Ce procédé possède une variante. Au lieu d'utiliser une mousse polymère, des précurseurs solubles dont on maîtrise la calibration (NaCl) peuvent être utilisés comme préforme. L'aluminium sous forme liquide est introduit puis aspiré à l'aide d'une pompe à vide (pression négative). Les précurseurs solubles sont ensuite simplement retirés par un lavage à l'eau.

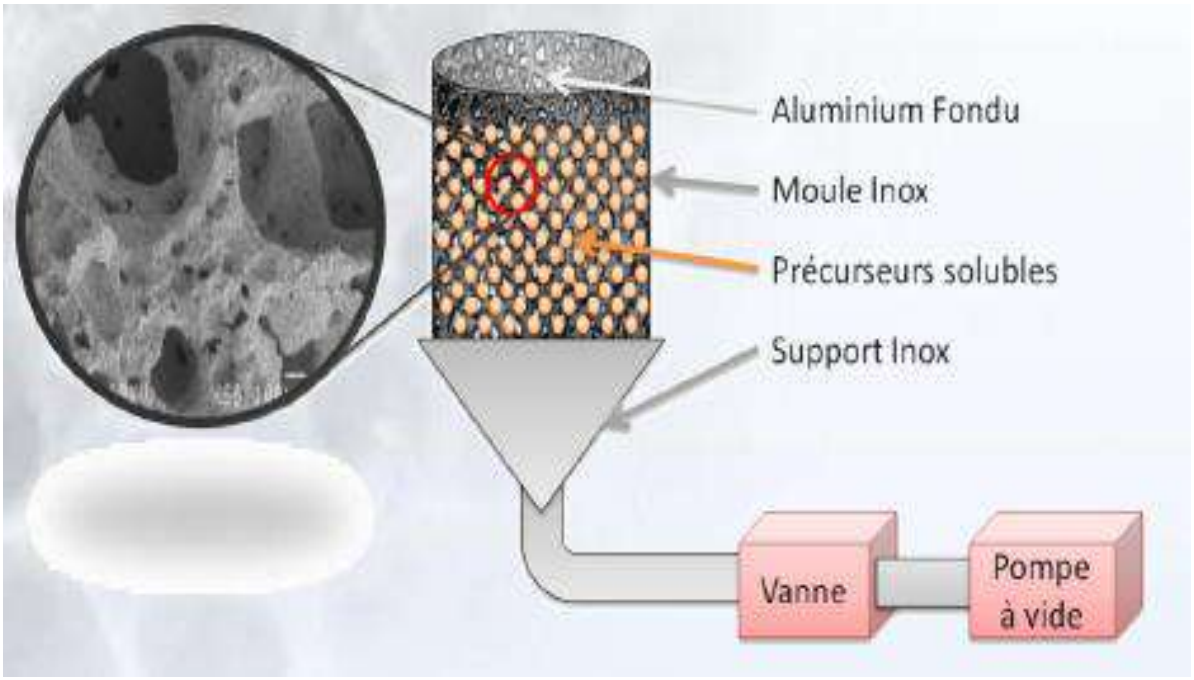


Figure 9 : Obtention d'une mousse métallique par pression négative.

Procédé utilisé pour les MPPC [20].

I.3.3-Réticulations : Infiltration et dépôt

Afin de créer des mousses métalliques à réticulations, les mousses polymère à réticulations peuvent aussi servir de master. Comme précédemment avec la méthode de DUOCEL. Ce master peut être utilisé comme support sur lequel les métaux sont déposés par décomposition chimique en phase vapeur (CVD) par évaporation ou par électrodéposition. Un des procédés de création de mousses métalliques à réticulation par CVD, est appelé procédé INCO [21].

Dans ce procédé INCO, on peut par exemple créer des mousses à partir de nickel. Le nickel est déposé par décomposition du tétracarbonyl de nickel sous forme gazeuse (Ni(CO) 4) g. On place dans un réacteur à CVD le master, on fait le vide et on injecte le gaz en question. Il va alors venir se déposer sur toutes les surfaces exposées.

Lorsque le dépôt a atteint une épaisseur de plusieurs dizaines de micromètres, la mousse polymère est alors retiré par un simple procédé de chauffage à l'air, on peut aussi utiliser lors de cette étape, un chauffage à l'infrarouge.

Il en résulte une structure métallique cellulaire avec des ligaments creux. Une étape ultérieure de frittage survient ensuite afin de densifier les ligaments.

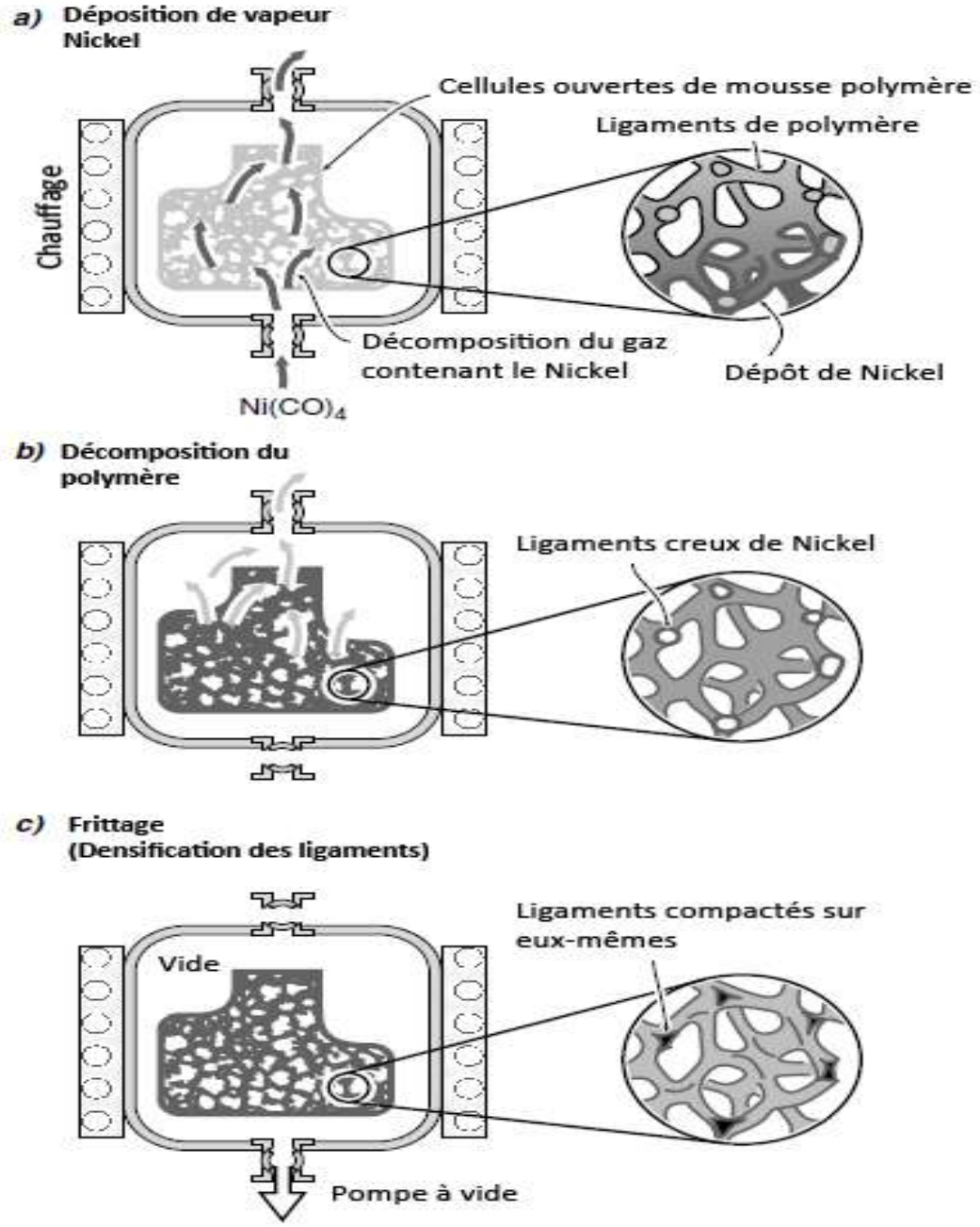


Figure 10 : Obtention d'une mousse métallique par décomposition chimique phase vapeur [22].

Le carbure de nickel est cependant un gaz toxique et dangereux pour l'environnement. Certains pays comme les États-Unis, ont interdit son utilisation. Cette méthode de CVD (DEPOT CHIMIQUE EN PHASE VAPEUR) est limitée aux éléments purs tels que le nickel ou le titane car on ne peut pas avec ces éléments utiliser des techniques comme l'électro déposition. Ce procédé de CVD permet d'obtenir des mousses métalliques à réticulations possédant des tailles de pores comprises entre 100 et 300 µm.

I.4- Caractéristiques des mousses métalliques

Dans cette partie nous allons chercher à donner quelques propriétés aux mousses métalliques.

I.4.1- Caractéristiques générales

La principale raison qui justifie l'utilisation des mousses métalliques est leur faible densité comparée aux métaux pleins. En effet, comme on a pu le voir dans les parties précédentes les porosités peuvent varier de quelques dixièmes de millimètres à 5mm de diamètre. Leur porosité peut varier de 50 % à 93%.

Cette porosité s'accompagne logiquement d'une baisse de la densité des matériaux, les mousses sont de 10 % à 40 % plus légères que les métaux massifs. Cette baisse significative de la densité s'avère essentielle comme on le verra par la suite lorsque l'on traitera des applications.

Les structures poreuses permettent également de conférer une grande surface spécifique ce qui augmente les capacités d'absorption (chocs, acoustique,…) des mousses. L'atténuation des ondes électromagnétiques, par analogie aux ondes sonores, est également une caractéristique notable (Par exemple : Les mousses sont utilisées pour mettre au point des blindages électromagnétiques).

Qu'en est-il des propriétés d'isolation ? Passé 80% de porosité, les mousses métalliques deviennent thermiquement isolantes comparé aux métaux. Leurs propriétés isolantes sont semblables à celles d'un marbre [23].

I.4.2- Quelques caractéristiques mécaniques

Le comportement mécanique des mousses mécaniques, comme nous l'avons abordé précédemment, sont très intéressantes dans une optique d'allègement des structures. C'est pour cela qu'il est nécessaire d'étudier ces propriétés plus en détails [24].

Les mousses métalliques possèdent les caractéristiques suivantes :

- Une haute rigidité : un rapport de rigidité (rigidité/densité) en flexion 1,5 fois supérieur par rapport à celui de l'acier.
- une haute capacité d'absorption d'énergie en choc mécanique : une porosité à 84 % peut absorber 2,5 MJ/m.

On peut voir sur les graphiques ci-dessous que la limite élastique des mousses diminue linéairement en fonction de leurs porosités. Cela s'explique par le fait que lorsque la porosité augment le volume d'air à l'intérieur du matériau augmente ce qui nuit à ses performances mécaniques. La même chose se produit concernant le module d'Young et la limite élastique.

$$E_{mousse} = E_{métal} \times V_{métal} + E_{porosité} \times V_{porosité} \quad \text{.....1}$$

Avec Emétal : Module d'Young du métal (MPa)

Vmétal : Fraction volumique du métal (Ø)

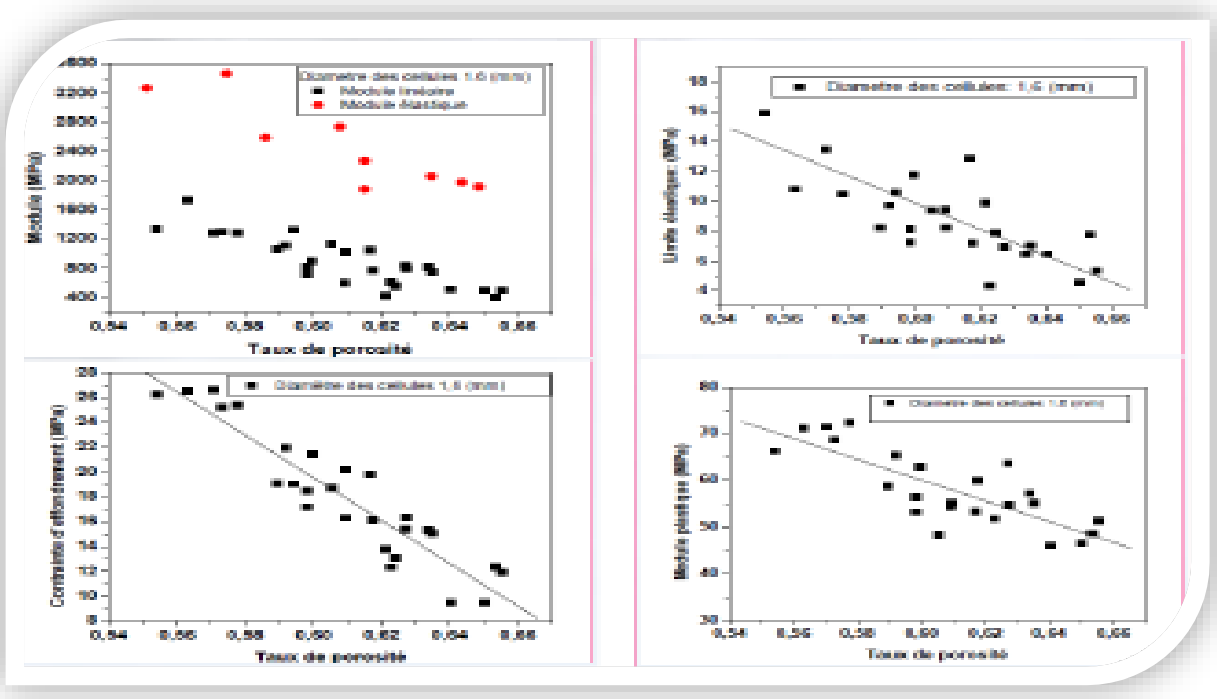


Figure 11: Courbes récapitulative des valeurs de module d'Young versus le pourcentage de porosité de la mousse métallique [25].

La quantité d'énergie absorbée par la mousse absorbé est donnée par la formule suivante :

$$w_{vm} = \int_0^{\varepsilon d} \sigma(\varepsilon) \times d\varepsilon \quad avec \quad \varepsilon_d = P_{porosité} \text{ ……..……..2}$$

On voit grâce à cette formule qu'il y a une relation linéaire entre l'énergie et la porosité. On en déduit que plus le taux de porosité est élevé plus l'énergie que le matériau peut absorber est faible. Pour compenser cet effet, on devra augmenter l'épaisseur de mousse.

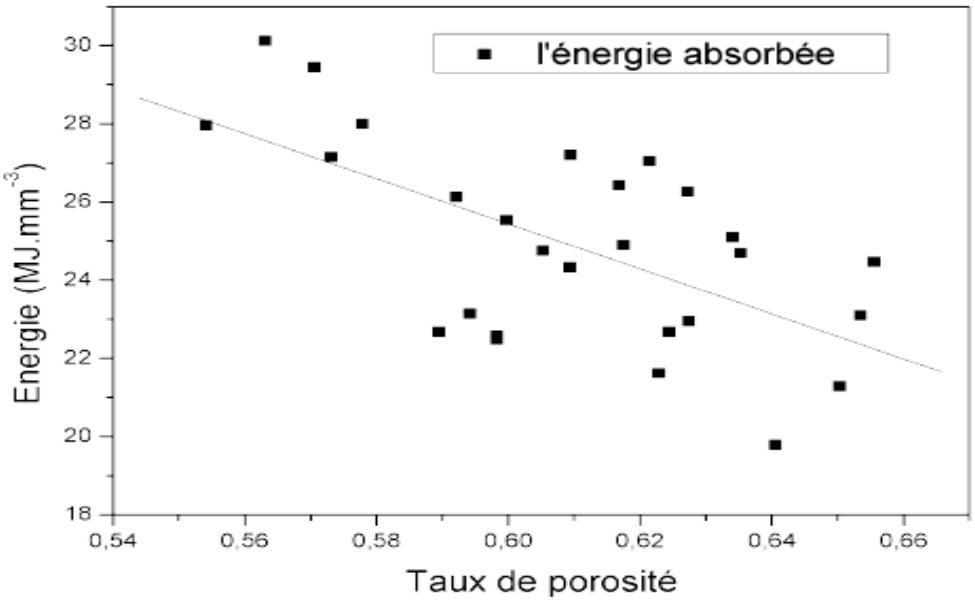


Figure 12: Relation linéaire entre l'énergie et la porosité des matériaux poreux [26].

I.5-Applications

I.5.1- Actuelles et potentielles

Les mousses à cellules ouvertes (Open Cells) possèdent des milliers de bulles éclatées, ce qui permet aux gaz et aux liquides de passer au travers. Cette caractéristique les rend idéales pour des applications telles que les échangeurs et dissipateurs de chaleur, les catalyseurs, les barrières acoustiques contre le bruit, les filtres, les électrodes, les écrans électromagnétiques, etc.

Les mousses à cellules fermées (Closed Cells), à la différence de celles à cellules ouvertes, sont composées de milliers de bulles non éclatées. Ainsi, les gaz et les liquides ne peuvent passer à travers ce matériau [27]. Leur étanchéité et leur légèreté est telle que certaines de ces mousses peuvent flotter sur l'eau. Elles sont très prometteuses pour la fabrication de structures pour des

véhicules de transport. Parmi les principales applications envisagées, notons les châssis d'automobile, les composantes de fuselage d'avion, les wagons de train, mais aussi des panneaux de revêtement pour les façades de bâtiment. Elles peuvent également être utilisées comme matériau d'absorption des impacts à l'intérieur des pare-chocs ou de blindages ultralégers.

De nos jours, il n'existe que très peu de réalisations industrielles à grandes échelles en mousse métallique. Voici les utilisations les plus concrètes des mousses métalliques :

-Électrode en Mousse de Nickel *(Open Cells)* pour Batterie de Stockage:

Application actuelle :

Des mousses de nickel sont produites à l'échelle industrielle, car elles possèdent de bonnes caractéristiques d'échange électrique, nécessaires à l'élaboration de batterie pour appareils portables (téléphone, ordinateur...).

En effet, les mousses de nickel sont utilisées comme électrodes dans les batteries nickel-métal hydrure (NiMH) et permettent de réaliser des gains d'énergie considérable par rapport au batterie nickel / cadmium (NiCd) classique.

Les batteries NiMH ont remplacées les batteries NiCd vers 1990.

Jusqu'à 1990, tous les accumulateurs à électrolyte alcalin comportaient une électrode au nickel à support fritté dans les pores duquel la matière active était déposée électro chimiquement, ou chimiquement par plusieurs opérations successives de précipitation. Pour répondre au besoin croissant des utilisateurs, ces électrodes peuvent aujourd'hui être réalisées de manière différente. Une électrode au nickel à support non fritté se compose d'une structure conductrice tridimensionnelle poreuse: une mousse métallique dans laquelle est introduite une pâte contenant la matière active. Les batteries NiMH sont donc similaires aux batteries NiCd mais elles utilisent un alliage qui absorbe l'hydrogène à la place du Cadmium : le nickel oxyhydroxide (NiOOH) [28].

Tableau 1 : Avantages et inconvénients des batteries NiMH et NiCd[28].

	Accumulateur NiCd	**Accumulateur NiMH**
		
Avantages	*Charge simple et rapide, même après une longue période de stockage. *Grande durée de vie en nombre de cycle de charge et de décharge. *Faible coût.	* Contient beaucoup plus d'énergie que le Nickel-cadmium. *Peu sensible à l'effet mémoire. *Simple à stocker et transporter. *Moins pollueur que le Nickel-cadmium.
Inconvénients	*S'autodécharge assez rapidement (20% / mois). * Effet mémoire (diminution progressive de la quantité d'énergie que l'accumulateur peut délivrer). * Polluant (le Cadmium peut être source de pollution).	* Ne supporte pas le dépassement de charge. * Il ne faut pas les décharger complètement.

- **Les Mousses de Titane *(Open Cells)* dans le domaine médical**

Les mousses de Titanes à cellules ouvertes sont utilisées pour leur biocompatibilité, c'est-à-dire la bonne acceptabilité par l'organisme humain du titane et la possibilité d'avoir des cellules de forme et de taille contrôlées, proches de la structure des os humains.

- **Les implants dentaires :**

Le but des implants dentaires conçus en mousse de titane est de remplacer des dents abîmées. Contrairement aux implants classiques faits de titane massif, l'implant de mousse de titane a une structure poreuse. Cette structure poreuse imite particulièrement celle de l'os humain. Les pores de la mousse permettent aux cellules osseuses de se multiplier dans l'implant et donc de l'ancrer plus solidement à la mâchoire. Il s'ensuivra une guérison plus rapide et l'usage d'implants de taille réduite.



Figure 13 : Un implant dentaire avec pores ouverts [29].

- **Les prothèses de hanche :**

Une prothèse de hanche est un dispositif qui remplace l'articulation de la hanche et permet à cette dernière un fonctionnement quasi-normal. Sur la photo ci-contre, on peut voir une prothèse de hanche en mousse de titane à cellules ouvertes qui imite la structure de l'articulation humaine. La résistance à la corrosion, la biocompatibilité et la propriété des cellules ouvertes (qui favorisent la fixation des tissus) de la mousse de titane rend cette prothèse de hanche très performante.

- **Les Mousses d'aluminium *(Closed Cells)* pour les Crash Box**

Les mousses d'aluminium intéressent particulièrement l'industrie automobile en matière de protection. En effet, les mousses d'aluminium remplacent maintenant, dans de nouveaux véhicules, le profilé métallique des crashs boxes (placé à l'avant du véhicule). La mousse va pouvoir absorber l'énergie cinétique en cas de collision du véhicule bien plus efficacement qu'un profilé métallique standard.



Figure 14 : Crash box utilisant des mousses métalliques régulières d'aluminium [30].

Comparaison d'un crash boxe avec un profilé métallique standard (à gauche) et d'un crash boxe avec une mousse métallique en aluminium (à droite). Le profilé de gauche a été comprimé violemment: on distingue 3 plis principaux. À droite, le même profilé rempli de mousse : les plis d'écrasement sont plus nombreux, ce qui garantit une dissipation d'énergie supérieure.

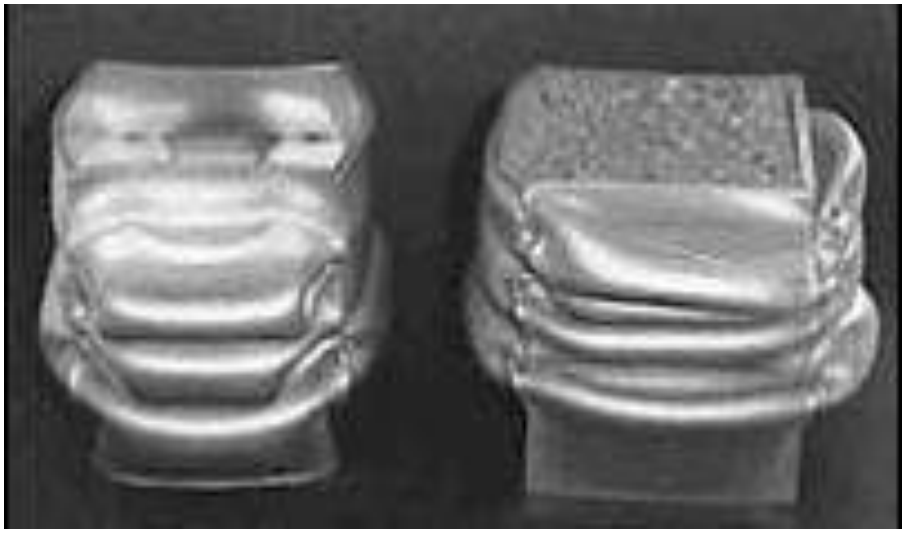


Figure 15: Tube profile en acier pour structure pare-chocs. (a) Tube creux. (b) Tube rempli de sphères creuses métalliques [31].

De plus l'utilisation de mousses métalliques d'aluminium dans les crashs boxes d'un véhicule possède un autre atout majeur : leurs masses réduites (par rapport au profilé standard). Pour terminer, les mousses grâce à leur comportement anisotropique assurent leur fonction quel que soit la direction du choc, contrairement à la plupart des crash-box actuels qui sont davantage conçus pour un choc frontal.

- **Les Mousses métalliques Haynes 25 *(Open Cells)* pour réduire le bruit des turboréacteurs**

Le bruit des moteurs d'avion est un fléau pour les habitations à proximité des aéroports. Des chercheurs de la Nasa ont utilisé des mousses métalliques (compatibles avec la région proche des pâles du rotor) comme doublure acoustique. Ces mousses métalliques appelées Haynes 25 sont des mousses à cellules ouvertes composées de 50% de Cobalt, 20% de Chrome, 15% de Tungsten et 10% de Nickel. Ces mousses métalliques étant à cellules ouvertes, elles sont idéales comme barrière acoustique au bruit créé par le rotor.

Le son est produit par des vibrations dans un milieu élastique. Dans l'air, il se déplace à une vitesse de 343 m / s, mais il se déplace beaucoup plus rapidement dans les solides. Or les mousses métalliques à cellules ouvertes sont extrêmement poreuses. Les ondes acoustiques sont fortement atténuées lorsqu'elles traversent ces mousses principalement constituées d'air.

Les mousses métalliques Haynes 25 peuvent être utilisées jusqu'à 1000°C et présente une forte résistance à l'oxydation. De plus, leurs propriétés mécaniques permettent leur utilisation à l'intérieur de turboréacteur.



Figure 16 : Des turboréacteurs [32].

- **Les mousses métalliques de cuivre *(Open Cells)* pour des échangeurs thermiques (caloducs)**

Les mousses métalliques à pores ouverts peuvent être utilisées pour le transfert de chaleur dans des applications telles que l'échangeur de chaleur, boucliers thermiques de stockage de chaleur, ou même des condensateurs.



Figure 17 : Distribution de la chaleur autour d'une mousse métallique à pores ouverts [33].

Les ordinateurs d'aujourd'hui renferment quelques minuscules caloducs emplis d'eau et d'une mèche de métal fritté en poudre qui transfère la chaleur du processeur au système de refroidissement. En chauffant, le processeur fait bouillir l'eau, la vapeur gagne l'autre extrémité du caloduc, où elle se condense après avoir transféré la chaleur au système de refroidissement.

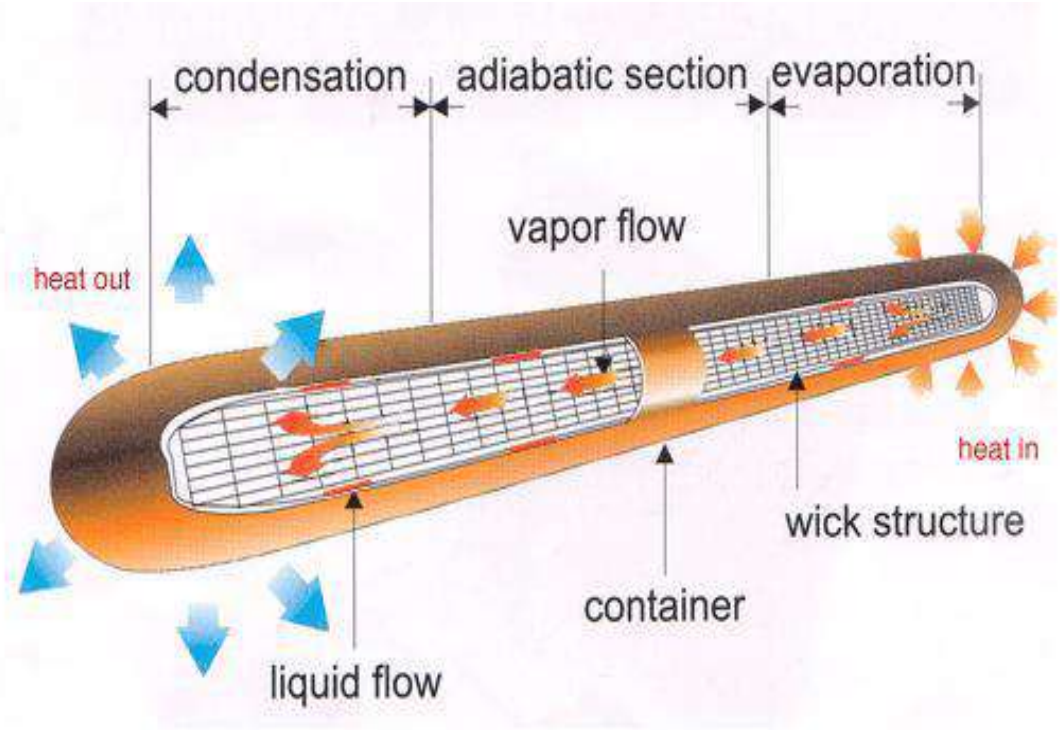


Figure 18 : Système de refroidissement dans les machines frigorifiques [34].

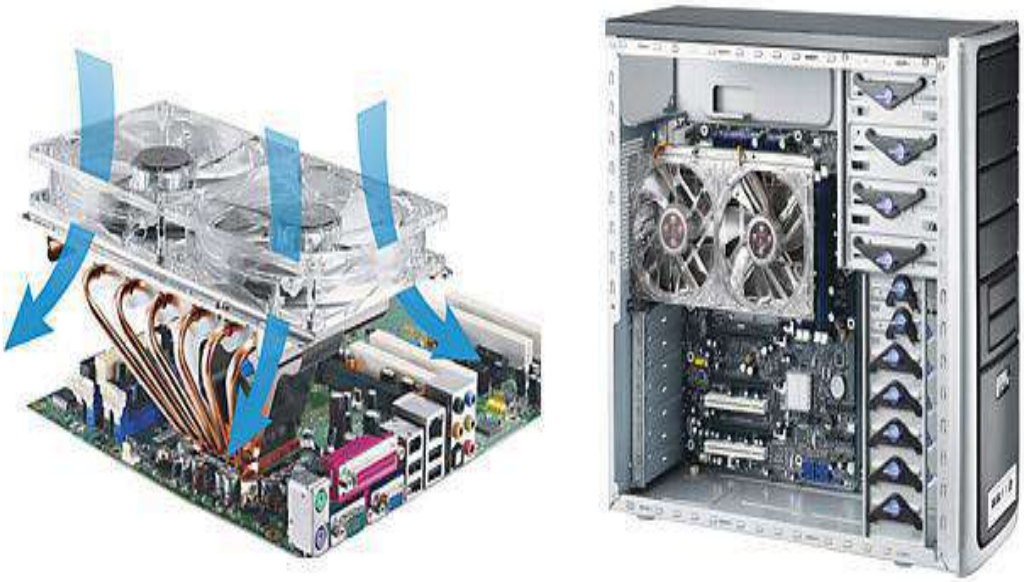


Figure 19 : Système de refroidissement d'ordinateur (carte mère) [35].

Pour accroître l'efficacité du système, l'entreprise Metafoam a développé des caloducs avec une structure respirant. Les caloducs Metafoam sont en mousse de cuivre à pores ouverts.

Cela permet d'améliorer de 200 % le transfert de chaleur, la vitesse et la force de capillarité des caloducs. En effet, la surface de contact entre le liquide présent dans le caloduc et le métal est augmentée grâce aux mousses métalliques à pores ouverts.

Lorsqu'ils sont correctement dimensionnés, les caloducs en mousse métallique offrent une conductivité thermique bien plus élevée que les métaux usuels (cuivre et aluminium), ce qui les rend supérieurs à la simple conduction. Dans certains cas favorables et en association avec des radiateurs de grande taille, ils permettent de se passer de ventilation.



Figure 20 : Photographie d'un caloduc qui sert au domaine de pétrochimie [32].

I.5.2- Structures sandwichs à noyaux mousse métallique

L'utilisation de structures sandwichs est en importante croissance. Elle touche de nombreux domaines, notamment les transports, la marine, le nautisme, l'aéronautique, l'aérospatial, les sports et loisirs, l'industrie lourde, le génie civil et l'armée. Aussi les technologies les mettant en œuvres évoluent constamment ce qui en fait un procédé pouvant être de haute technologie.

Généralement le sandwich est utilisé dans les applications où le rapport rigidité/masse volumique de la structure apparente doit être le plus élevé.

Un sandwich est constitué de deux peaux (ou semelles) entre lesquelles se trouve une âme creuse ou pleine, qui maintient leur écartement.

L'âme d'un sandwich a pour rôle principale de résister aux efforts de cisaillement tandis que les peaux externes doivent avoir un haut module d'Young et une grande résistance à la compression et à la traction.

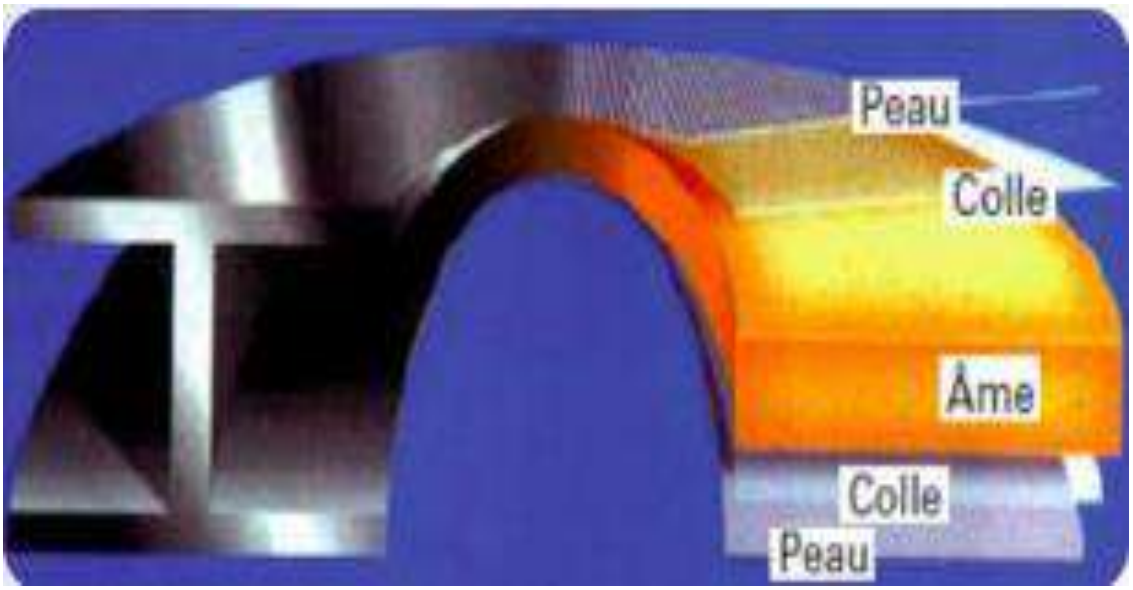


Figure 21 : Comparaison entre une poutre IPN et une structure sandwich [20].

I.5.3- Rigidité des structures sandwichs

Auparavant les sandwichs à peaux métalliques et âmes en mousses polymères étaient utilisées pour les coques de bateaux ainsi que les structures allégées pour l'aéronautique. Les polymères ont pour avantage de pouvoir agir comme isolant thermique cependant ils ont tendance à flamber à température ambiante. Les structures nid d'abeilles sont utilisées depuis qu'elles ont une rigidité plus importante et un module de cisaillement supérieur à ceux des mousses polymères.

La problématique des noyaux en nid d'abeilles concerne leur perméabilité à l'eau et à l'humidité provoquant ainsi des risques de dégradation de la structure (par exemple pour les nids d'abeilles en papier Nomex1).

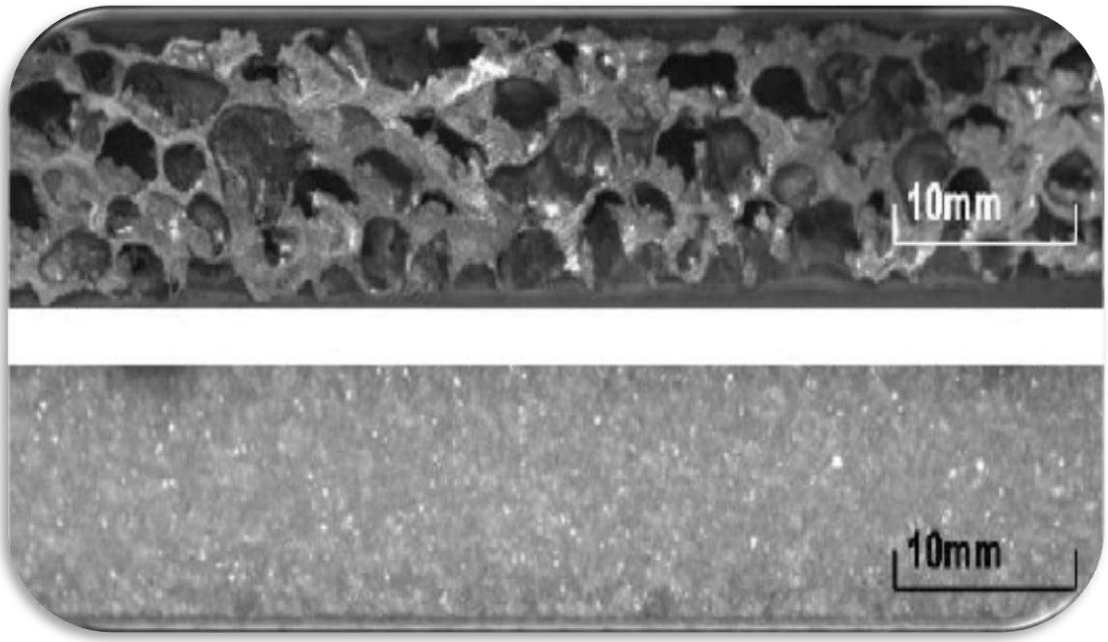


Figure 22 : Comparaison de structure sandwich : en haut mousse métallique Alporas® à cellules fermées, en bas mousse polymère Divinycell® [37].

Nous nous basons ici sur un comparatif entre deux structures sandwichs, l'une à âme en mousse polymère Dinivycell®, et l'autre à âme en mousse aluminium Alporas®. Les peaux sont dans ce cas en Twintex®, composite à renfort en fibres de verre et matrice polypropylène. Sur les résultats de test en flexion ci-contre on remarque une limite élastique plus faible pour l'âme en mousse métallique par rapport à l'âme en mousse polymère. Cependant l'intérêt de la mousse aluminium est son comportement ductile, préféré à un comportement fragile dans le secteur aéronautique car plus facilement détectable avant rupture. L'âme en mousse métallique garde une bonne résistance jusqu'à 7% de déformation tandis que la mousse polymère chute des 4,25%.

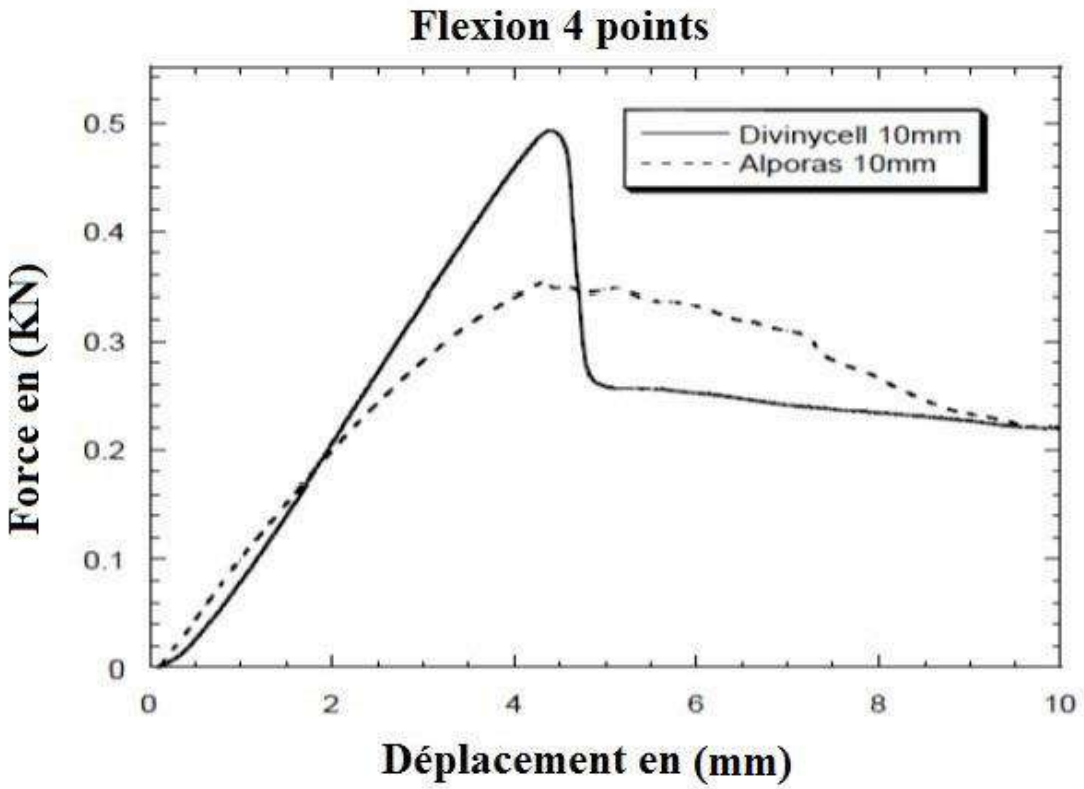


Figure 23 : Comparaison entre deux structures sandwichs Dinivycell & Alporas [38].

I.5.4- Résistance à l'impact

L'un des principaux intérêts des structures sandwichs en plus de leur rigidité concerne leur résistance à l'impact, très fréquent dans le domaine de l'aéronautique. Les impacts localisés comme la chute d'outil, les grêlons, les impacts d'oiseaux ou des débris peuvent causer des lésions au niveau de la peau, du noyau ou à l'interface. Ces types de dégradation diminuent fortement les résistances mécaniques à la traction, compression et à la flexion à cause du phénomène de concentration de contraintes. La résistance à l'impact d'une structure sandwich est directement influencée par la capacité d'absorption d'énergie de l'âme qui la compose.

Le comportement d'une âme en nid d'abeilles et celui d'une âme en mousse sont alors tout à fait différent face à ce type de sollicitation. L'âme en mousse aura tendance à diffuser l'énergie de l'impact à l'intérieur même du sandwich en l'absorbant dans sa structure cellulaire. Le nid d'abeilles a une construction qui transmet directement l'énergie d'une peau à l'autre risquant d'entraîner la déchirure de la peau opposée [39].

I.5.5- Métal poreux polymère composite (MPPC)

Comme nous l'avons vu précédemment les mousses possèdent des propriétés mécaniques relativement faibles, trop pour être utilisées comme pièce de structure [40,41]. De plus elles restent cher (~100€/m² pour une épaisseur de 1cm). Cependant il est possible d'améliorer les propriétés mécaniques des mousses métalliques pour un faible coût grâce à l'injection de polymère dans les cellules ouvertes des mousses. Cette technologie nécessite donc d'utiliser les mousses à pores ouverts.

Ces mousses sont donc fabriquées selon le procédé, qui permet de contrôler précisément le taux de porosité ainsi que le diamètre des cellules. Suite à l'injection du polymère on obtient un matériau composite métal polymère dont le comportement mécanique est fortement amélioré tout en gardant une densité inférieure de 40% à celle du métal massif.

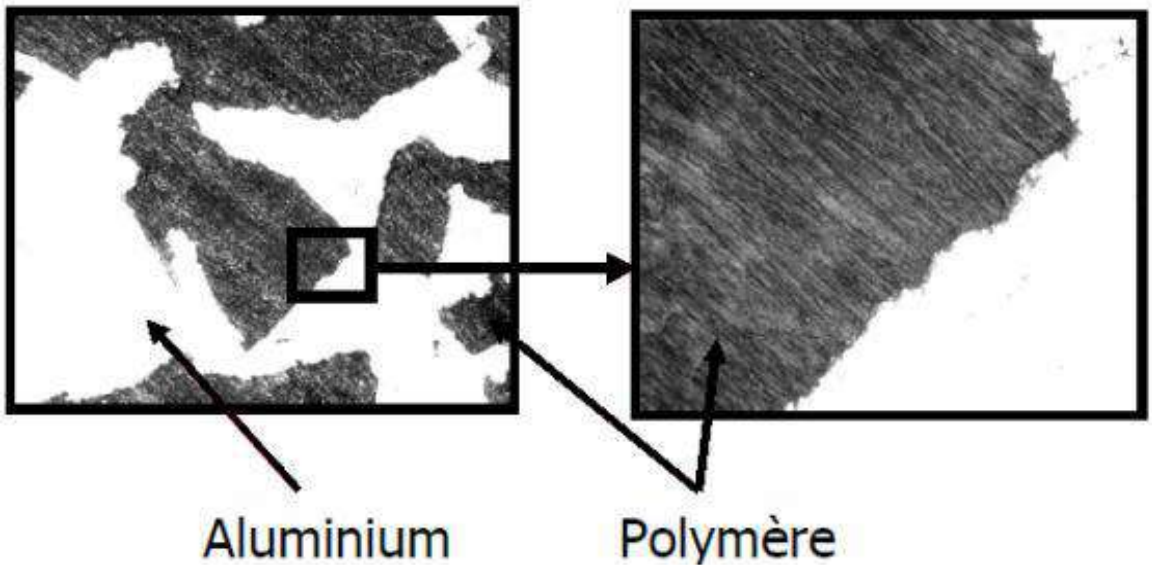


Figure 24 : Microscopie d'un matériau poreux composite [42].

I.6- Conclusion

La science des matériaux associe depuis toujours les mousses aux formes que peuvent prendre certains polymères. Les scientifiques ont eu l'ambition de créer des mousses de métaux afin d'obtenir de nouveaux matériaux combinant les avantages de la morphologie unique de mousses avec les propriétés connues de métaux. Nées aux USA au début des années 50, les mousses métalliques sont déjà largement utilisées dans l'industrie.

Dans ce rapport, nous avons pu décrire les différents types de mousses existantes aujourd'hui, leurs nombreux types de mises en forme ainsi que leurs propriétés mécaniques.

Extrêmement légères et très isolantes, car contenant jusqu'à 95 % d'air, elles sont également conductrices de l'électricité, leurs porosités peuvent contenir des gaz, des poudres, voir des médicaments. Lors de cette étude, nous avons vu qu'il existe déjà beaucoup d'applications avec ce type de matériau.

Chapitre II :

Techniques expérimentales et matériaux de l'étude

Pour ce travail, les matériaux métalliques ont été caractérisés, ce qui a nécessité des techniques diverses et variées. De plus, la densité relative variée de ces matériaux nous a amené à développer des adaptations aux techniques de laboratoire classiques. Dans ce chapitre, nous exposerons les différents moyens d'élaboration et de caractérisation des matériaux cellulaires métalliques. Il s'agit plus précisément des alliages binaires à bases de l'étain et plomb dont la teneur en étain est de 50%. Les matériaux poreux ont été élaborés par le procédé de réplication inverse par **Belhadj et al** [44]. Une caractérisation microstructurale, des essais mécaniques en traction ont été réalisé pour prédire leurs aptitudes mécaniques.

La réalisation de ce travail a nécessité l'utilisation de diverses techniques expérimentales complémentaires et propres à chaque étape.

II.1Matériaux utilisés

Les lingots de Sn-Pb utilisés ont la composition de 50% en poids de Sn (de marque DALL'ORTODAL 1892).

Le matériau cellulaire obtenu par le procédé de réplication inverse est représenté en Figure 26



Figure 25: Photographie de l'échantillon obtenu par le procédé de réplication inverse de granulométrie de 2 mm [44].

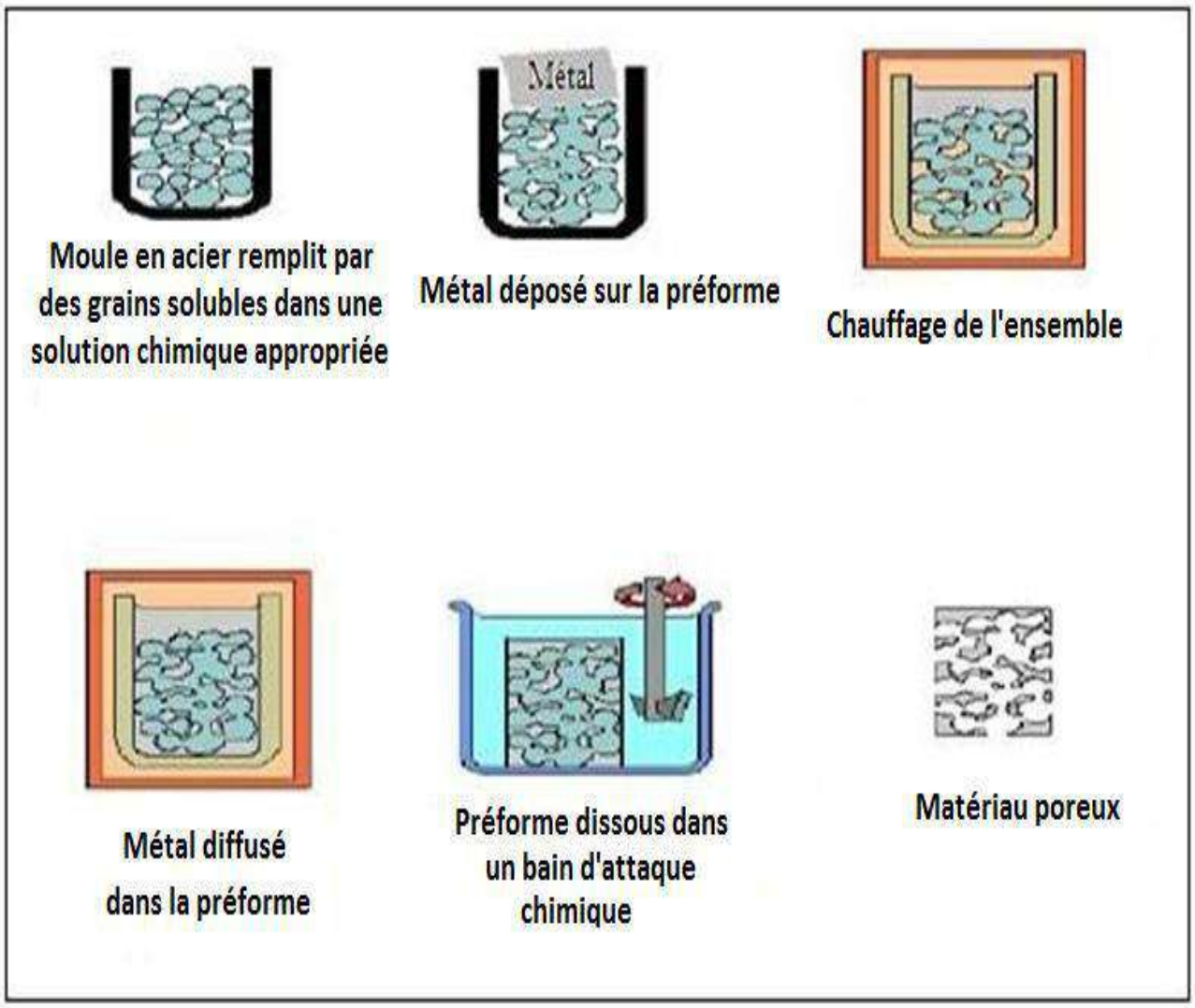


Figure 26 : Principe de la méthode d'élaboration des matériaux poreux par le procédé de réplication inverse [44].

II.2 Mesure de la conductivité électrique

Lorsque l'on met un métal en présence d'une solution aqueuse, les grains s'adsorbent (c'est-à-dire se fixe) sur la surface puis vont réagir avec le métal, et le problème de corrosion a pris naissance.

Dans le but de vérifier la dissolution totale des grains utilisés lors de l'élaboration de nos échantillons poreux, des mesures de conductivités électriques ont été réalisées avec un conductimètre à électrode, sur l'eau distillée dans laquelle est plongé notre échantillon.

Dans un premier temps, nous avons mesuré la conductivité électrique de l'eau distillée utilisée avant de plonger l'échantillon. Et dans un second temps, une mesure a été effectuée sur la solution après l'extraction de l'échantillon poreux.

II.3 Découpe des échantillons par le processus d'électroérosion

Que ce soit pour des examens microscopiques ou pour des essais mécaniques sur les matériaux cellulaires qui ont été examiné, nous avons besoin d'une dimension d'échantillon qui va servir à l'étude. Ceci est conçu, en faisant des découpes par le processus d'électroérosion.

Ce processus a été découvert dans les années cinquante, il était utilisé pour détruire des vis perdues en construction mécanique.

L'électroérosion est un procédé d'usinage qui consiste à enlever de la matière dans une pièce en utilisant des décharges électriques comme moyen d'usinage (voir fig28).

Cette technique se caractérise par son aptitude à usiner tous les matériaux conducteurs de l'électricité, quelle que soit leur dureté. Pour usiner par électroérosion, 4 éléments sont nécessaires:

- Une électrode
- Une pièce
- Solution du diélectrique
- De l'électricité

Le diélectrique utilisé dans notre étude est le kérosène. Il a comme tâche de réduire la température dans la zone d'usinage, d'enlever les particules métalliques résiduelles et de permettre la création de l'étincelle.

Le processus d'étincelage comprend 6 phases :

1 - Approche de l'électrode vers la pièce. Les deux éléments sont sous tension.

2 - Concentration du champ électrique vers le point où l'espace électrode-pièce est le plus faible.

3 - Création d'un canal ionisé entre l'électrode et la pièce.

4 - Claquage de l'étincelle. La matière de la pièce fusionne localement, se consume.

5 - Implosion de l'étincelle. La dimension des étincelles varie entre quelques microns et 1mm.

6 - Evacuation des particules métalliques par un arrosage de diélectrique.

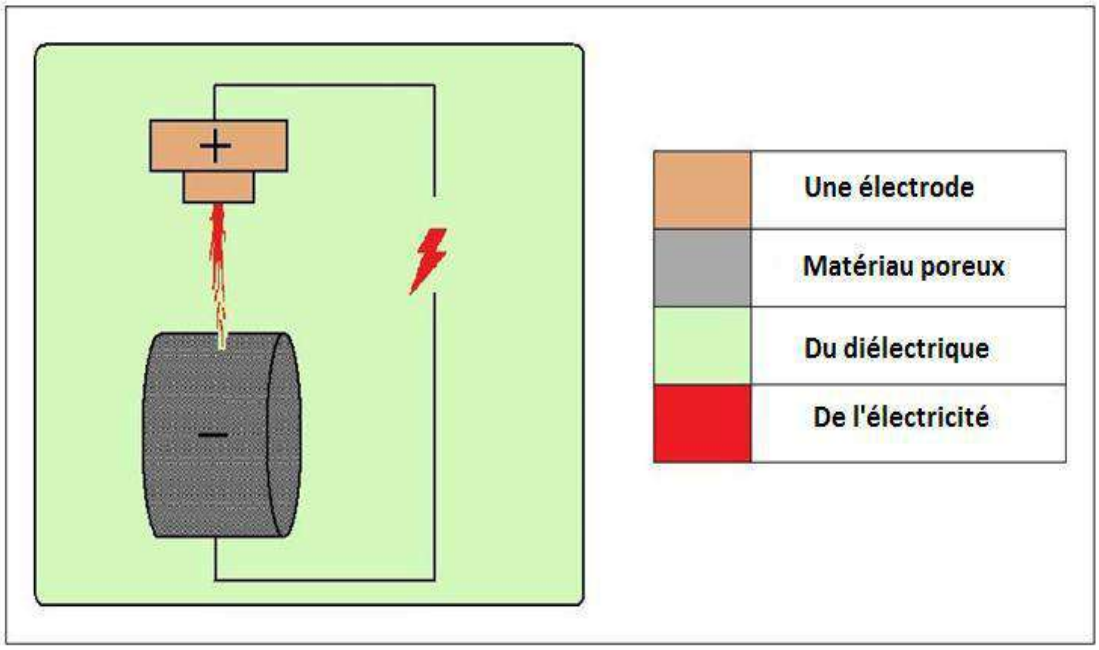


Figure 27 : Schéma du principe du processus d'électroérosion [44].

II.4 Techniques de caractérisation structurale

II.4.1 Observations métallographiques

Les matériaux poreux élaborés ont été observés par microscope optique (type ZEISS Axiovert 450). L'échantillon doit remplir une condition de planéité, pour que l'objectif en donne une image entière nette, faute de quoi on ne peut en observer qu'une portion restreinte.

Les échantillons sont enrobés dans de la résine (Epofix polymérisant à température ambiante en 12 heures), puis polis par voie mécanique avec passages successifs d'échantillons sur différents papiers abrasifs SiC de grossissement : 220, 400, 600, 1200, 2500 et 4000. La dernière étape du polissage est accomplie par passages d'échantillons sur des draps de feutres pulvérisés par l'OPS (silice colloïdale).

L'échantillon peut alors être observé à l'aide d'un microscope optique, pour contrôler l'état de surface, observer les inclusions non métalliques et les fissures éventuelles sans attaque chimique. Nous avons réalisé des prises de vue des microstructures à différents grossissements avec un appareil photo couplé avec le microscope.



Figure 28 : Photographie d'un microscope optique (type ZEISS Axiovert 450) [46].

II.5 Caractérisations mécaniques des échantillons

II.5.1. Essais mécaniques de traction uniaxiale

Le dispositif expérimental est représenté sur la figure 29. Nous avons utilisé une machine de traction (Zwick/ Materialprüfung 1474) sur laquelle ont été montés deux plateaux parallèles rigidement liés aux traverses fixe et mobile.

La vitesse de déformation de traverse utilisée pour les essais réalisés sur les échantillons poreux élaborés au cours de cette étude est de 2 mm/min et l'allongement a été mesuré avec un capteur de déplacement linéaire LVDT (série SM12) esquissé en figure 29 Le choix de la vitesse de déformation a été fait de façon à ne pas influencer le changement de mécanisme de nos échantillons mousseux.

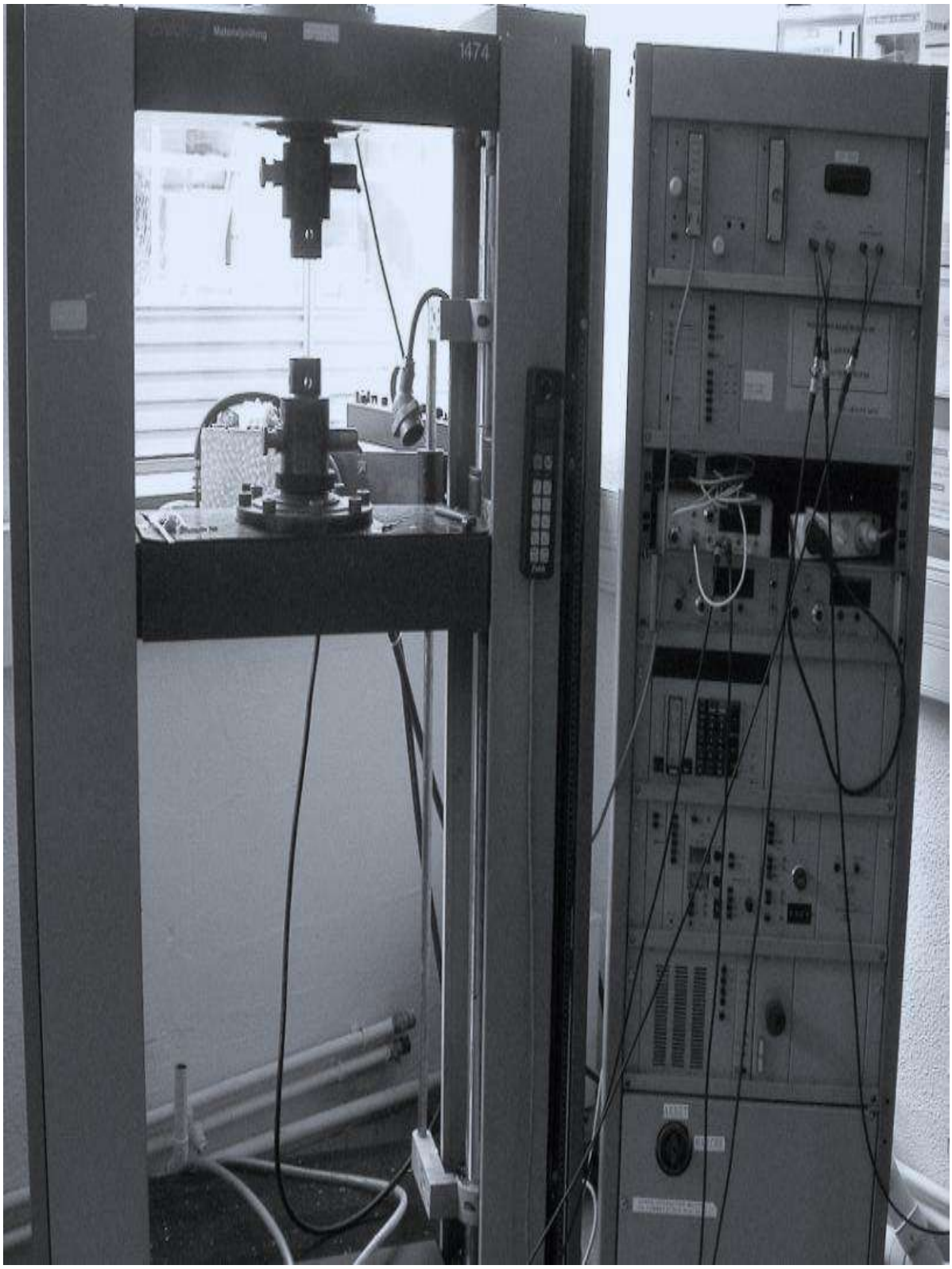


Figure 29 : Dispositif expérimental pour les essais de traction sur les matériaux cellulaires élaborés au cours cette étude [44].

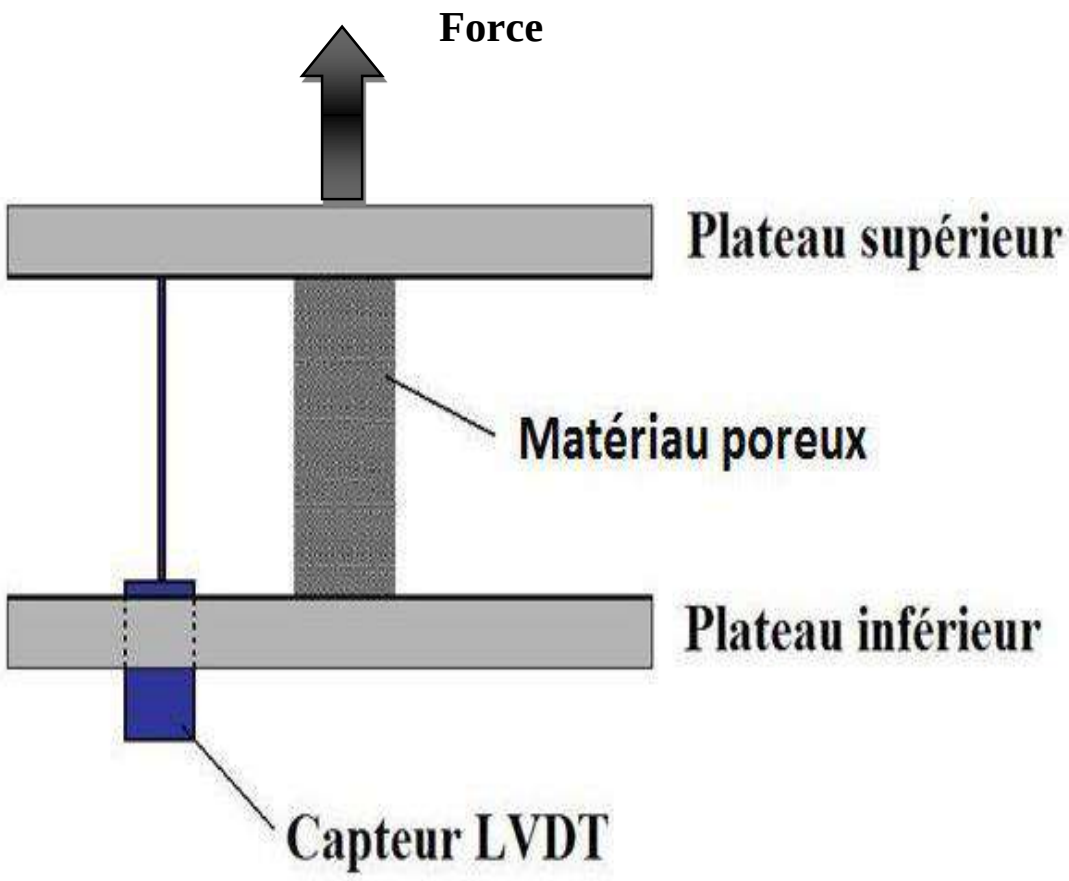


Figure 30 : Croquis des plateaux de la machine d'essai de traction sur lesquels est monté un capteur de déplacement linéaire LVDT [44].

Chapitre III :

Matériaux cellulaires de Sn-Pb Résultats & discussions

Nous avons exposé dans le chapitre 2 l'ensemble des moyens techniques qui ont été utilisés pour la réalisation de ce travail.

III.1. Procédé d'élaboration de matériau cellulaire de l'alliage binaire Sn-Pb

Il s'agit de fabriquer plusieurs préformes de granulométries comprises entre 1,60 et 4,00 mm. La taille des pores des matériaux poreux est étroitement contrôlée en choisissant les tailles des grains appropriées.

Une légère pression de l'ordre de 50Pa a été appliquée sur toutes les préformes de grain ayant la même taille, et ce, pour but d'assurer le contact entre les grains. Afin de mettre au point la valeur de cette pression, nous avons fait un test, simple, rapide, qui par son principe même semblait être le plus apte à rendre compte de la résistance des grains à l'écrasement au cours de traction de la préforme.

Ce test a été appliqué sur les cinq classes de tailles (1,60 ; 2,00 ; 2,50 ; 3,15 et 4,00 mm). Les grains de même classe ont été rangés soigneusement dans le moule en acier, puis il a été appliqué au-dessus une pression verticale à l'aide d'un piston à charge connue. Après l'achèvement de ce test, nous avons assujetti pour une pression appliquée de 50 Pa au cours de cette étude.

Les échantillons ont été préparés à partir d'un alliage Sn-Pb dont la teneur en masse de l'étain est de 50%, afin de se rapprocher de la température eutectique de cet alliage. Des barres de Sn-Pb ont été posées sur la préforme. L'ensemble a été chauffé dans un four à moufle pendant 3 heures et 20 minutes à la température de 460°C. L'alliage s'est complètement diffusé au bout de 60 minutes. Après solidification, la préforme était dissout dans un bain d'attaque chimique approprié. Il en est résulté un matériau cellulaire à pores ouverts dont la structure est le négatif de la préforme utilisée (voir fig.27 du chapitre 2).

Dans le but de s'assurer de la dissolution totale des grains après élaboration des échantillons poreux. Des mesures de conductivité électrique ont été effectuées, sur l'eau distillée avant et après immersion de l'échantillon poreux. Les démarches retenues lors des mesures de conductivités électriques ont été identiques pour tous les échantillons élaborés.

Pour rappel, la conductivité électrique traduit la capacité d'une solution aqueuse à conduire le courant. L'unité de mesure communément utilisée est le siemens par centimètre (S/cm) exprimé souvent en micro siemens/cm. La conductivité est directement proportionnelle à la quantité de solides (les sels minéraux) dissous dans l'eau. Ainsi, plus la concentration en solide dissout sera importante, plus la conductivité sera élevée. Généralement, le rapport entre conductivité et concentration ionique s'exprime par approximation de la façon suivante :

2 µS/cm = 1 ppm (partie par million),

où 1 ppm = 1 mg/l correspond à la concentration en solide dissous.

L'activité ionique d'une solution varie en fonction de la température. Il convient donc, pour effectuer des mesures précises, de tenir compte de la température dans les mesures de conductivité.

Sans surprise, nous avons constaté qu'il n'y avait plus de grain résiduel dans nos échantillons. Ceci confirme que les grains ont un très bon contact qui sert à obtenir un matériau cellulaire métallique à porosité ouverte. Mais cette technique ne peut se révéler que s'il y a eu des grains emprisonnés dans la matrice de Sn-Pb ou non. Une question s'est posée : y a- t-il des grains de la préforme renfermés dans nos échantillons métalliques ?

Pour répondre à la question, nous avons utilisé le même protocole expérimental pour la mesure de la conductivité électrique. Mais cette fois ci, à l'aide d'une perceuse électrique possédant une mèche très fine, nous avons fait des trous partout dans l'échantillon qui est plongée dans l'eau distillée. Le tableau2 illustre les résultats des mesures de conductivités électriques obtenues au cours de cette étude.

Tableau 2 : Valeurs de conductivités électriques mesurées des trois séries d'échantillons de Sn-Pb de taille de pores successivement 1,6mm, 2mm et 3,15mm.

Numéros d'essais	01	02	03
Température lors de la mesure en °C	21	21	21
Valeur de conductivité de l'eau distillée en µS/cm	0,642	0,865	0,623
Valeur de conductivité (eau distillée et mousse) en µS/cm	0,724	0,852	0,601
Valeur de conductivité (eau distillée et mousse percée) en µS/cm	0,724	0,852	0,601

La reproductibilité des résultats des essais de mesure de conductivité réalisés sur les trois échantillons montre qu'il n'y avait plus de sel enfermé dans la matrice de nos mousses élaborées. Le petit écart entre les mesures de conductivité, que nous observons dans le tableau 2, est dû à l'influence de température au cours de la manipulation.

Les échantillons poreux obtenus par le procédé de réplication inverse sont d'abord observées macroscopiquement (voir figure 31).

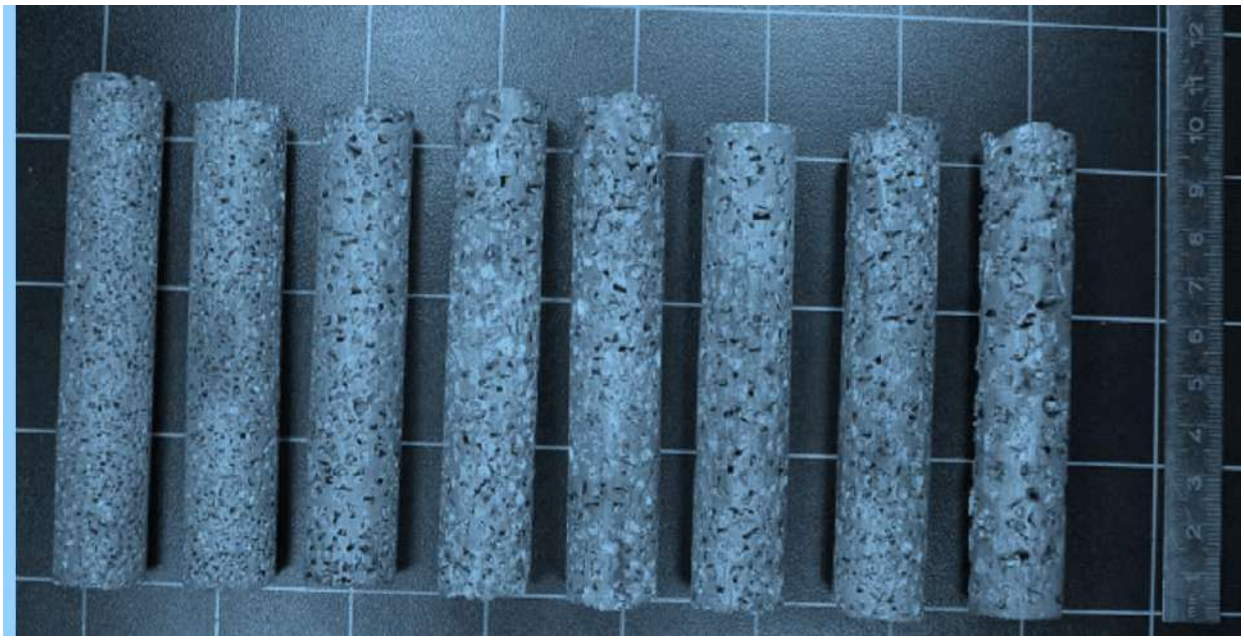


Figure 31 : Photographies des échantillons qui ont servi à l'essai de traction Sn50 Pb obtenus par infiltration de métal liquide en utilisant diverses granulométries de sel.

III.2. Technique de caractérisation structurale

III.2.1. Observations métallographiques

La plupart des métaux couramment utilisés pour leurs propriétés métalliques sont en fait des alliages. Cela conduit à des situations où le matériau est en général polyphasé. Les phases présentes à une température donnée, et leurs proportions respectives peuvent être déduites du diagramme de phase et des densités des phases.

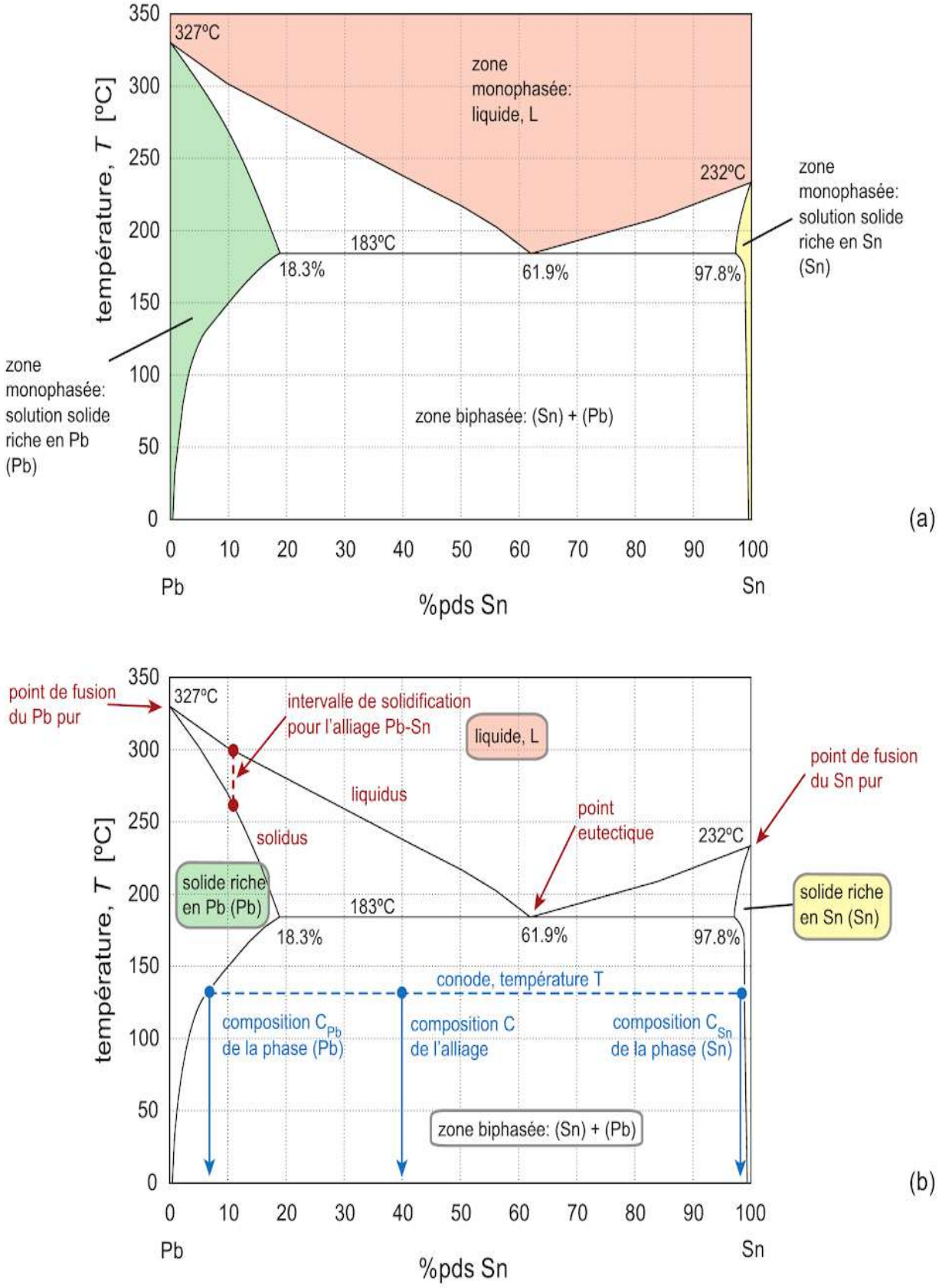


Figure 32: Diagramme d'équilibre de phases de l'alliage binaire Sn-Pb [45].

Diagramme de phase du système binaire Pb-Sn, Montrant plusieurs aspects importants, dans la figure (a), les domaines avec une seule phase sont :
Le liquide – couleur pêche ; la solution solide riche en plomb (Pb) – en vert ; la solution solide riche en étain (Sn)- en jaune. Ces domaines sont séparé par des domaines biphasé, les phases intervenant dans ces zones étant identifiées par les terminaisons des segments horizontaux (appelées conodes), comme montré dans la figure (b) pour le domaine (Pb) (Sn). On peut voir aussi le point de fusion des éléments purs, l'intervalle de solidification de séparent le liquidus et le solidus d'un alliage, et le point eutectique à la plus basse température du domaine liquide.

Ce diagramme comporte:

- une phase Liquide : mélange de α et β tous les deux liquides mélangés.
- une phase α qui est une solution solide de Sn dans Pb.
- une phase β qui est une solution solide de Pb dans Sn.

L'alliage Sn50-Pb50 est biphasé avec une phase riche en plomb qui apparaît plus claire et présente des lamelles avec un espacement un peu inférieur à 10 μm. Les microstructures visualisées à l'aide d'un microscope optique sont montrées en figures 27 et 28.

Les microstructures présentent deux contrastes dénotant l'existence de phases différentes. La zone claire représente la phase riche en étain résultant de la réaction invariante eutectique : Liq → (Sn) + (Pb), dont la teneur massique en étain et de 38,1%, à une température de 183 °C. La zone grise représente le plomb produit de la réaction eutectique.

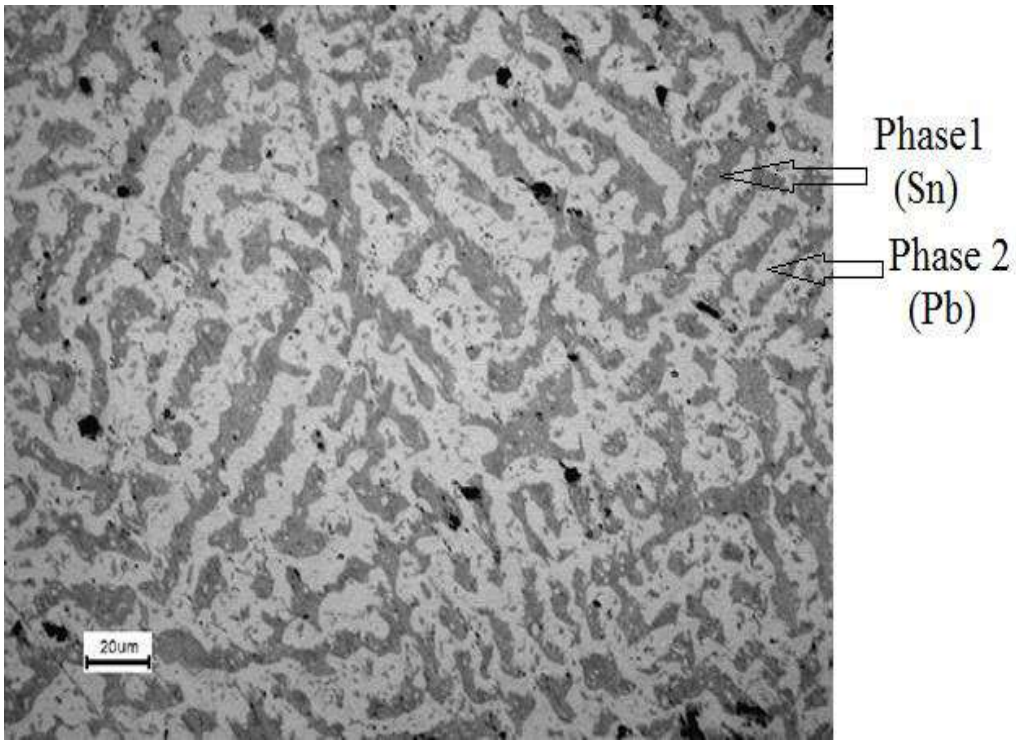


Figure 33: Observation micrographique de l'alliage Sn50-Pb50, de granulométrie moyenne des pores de 1,6mm.

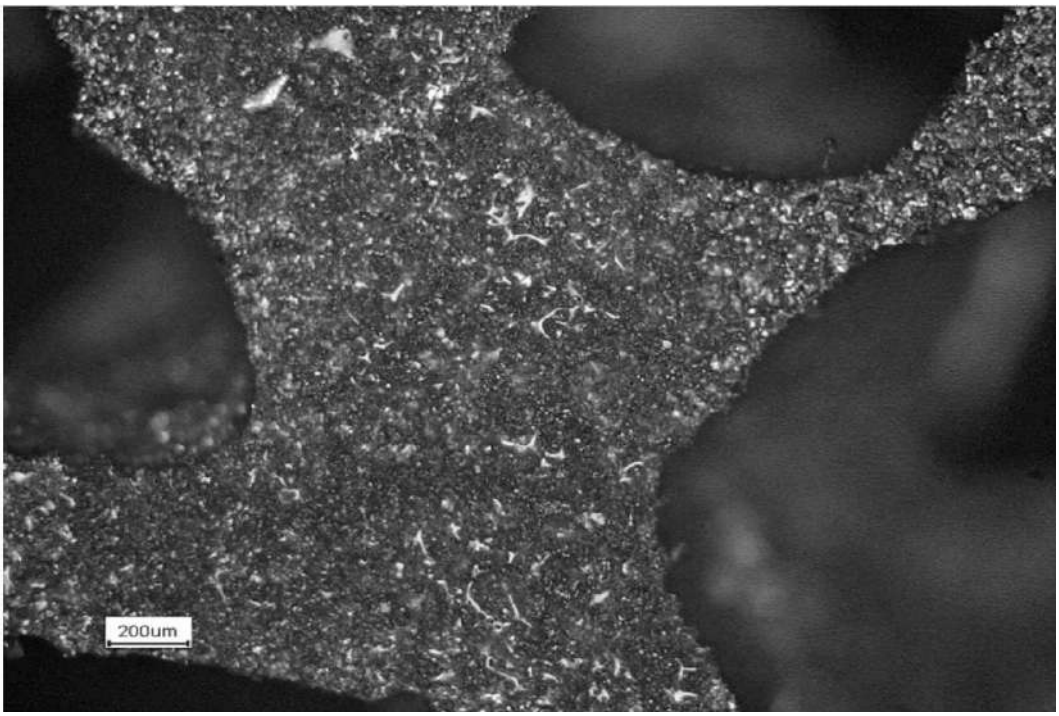


Figure 34: Observation micrographique de la mousse métallique Sn50-Pb50, de granulométrie moyenne des pores de 3,15mm.

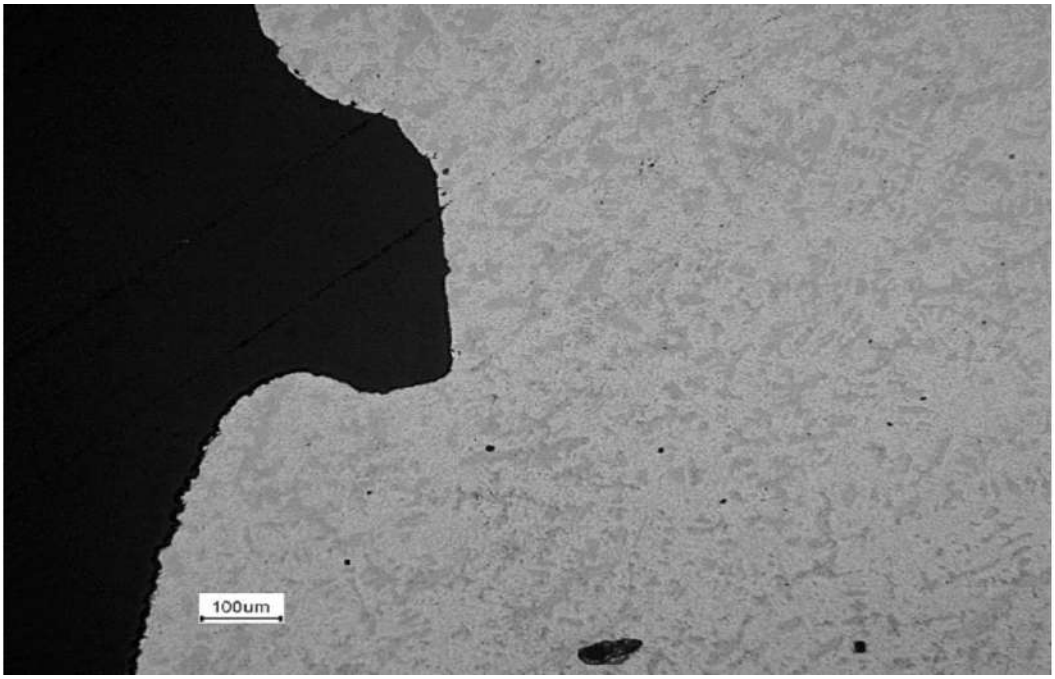


Figure 35: Observation micrographique de la mousse métallique Sn50-Pb50, de granulométrie moyenne des pores de 2.50mm.

III.3. Caractérisations mécaniques des matériaux poreux Sn-Pb

III.3.1. Mesure de la densité relative

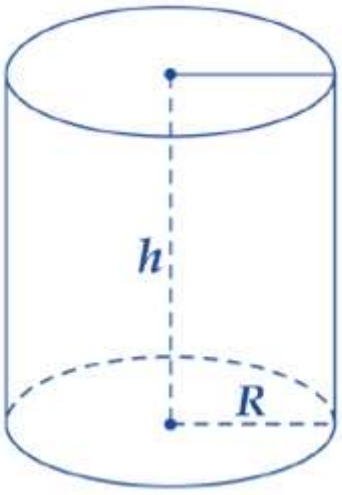
La caractéristique principale des matériaux cellulaires est leur densité relative : ρ^*/ρ, où ρ^* est la densité du solide cellulaire et ρ la densité du solide dont il est constitué (ρ de l'alliage Sn-Pb utilisé dans cette étude est de 8,86 g/cm^3). Vu la forme cylindrique de nos échantillons, nous avons pu calculer leur densité relative géométrique en utilisant la formule suivante :

$\rho^* = m / \pi R^2 .h$ **…….. 3**

où m est la masse de l'échantillon,

R est le rayon,

h est la hauteur et $\pi = 3,14$.



Cette mesure nécessite le passage par quelques étapes répertoriées ci-dessous :

- A l'aide d'un pied à coulisse on mesure avec précision la hauteur et le diamètre de chaque échantillon.
- Les échantillons sont mis dans l'étuve à 50°C pendant 30 minutes (pour éliminer toute trace d'humidité).
- Les échantillons sont pesés successivement par une balance électronique (Diamond Digital A06) avec une incertitude de mesure de 0,1mg.
- Les résultats obtenus sont récapitulés dans le tableau 3.

Tableau 3 : Récapitulatif des résultats obtenus lors des mesures des densités relatives.

Echantillons	**Granulométries**	**Masse en g**	**Diamètre**	**Hauteur**	**ρ^* En g/cm^3**	**Densité Relative ρ^*/ρ**
A	1,60 mm	196,80	30 mm	100 mm	2,7856	0,3144
B	2,00 mm	230,66	30 mm	100 mm	3,2649	0,3685
C	2,50 mm	262,21	30 mm	100 mm	3,7114	0 ,4189
D	3,15 mm	209,63	30 mm	100 mm	2,9672	0,3349
E	4,00 mm	206	30 mm	100 mm	2,9158	0,3291

III.3.2. Essais mécaniques de traction uniaxiale

Les essais mécaniques de traction uniaxiale ont été réalisés à vitesse de déformation constante (2mm/min), jusqu'à ce que l'échantillon atteigne la phase de rupture.

a- Courbes contrainte-déformation

La figure 35, illustre l'allure de l'essai de traction de l'échantillon de classe B.

Pour rappel :

Contrainte = force/ section

Déformation = allongement / H0

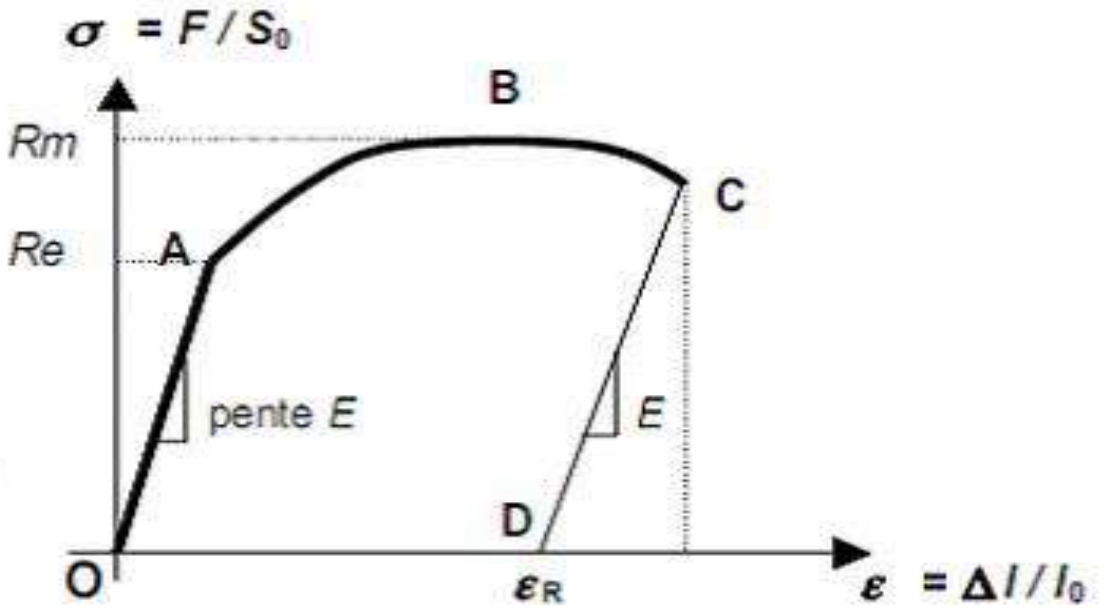


Figure 36: Propriété mécanique du matériau déduites de l'essai de traction[44].

OA : régime élastique (réversible), généralement linaire.

AB : déformation plastique uniforme (écrouissage) .

BC : réduction localisé de la section (striction) .

C : répture .

CD : retrait élastique .

E : module de young .

Re : limite élastique .

Rm : résistance à la traction (contrainte maximale) .

ε_R : $\Delta l_R/li$: déformation rémanente ou après répture .

Z%= $(S_0-S_f)/S_0$ x 100% : coefition de striction .

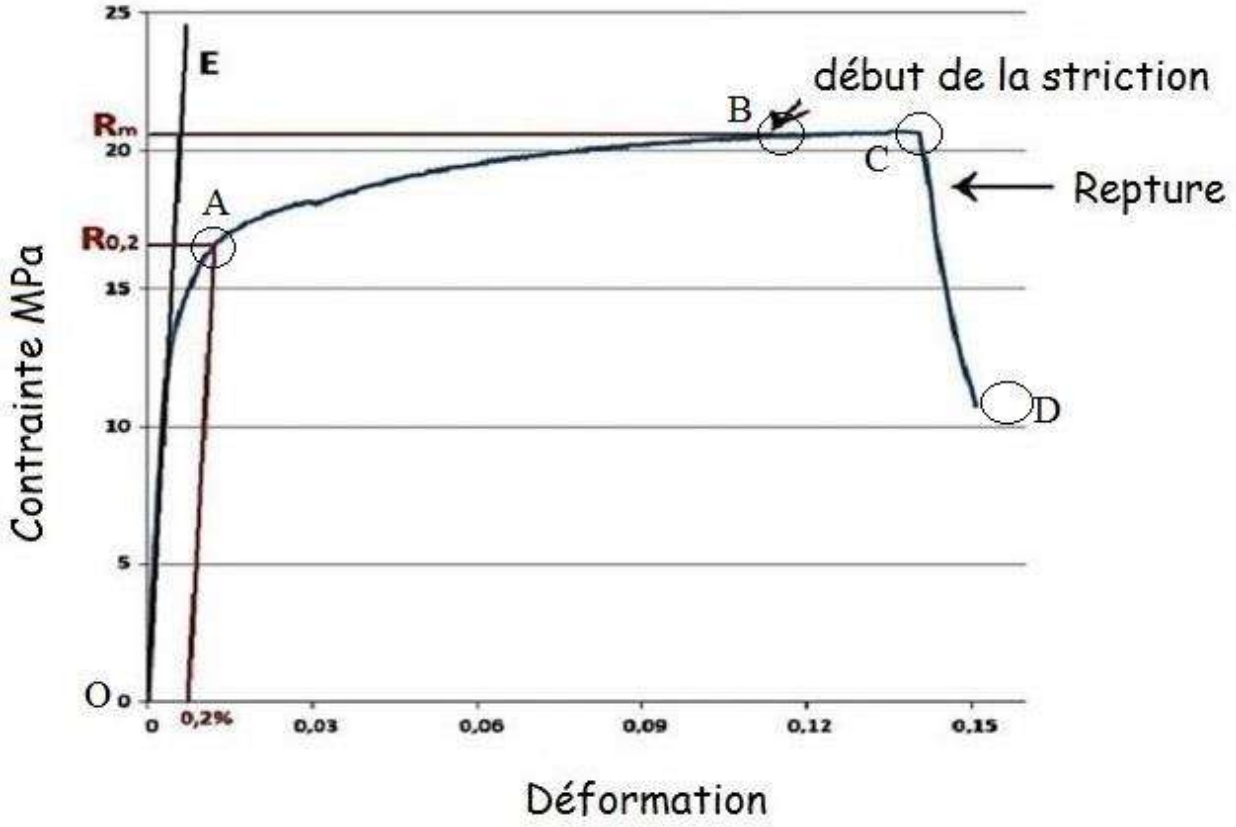


Figure 37: Courbe contrainte déformation obtenue au cours de l'essai de traction uniaxiale sur l'échantillon de classe B.

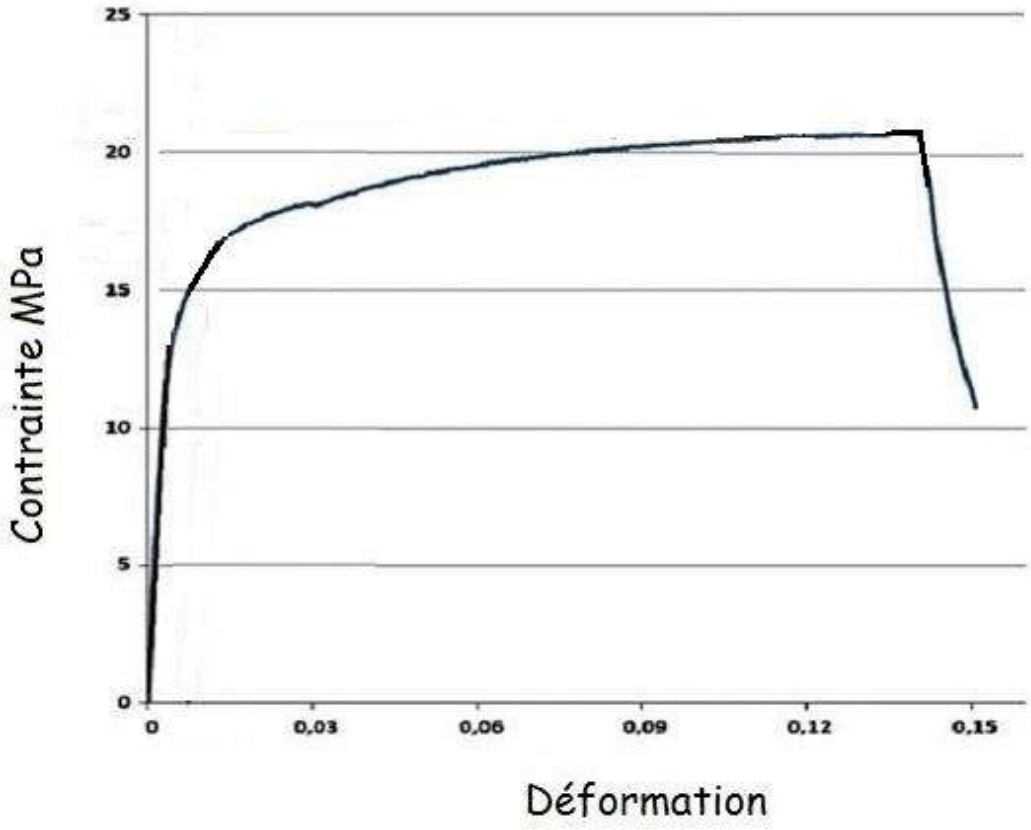


Figure 38 : Courbes contrainte déformation obtenue au cours de l'essai de traction uniaxiale sur l'échantillon de classe B.

La méthode de détermination de la contrainte de plateau σ_p est également schématisée sur la figure 36. σ_p correspond à l'ordonnée du point d'intersection entre les tangentes tracées dans la partie linéaire et sur le plateau (σ_p = 3,16 MPa sur cet exemple).

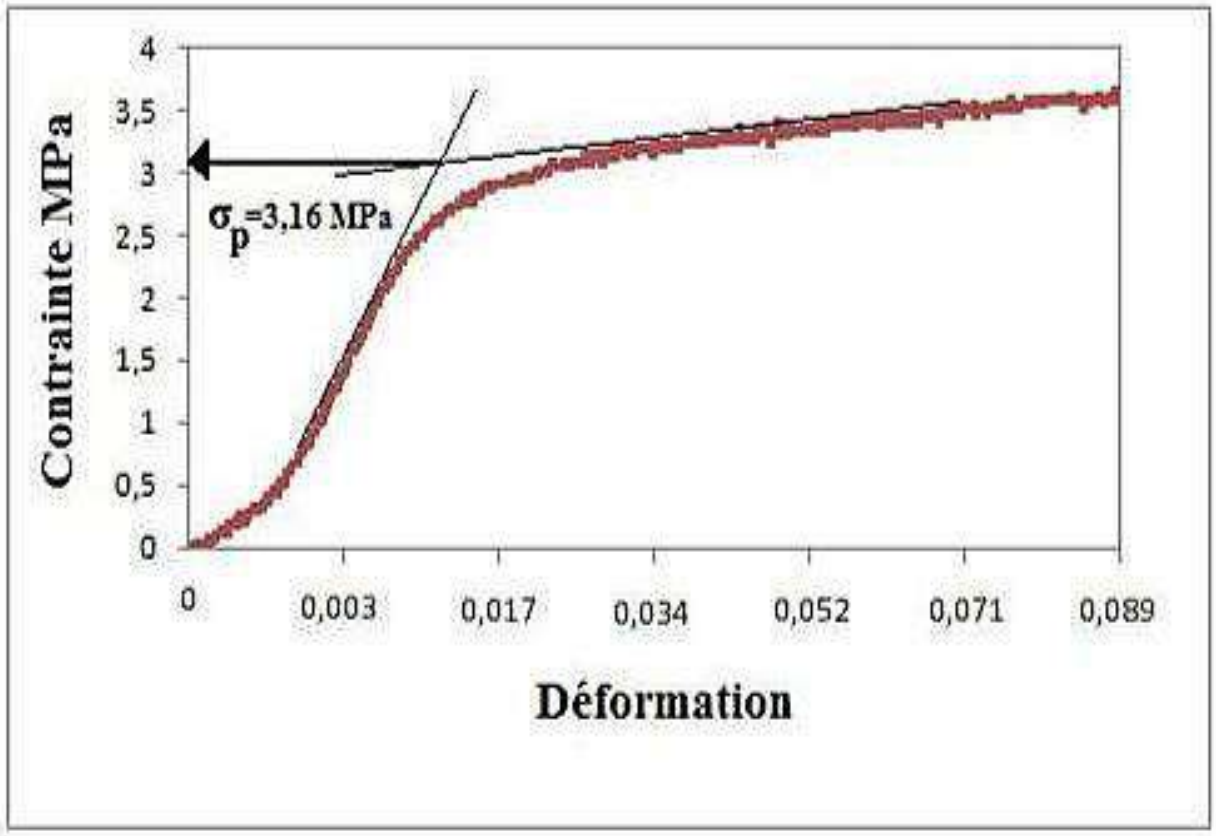


Figure 39: Agrandissement de la courbe de traction pour les faibles déformations. Schématisation de la méthode de détermination de la contrainte plateau σ_p.

Ces matériaux cellulaires ont un comportement ductile, aucun pic n'est visible ni au début ni le long du plateau, la plastification des éléments s'effectue sans rupture.

La figure 39 présente la totalité des courbes contraintes-déformations de cinq échantillons types de leur classe de granulométrie, de différentes tailles de pores et densité relative.

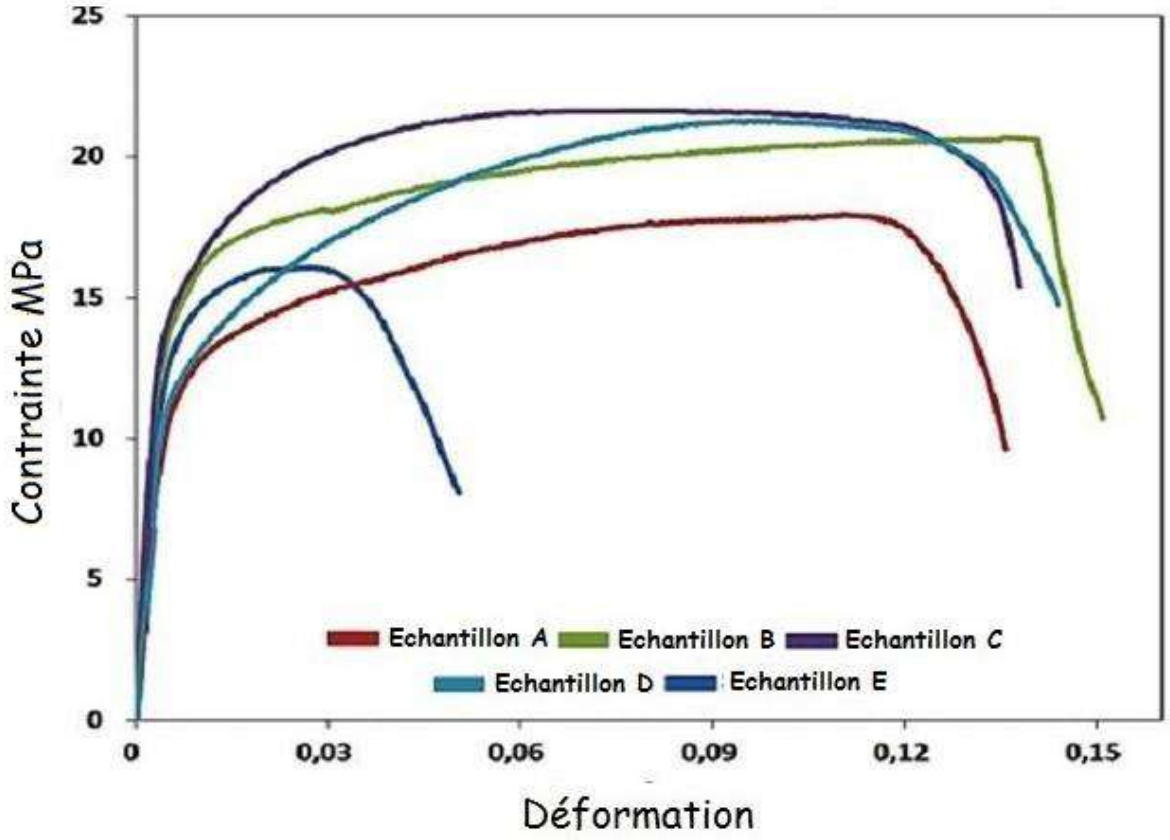


Figure 40 : Courbes contrainte-déformation obtenues au cours des essais de traction uniaxiale sur cinq échantillons type de leur classe de granulométrie.

On remarque bien que toutes les courbes de compressions sont semblables, mais diffèrent en fonction de la densité relative de chaque échantillon. La taille de pore ne semble pas autant influer sur le comportement que la densité relative.

b- Identification de la contrainte de plateau

L'analyse de la courbe contrainte-déformation a mis en évidence un caractère très ductile et une absence de pic pour signifier le début de plateau. La méthode de détermination de la contrainte de plateau σ_p est schématisée sur la figure 31 les valeurs ont été reportées dans le tableau 4.

Tableau 4: Valeurs des contraintes de plateau correspondantes à chaque échantillonne valeur moyenne pour chaque mousse.

Echantillons		**Densité relative ρ^*/ρ**	**Contrainte de plateau σ_p (MPa)**
A	n°1	0,3135	13,55
	n°2 (échantillon type)	**0,3144**	**13,64**
	n° 3	0,3148	13,63
	Moyenne	**0,3142**	**13,6**
B	n°1	0,3635	17,35
	n°2 (échantillon type)	**0,3685**	**17,39**
	n° 3	0,3692	17,42
	Moyenne	**0,367**	**17,19**
C	n°1	0,4183	19,88
	n°2 (échantillon type)	**0,4189**	**18,9**
	n° 3	0,4192	18,8
	Moyenne	**0,4188**	**18,89**
D	n°1	0,3341	18,8
	n°2 (échantillon type)	**0,3349**	**15,19**
	n° 3	0,3353	15,1
	Moyenne	**0,3347**	15,15
E	n°1	0,3283	14,98
	n°2 (échantillon type)	**0,3291**	**14,63**
	n° 3	0,3296	14,65
	Moyenne	**0,329**	14,61

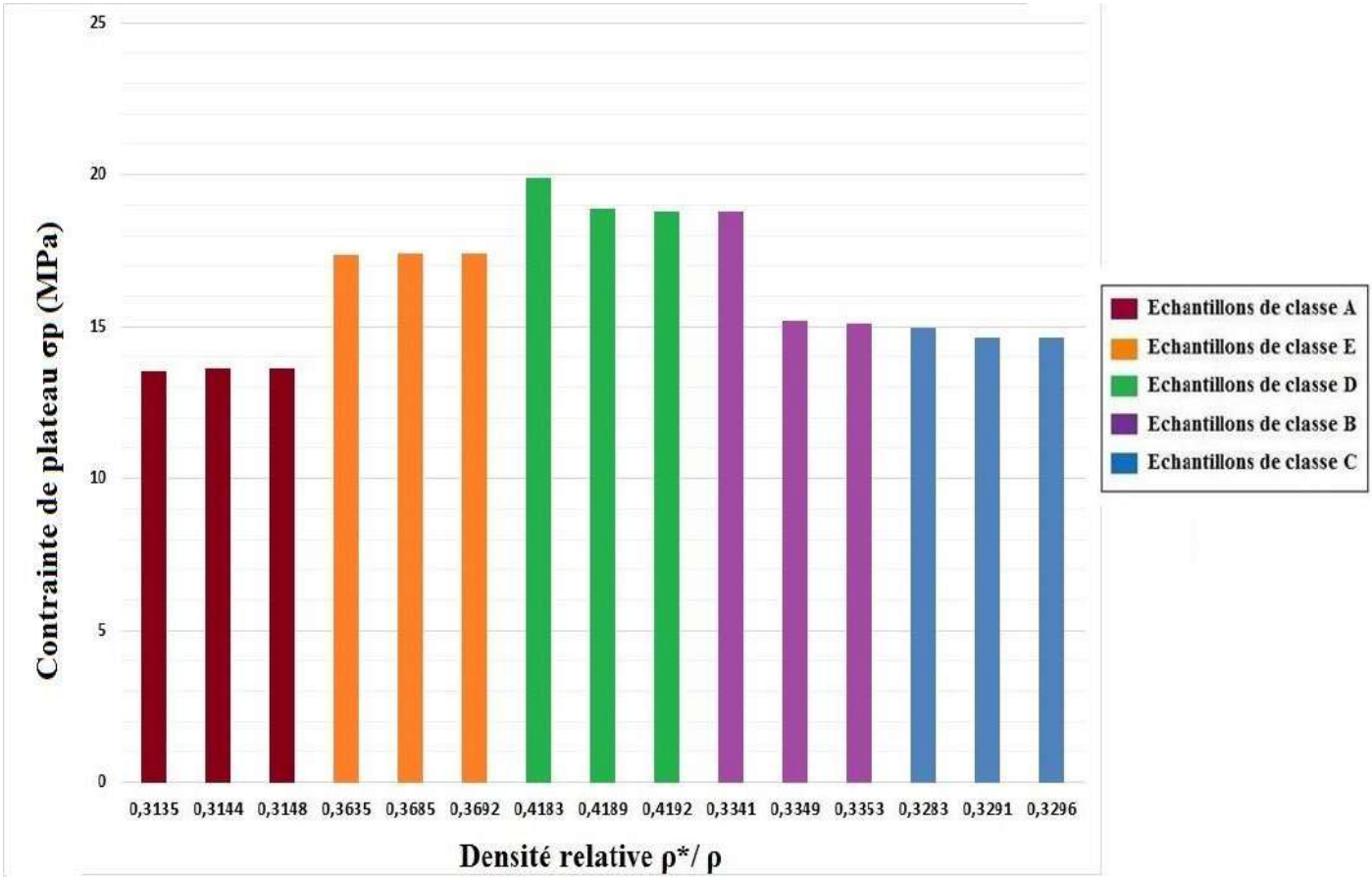


Figure 41 : Histogramme de la contrainte en fonction de la densité relative des matériaux poreux de différentes classes de granulométries étudiées au cours de l'essai de traction uniaxiale.

La forme caractéristique de la courbe de l'essai de traction d'un matériau cellulaire comporte trois zones principales :

1. Une première phase élastique linéaire, limitée aux faibles déformations.
2. Une deuxième phase de plateau zone d'absorption d'énergie.
3. Une troisième de phase de densification caractérisée par une forte hausse de l'effort.

Si l'on considère les deux premières phases, cette courbe se rapproche de celle de l'absorbeur de choc idéal qui consiste en un plateau parfaitement plastique. On voit alors tout l'intérêt de l'utilisation des matériaux cellulaires pour des applications en tant qu'absorbeur d'énergie mécanique. Matériau cellulaire est donc un matériau efficace qui propose une courbe de compression plus régulière que des structures à base de profilé pour dissiper l'énergie mécanique lors de chocs. Comme pour la plupart des matériaux cellulaires, le niveau du plateau est essentiellement piloté par la densité. Une densité plus forte augmente le niveau du plateau

Tableau 5: Les valeurs des contraintes d'écoulement σp correspondant à chaque échantillon et leurs densités relatives.

Echantillon	σ_p (MPa)	σ_0 (MPa)	ρ^*/ρ	σ_p/σ_0	Ln (ρ^*/ρ)	Ln σ_p/σ_0
A	13,64	41	31,44	0,3326	3,4480	1,1005
B	17,39	41	36,85	0,4241	3,6068	0,8576
C	18,9	41	41,89	0,4609	3,7350	0,7744
D	15,19	41	33,49	0,3704	3,5112	0,9929
E	14,63	41	32,81	0,3568	3,4907	1,0304

Les allures des courbes obtenues lors des essais de traction sur nos échantillons poreux nous ont motivé de chercher un modèle adéquat pour décrire ces courbes expérimentales.

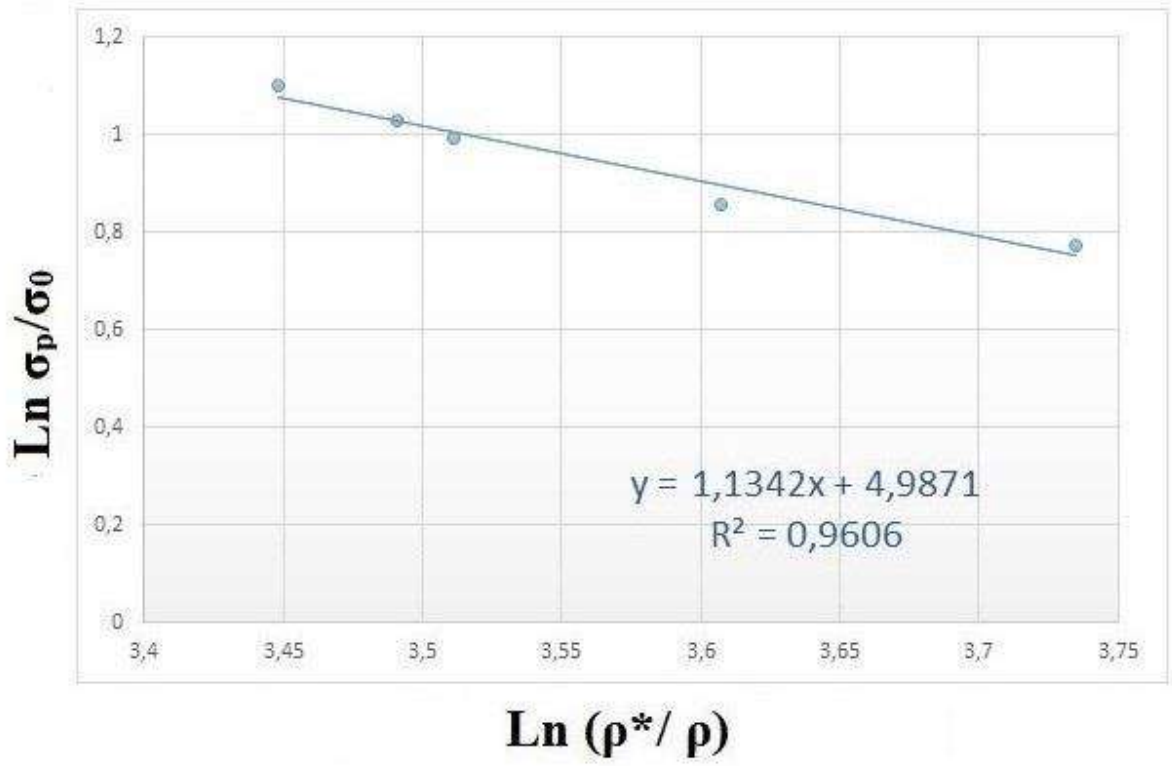


Figure 42 : Courbe représentative de contrainte de plateau versus densité relative.

La fonction de cette courbe :

Y = **Ln σ_p/σ_0**

x = **Ln (ρ^*/ρ)**

Ln $\frac{\sigma p}{\sigma 0}$ = ln C + n ln $\frac{\rho^*}{\rho}$ **…… 4**

Y = 1.1342x + 4.9871 **…… 5**

$\frac{\sigma p}{\sigma 0} = C \left(\frac{\rho^*}{\rho}\right)^n$ **……..…… 6**

n= 1.1342

Cette étude expérimentale nous a conduits à établir une loi analytique expérimentale suivante :

Modèle expérimentale

$$\frac{\sigma p}{\sigma 0} = 3.11 \left(\frac{\rho^*}{\rho}\right)^{1.1342}$$

Erreur de 3.9%

Conclusion générale

Conclusion générale

Cette étude a été entièrement dédié à la parfaite maîtrise de la caractérisation macroscopique, microscopique et mécanique des matériaux poreux élaborés par le procédés de réplication inverse des alliages binaire à base de Sn50-Pb50. Le type des échantillons qui ont servi à l'étude est à cellules ouvertes avec différentes tailles de pores et densités relatives.

Les matériaux poreux sont caractérisés mécaniquement en traction uniaxiale afin de déterminer leur limite d'élasticité σp en fonction de la densité relative. Les essais réalisés en traction uniaxiale sur ces matériaux poreux sont reproductibles concernant l'allure et la contrainte plateau, ainsi que la limite d'élasticité.

D'autre part, la densité relative de ces matériaux poreux à base de Sn-Pb dont la teneur en étain est de 50% influence les propriétés en traction de manière non négligeable. Plus la densité relative augmente, plus la limite d'élasticité n'est élevée.

Références Bibliographiques

Références Bibliographique

[1]. L. Gibson and M. Ashby. Cellular solids: structure and properties. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, 1999.

[2]. C. Janot and B. Ilschner. Traité des matériaux, numéro 19 : Matériaux émergents. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes (PPUR), 2001.10

[3]. GONGXiao-Lu. Mousses métalliques et Composites. 04/2010, Troyes UTT, France, 48p.

[4]. BANHART J. Manufacture, characterization and application of cellular metals And metal foams, «Progress in materials Science, 2001, Vol, 46, pp.559 -632

[5]. https://fr.wikipedia.org/wiki/Mousse_métallique 08/04/2017

[6]. L. Gibson and M. Ashby. Cellular solids : structure and propretés. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, 1999.

[7]. BANHART J. Manufacture, characterisation and application of cellular métals And métal foams, «Progress in materials Science, 2001, Vol, 46, pp.559 -632

[8]. Les mousses métalliques : un potentiel d'applications à découvrir 2009

[9]. Institut de développement de produits 4805, rue Molson 23 novembre 2009

[10]. Mousses métalliques CTIF CastFoam® » [archive], sur ctif.com

[11]. San Marchi C., Mortensen A., "Deformation of open-cell Aluminum Foam", Acta materialia, p49 (2001).

[12]. Jin, I.; Kenny, L. D.; Sang, H.: US Patent 5 112 697 (1992)

[13].CYMAT, supplier of aluminum-based closed-cell foams. See Chapter 17 for Contact information. http://www.cymat.com

[14]. Norsk Hydro, supplier of aluminum-based open-cell foams. See Chapter 17 for contact information. http://www.hydro.com

[15]. Akiyama et al. US Patent 4 713 277 (1987).

[16]. Shwartz, D.S., Shih, D.S., Evans, A.G. and Wadley, H.N.G. (eds) (1998) Porous and Cellular

Materials for Structural Application, Materials Reseach Society Proceedings Vol. 521, MRS, Warrendale, PA, USA: the proceedings of a research conference containing a broad spectrum of papers on all aspects of metal foams.

[17]. Gibson, L.J. & Ashby, M.F. (1997). Cellular solids – Structure and properties, Second Edition, Cambridge University Press, ISBN 0-521-49911-9, Cambridge, United Kingdom

[18]. Ashby, M. F. (2000): Metal foams: a design guide, Butterworth-Heinemann. Pages 11-14.

[19]. Sosnick, B. (1948): Process for making foamlike mass of metal, US Patent.

[20]. Gong, X. L., Liu, Y., He, S. Y. ET Lu, J. (2004): Manufacturing and low-velocity impact response of a new composite material: Metal porous polymer composite (MPPC), Journal of materials science and technology, 20, pp. 65–68.

[21]. Pinkhasov, E. (1991): Method of making open-pore structures, US Patent, (5,011,638).

[22]. Banhart, J., Ashby, M.F. and Fleck, N.A. (eds), (1999) Metal Foams and Foam Metal Structures, Proc. Int. Conf. Metfoam'99, 14–16 June 1999, Bremen, Germany, MIT Verlag: the proceedings of a conference held in Bremen in June 1999 with extensive industrial participation (in English).

[23]. Gong L., Kyriakides S., Jang W. Y., Compressive response of open−cell foams. Part I : Morphology and elastic properties. *Int. J. Solids Struct.* 42 : 1355−1379, 2005.

[24]. Bastawros A.F., Bart−Smith H., Evans A.G., Experimental analysis of de formation mechanism in a closed−cell aluminium alloy. *J. Mech. Phys. Solids* 48 : 301−322, 2000.

[25]. Brezny, R.; Green, D. J., Acta Metallurgica et Materialia 1990, 38, (12), 2517- 2526.

[26]. Wynn Steven Sanders : Mechanical Behavior of Closed Cell and Hollow Sphere Metallic Foams. Thése de doctorat, Massachusetts Institute of Technology, 2002.

[27]. DILLARD T., N'GUYEN F., FOREST S., BIENVENU Y., BARTOUT J.D., SALVO L., DENDIEVEL R., MAIRE E., CLOETENS P., LANTUEJOUL C. In-situ observation of tensile deformation of open-cell nickel foams by means of Xray microtomography. In [BAN03]. 2003.

[28]. NiCd/NiMH Batteries (10) - RightBattery.com 1-2v-aa-1600-mah-gp-rechargeable-nimh.

[29]. CIMONS Marlene. Medical Implants Made of Foam. U.S.News & World Report Science [en ligne], mai 2010. Disponible sur : <http://www.usnews.com/science/articles/2010/05/03/medical-implants-made-of-foam.html> (consulté le 19/05/2010)

[30]. CTIF - centre technique industriel spécialisé en fonderie, matériaux et produits métalliques » [archive], sur www.ctif.com

[31]. Metal hollow sphere structures – materials, technology, properties, and applications. Rapport technique, PLANSEE, IFAM, Glatt.

[32]. https://fr.wikipedia.org/wiki/NASA/over_the rotor_acoustic_treatment 12/02/2009

[33]. Hugo, J.-M. (2012). Transferts dans les milieux cellulaires à forte porosité: application à l'optimisation structurale des échangeurs à ailettes. Laboratoire IUSTI CNRS UMR Aix-Marseille Université. Ph. D: 267.

[34]. Miscevic, M. (1997). Étude de l'intensification des transferts thermiques par des structures poreuses: Application aux échangeurs compacts et au refroidissement diphasique. IUSTI. Marseille., Université de Provence.

[35]. https://energie.wallonie.be/fr/differents-types-d-echangeurs-de-chaleurs.html?IDC=8049&IDD=97759

[36]. Rapport interne : Approches prévisionnelles des propriétés mécaniques du nid d'abeilles. B.M.B. Mertani *, B. Keskes, A. Bentouhami, « Caractérisation mécanique des panneaux sandwichs à âme en nid d'abeille (aluminium/ aluminium) » Laboratoire de Mécanique de Précision Appliqué (LMPA), Institut d'Optique et de Mécanique de Précision (IOMP,Université Ferhat Abbas de Sétif).

[37]. V. Sokolinsky, et al., "Special behavior of unidirectional sandwich panels with transversely flexible core under statical loading," International Journal of Non-Linear Mechanics, vol. 37, pp. 869-895, 2002.

[38]. GLEICH Gruppe. Alporas Aluminium foam [en ligne]. Disponible sur : < http://www.gleich.de/en/aluminium-foam/> (consulté le 23/05/2010).

[39]. Gibson, L.J. & Ashby, M.F. (1997). Cellular solids – Structure and properties, Second Edition, Cambridge University Press, ISBN 0-521-49911-9, Cambridge, United Kindgom .

[40]. Garsot, N. (2009) : Modélisation numérique du comportement mécanique des composites mousse métallique-polymère, Thèse, Université de Technologie de Troyes.

[41]. Liu, Y. ET Gong, X.-L. (2006): Compressive behavior and energy absorption of metal porous polymer composite with interpenetrating network structure, Transactions of nonferrous metals society of china, 16, pp. 439–443.

[42]. ERG (1998) Duocel aluminum foam. ERG Corporate Literature and Reports, 29 September.<http://ergaerospace.com/lit.html>

[43]. ERG (1998) Duocel physical properties. ERG Corporate Literature and Reports, 29 September. http://ergaerospace.com/lit.html

[44]. Belhadj A. ; Kaoua S-A. ;Azzaz M. ;Bartout J.D . ;Bienvenu Y. ; " Elaboration and characterization of metallic foams based on tin-lead", Materials Science and Engineering A ;2008 ,Vol.494,pp.425-428.

[45]. T. Massalski (éditeur), Binary phase diagrams, ASM International, Materials Park, Ohio (1990) (Ouvrage de référence pour les diagrammes de phase binaires).

[46]. https://www.fluorescencemicroscopes.com/zeiss-axiovert-450-inverted-phase-contrast-fluorescence-microscope/