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: science des matériaux

thème

Caractérisation mécanique et calcul de l'énergie d'absorption du matériau poreux Sn-Pb50 lors de l'essai de compression uniaxial

Présenté par :

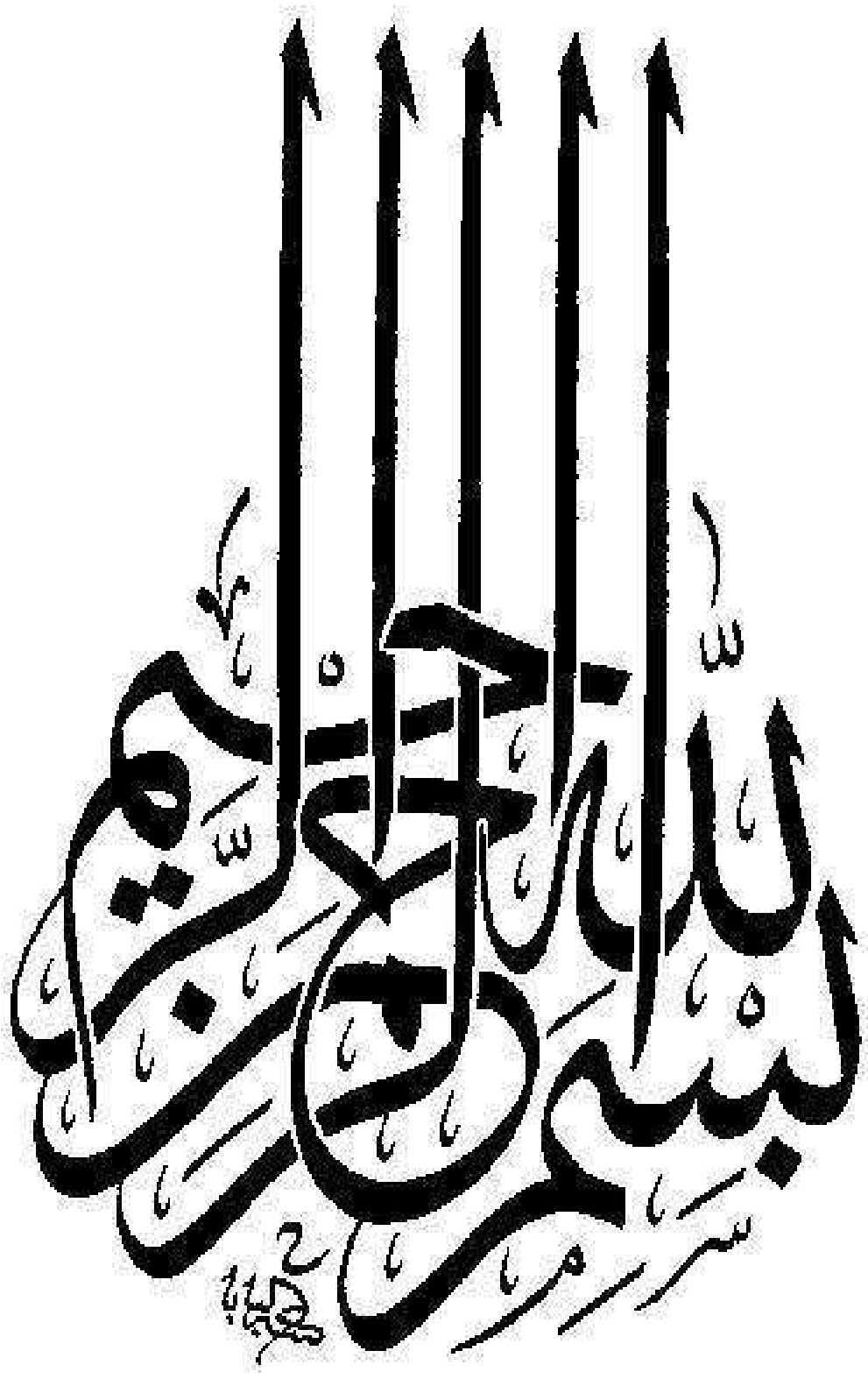
- *RAFA Adel*
- *BOUZIDANI ELhocine*

Proposé par :

Encadreur : Dr. BELHADJ . Abd-Elmouneïm

Co- Encadreur : Pr. ABUDURA. Salam

Promotion 2016-2017



REMERCIEMENTS

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

***J**e remercie infiniment **Docteur :** **Abd-Elmouneïm BELHADJ** et **Professeur Salam ABUDURA** qui avoir assuré la co-direction 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 réservé avec une patience inégale. Et tous les enseignants du département Génie de la mécanique*

***J**e 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.*

***I**l 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.*

***C**e 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 mémoire :

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 cher papa 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 Souhil, Wail, et

Le petit Abdel-Djalil , et mes sœurs

A ma famille, grande et petite

A mes chères copines
lyes, sohil,
Mouhamed, Abdelhak
, Adel , ,Amine
, Aissa, Mustapha
,Sofiane

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.

Adel

Dédicace

Je dédie ce mémoire :

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 cher papa 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 fateh, mohmed, et

Le petit walid -sohib, et mes sœurs

A ma famille, grande et petite

A mes chères copines
Adel, hadj, , Djamel ,
Khaled , Mustafa
, Sofiane, moktari

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.

elhocine

sommaire

Sommaire

Remerciement ……...

Dédicace……

Sommaire ……...

Résumé……...

Introduction générale ……..

Chapitre : 1Généralité sur les matériaux cellulaire

1. 1.Généralités……9

1.2 Définition des matériaux cellulaires ……10

.1.3. Quelques définitions et illustrations……..11

1.4 Familles de matériaux cellulaires ……13

1.4.1. Les matériaux à pores ouverts ……13

1.4.2. Les matériaux à pores fermés……14

1.5. Classification des métaux cellulaires…… 14

1.6.Structures et propriétés des matériaux cellulaires……..18

1.6.1..Structures des matériaux cellulaires.....18

1.6.2. Propriétés des matériaux cellulaires.....20

1.7. Modélisation mécanique des matériaux cellulaires …… 24

1.8. Applications des matériaux cellulaires dans l'industrie.....31

Chapitre2 : Techniques expérimentales et matériaux de l'étude

2.1Matériaux utilisés……36

2.2 Mesure de la conductivité électrique…….37

2.3 Découpe des échantillons par le processus d'électroérosion…….38

2.4 Techniques de caractérisation structurale……40

2.4.1. Observations métallographiques……40

2.5 Caractérisations mécaniques des échantillons……...42

2.5.1. Essais mécaniques de compression uniaxiale…….42

2.6 Programme utilisé pour le calcul des énergies d'absorption ……44

2.6.1 programme N°1……44

Chapitre3 : Matériaux cellulaires de Sn-Pb Résultats & discussions

3.1. Procédé d'élaboration des mousses métalliques Sn-Pb…….47

3.2. Technique de caractérisation structurale…….51

3.2.1. Observations métallographiques…….51

3.3. Caractérisations mécaniques des matériaux poreux Sn-Pb……54

3.3.1. Mesure de la densité relative…….54

3.3.2. Essais mécaniques de compression uniaxiale……56

3.4Energie d'absorption……..62

Conclusion générale ……..73

Références bibliographique ……75

Liste du figures

Chapitre 1

Figure 1 photographies de quelques matériaux cellulaires 10

Figure 2 Deux exemples de structures périodiques 11

Figure 3 Deux exemples de structures aléatoires 12

Figure 4 matériaux à pores ouverts 13

Figure 5 matériaux à pores fermés 14

Figure 6 Différents types de métaux cellulaires stochastiques 15

Figure 7 Représentation de quelques matériaux cellulaires, 17

Figure 8 exemples de solides cellulaire 18

Figure 9 trois types de matériaux cellulaires tridimensionnels 19

Figure 10 schéma d'un matériau cellulaire a très large distribution 19

Figure 11 . plage de propriété de déférents matériaux poreux 22

Figure 12 schéma de courbes contrainte – déformation 23
d'un solide élastique et d'un matériau cellulaire du même solide

Figure 13 schématisation de la courbe contrainte/déformation 24
obtenue lors d'un essai de compression sur un matériau cellulaire.

Figure 14 Schémas des cellules utilisées par Gibson et Ashby pour 26
modéliser les propriétés des cellules ouvertes (à gauche) et fermées (à droite)

Figure 15 : illustration d'une matériau cellulaire de nickel NiTECH 28

Figure 16 Etat initial et déformé en compression d'une matériau cellulaire 29
d'aluminium simulé par la technique voxel éléments.

Figure 17 : En haut, exemples de matériaux cellulaires polymères maillées avec des éléments volumiques tétraédriques. 30

Figure 18 Caisse de RENAULT: renforcement structural avec des matériaux cellulaires d'aluminium 32

.

Figure 19 Exemples de pièces dans l'industrie (FOAMINAL) 33

Chapitre 2

Figure. 20 : Photographie de l'échantillon obtenu par le procédé de réplication inverse de granulométrie de 2 mm 36

Figure. 21 : Principe de la méthode d'élaboration des matériaux poreux par la méthode de réplication inverse. 37

Figure22 : Schéma du principe du processus d'électroérosion. 40

Figure. 23 : Dispositif expérimental pour les essais de compression sur les matériaux cellulaires élaborés au cours cette étude. 42

Figure 24 : Croquis des plateaux de la machine d'essai de compression sur lesquels est monté un capteur de déplacement linéaire LVDT 43

Chapitre 3

Figure. 25 : Photographies des échantillons de Sn-Pb de différentes granulométries découpées par le processus d'électroérosion. 50

Figure. 26: Diagramme d'équilibre de phases de l'alliage binaire Sn-Pb 51

Figure.27: Observation micrographique de l'alliage Sn50-Pb50, de granulométrie moyenne des pores de 1,6mm. 52

Figure.28: Observation micrographique de la mousse métallique Sn50-Pb50, de granulométrie moyenne des pores de 3,15mm. 53

Figure.29: Courbes force-allongement obtenue au cours de l'essai de compression uniaxiale sur l'échantillon de classe D. 56

Figure.30 Courbes contrainte déformation obtenue au cours de l'essai de compression uniaxiale sur l'échantillon de classe D 57

Figure.31: Agrandissement de la courbe de compression pour les faibles déformations. Schématisation de la méthode de détermination de la contrainte plateau σ_p. 58

Figure.32 : Courbes contrainte-déformation obtenues au cours des essais de compression uniaxiale sur cinq échantillons type de leur classe de granulométrie 59

Figure.33 : 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 compression uniaxiale 61

Figure 34: Energie d’absorption et efficacité des matériaux cellulaires 62

Figure 35– Echantillon (3A) programme Excel 64

Figure 36– Echantillon (3A) programme MATLAB 64

Figure 37– Echantillon (1A) programme Excel 65

Figure 38– Echantillon (1A) programme MATLAB 65

Figure39– Echantillon (2A) programme Excel 66

Figure 40– Echantillon (2A) programme MATLAB 66

Figure 41– Echantillon (1B) programme Excel 67

Figure 42– Echantillon (1B) programme MATLAB 67

Figure 43– Echantillon (4) programme Excel 68

Figure 44– Echantillon (4) programme MATLAB 68

Figure 45– Echantillon (2B) programme Excel 69

Figure 46– Echantillon (2B) programme MATLAB 69

Figure 47– Echantillon (D) programme Excel 70

Figure 48– Echantillon (D) programme MATLAB 70

Figure.49 Courbes Energie d’absorption Densité relative 71

Liste des tableaux

Tableau 1 : Récapitulatif des lois d'évaluation des modules d'Young et limites d'élasticité des matériaux cellulaires en fonction de la densité relative. 26

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. 49

Tableau 3 : Récapitulatif des résultats obtenus lors des mesures des densités relatives. 55

Tableau 4: Valeurs des contraintes de plateau correspondantes à chaque échantillon et valeur moyenne pour chaque mousse. 60

Tableau 5: Récapitulatif des résultats obtenus lors des mesures des énergie d’absorption. 71

Résumé

Les matériaux cellulaires a une grande importance en termes de dureté, la résistance, 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 matériaux cellulaires,

ensuite on a travaillé sur les méthodes d'élaborations des matériaux poreux En ce qui concerne l'objectif principal de ce travail est de calculer l' énergie absorbée pour certains échantillons des matériaux cellulaires

Mot clé :matériaux cellulaires, densité relative, l'énergie absorbée

الملخص

المواد الخلوية لها أهمية كبيرة من حيث صلابة، والمقاومة، والجودة، فضلا عن ارتفاع الكثافة النسبية، ويتم استخدامها في مختلف المجالات التكنولوجيا الحديثة وخاصة في مجال الطيران.

ودرسنا في هذا العمل بعض المعلومات العامة عن المواد الخلوية، ثم تطرقنا لطرق تصنيع للمواد المسامية أما بخصوص الهدف الرئيسي من هذا العمل هو حساب الطاقة الممتصة لبعض العينات من هذه المواد الخلوية

الكلمات المفتاحية :المواد الخلوية ,الكثافة النسبية ,الطاقة الممتصة

Abstract

The cellular materials is of great importance in terms of hardness, strength, quality, and the high relative density, it is used in various fields of modern technology and more particularly the field of aviation.

Was studied in this work some generalities on cell materials, then we worked on methods elaborations porous materials regarding the main objective of this work is to calculate the energy absorbed for some samples of cellular materials based with

tin-lead

Keyword: cellular materials, relative density, the absorbed energy

Introductín générale

Introduction générale

Les matériaux cellulaires existent depuis toujours dans la nature, comme le bois par exemple. Ils sont souvent utilisés pour la construction de bâtiments de par leur résistance et leur légèreté. Ainsi depuis le milieu du vingtième siècle, l'Homme, conscient des propriétés intéressantes de ces matériaux poreux, a tenté de les reproduire artificiellement à partir de matériaux divers (polymère, céramique, métal,…).. Les matériaux cellulaires métalliques sont d'un développement récent et trouvent des applications dans des domaines aussi diversifiés que l'isolation phonique, l'absorption d'énergie, la filtration, l'allègement de structures … Le secteur automobile, soucieux d'alléger les véhicules, d'une part pour compenser l'apport de poids des équipements tels que le dispositif air-bag, ou la climatisation.

Chapitre .I

Généralité sur les matériaux cellulaires

1. 1.Généralités

Les matériaux cellulaires sont omniprésents dans notre quotidien. Ils peuvent être naturels comme le bois ou les os. Mais l'homme a aussi développé des structures en polymères, en particulier dans les domaines de l'emballage et du confort, mais aussi en céramiques comme les bétons cellulaires et même plus récemment en métaux. Les matériaux de base ainsi que leurs structures varient pour répondre aux besoins des applications visées. De manière générale ils permettent de combiner de bonnes propriétés mécaniques, une densité relative faible ainsi que des capacités d'absorption et d'isolation. Le CNRS et l'ONERA se sont associés pour développer ces matériaux pour des applications multifonctionnelles. Plusieurs études ont donc été mises en place et fédérées par le projet MAPO. Les laboratoires du SIMAP à l'INP de Grenoble, DMMP à l'ONERA et MATEIS à l'INSA de Lyon et rennes collaborent étroitement pour développer, modéliser et comprendre ces matériaux. L'objectif final étant la création et la caractérisation de matériaux multifonctionnels répondant aux conditions de fonctionnement pour des utilisations aéronautiques. Cette thèse s'inscrit dans ce programme et l'on cherche à créer des matériaux utilisables en appliquant une méthode de choix de type « matériel by design ». L'idée de cette méthode est très simple, tout part du produit et du cahier des charges qui lui est lié. L'utilisation visée fixe une série de paramètres, on conçoit alors un matériau sur mesure qui répondra au mieux à toutes les attentes. C'est une méthode qui présente une rupture avec les approches classiques où l'on part plutôt des matériaux existants et on vient dimensionner la structure pour répondre à un besoin. Dans le domaine aéronautique, les avancées actuelles visent à augmenter le confort et la sécurité, sans augmenter la masse embarquée, ni réduire la durée de vie ou la fiabilité des appareils. La nature a depuis longtemps compris que pour répondre à ce genre de contraintes de conception, les matériaux cellulaires sont d'excellents candidats. Mais, pour la réduction du bruit produit par les moteurs des aéronefs, il existe des contraintes d'usage liées à l'environnement où seuls certains métaux peuvent être utilisés. Il faut donc trouver une solution conservant ses propriétés acoustiques et mécaniques malgré les fortes variations de température et de pression dans le réacteur. Les empilements de sphères creuses en nickel ou en acier inoxydable possèdent des porosités fermées, favorisant leur résistance mécanique et

des porosités ouvertes, permettant l'amortissement des ondes acoustiques. Dans le même temps, les matériaux constitutifs résistent bien aux températures élevées. Ils ont donc été naturellement pressentis et développés pour ce genre d'applications **[1] .**

1.2.Définition des matériaux cellulaires

De tels matériaux comme le bois, le liège ou l'éponge existent dans la nature. Généralement, leur fonction biologique requiert une résistance mécanique pour un point minimum. Beaucoup de ces matériaux cellulaires ont été directement utilisés par l'homme et ce n'est qu'assez récemment qu'il a pu fabriquer ses propres matériaux Un matériau cellulaire peut être défini en tant que solide composé de plusieurs cellules ouvertes ou fermés régulières. Les matériaux cellulaires sont connus par leur faible densité, ou plus exactement leur faible densité relative définie comme le rapport de la densité des matériaux cellulaires avec celle des matériaux constitutifs du squelette. Elle est souvent de l'ordre de 0.1 de sorte que le volume est essentiellement occupé par de l'air. Contrairement aux matériaux poreux, les variations de pression dans le fluide interstitiel (ici un gaz) peuvent être négligées. Les modes de déformation dominants dans ces matériaux sont donc la flexion et le flambage des parois fines des cellules. La figure1 présente quelques matériaux cellulaires naturels et manufactures**. [2et 3]**



Figure 1– photographies de quelques matériaux cellulaires

1.3. Quelques définitions et illustrations

Les matériaux cellulaires peuvent être naturels ou artificiels, en polymère, en céramique ou en métal. Notre étude porte sur un matériau cellulaire métallique mais certaines définitions sont aussi utilisables pour d'autres matériaux constitutifs. Pour qualifier les matériaux cellulaires, il est commode de les classer selon différentes catégories. Trois modes de classement sont ici proposés, dans un premier temps un classement en fonction de la périodicité de la structure, le deuxième classement repose sur des aspects de propagation de fluides, et enfin le dernier sur le mode de fabrication. Lorsque deux dimensions suffisent pour décrire totalement la géométrie, ou que les formes présentent une certaine périodicité, les structures sont dites périodiques. Le principal exemple est la structure « nid d'abeille » Figure1-2, elle est généralement constituée de cellules cylindriques à base hexagonale. Les empilements réguliers de sphères creuses existent aussi mais ne sont pas utilisées dans l'industrie Figure 2 **[4,5.]**

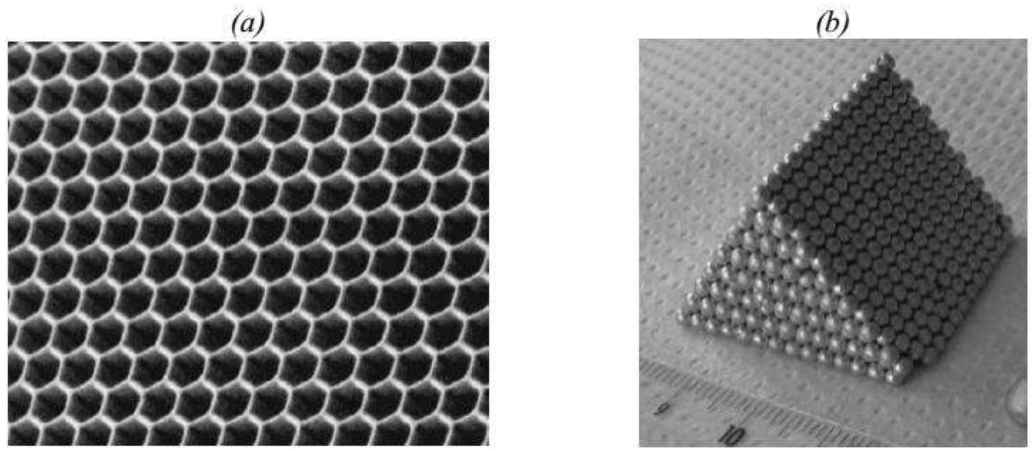


*Figure 2- Deux exemples de structures périodiques. (a) Nid d'abeille à cellules hexagonales***[6]** *. (b) Empilement régulier cubique faces centrées (CFC) de sphères creuses* **[7]**

Les matériaux cellulaires sont souvent employés pour répondre à des questions d'acoustique et d'écoulements de fluides. Pour ce type d'application, on a l'habitude de distinguer les matériaux cellulaires à porosités fermées et celles à porosités ouvertes (voir Figure 3).

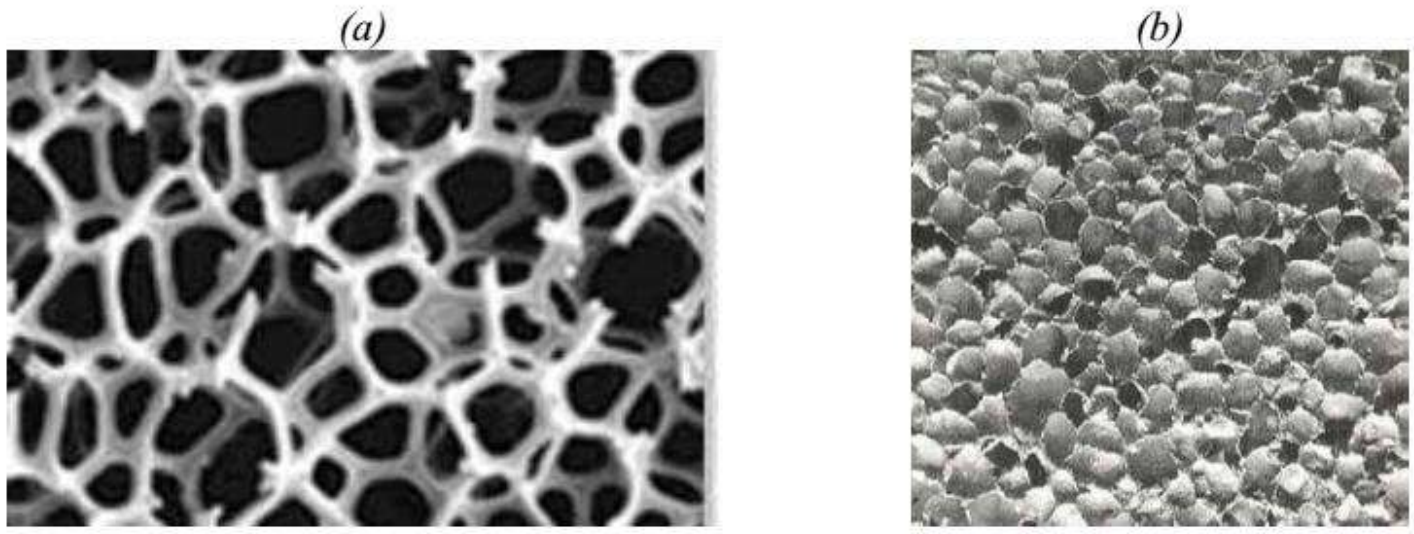


Figure 3 : Deux exemples de structures aléatoires. (a) matériau cellulaire de Nickel à porosités ouvertes. (b) matériaux cellulaires d'aluminium à porosités fermées

En fin on peut aussi classer les matériaux cellulaires suivant leur mode de fabrication Les différents procédés peuvent être séparés de la manière suivante :Les premiers types utilisent une préforme qui est ensuite éliminée. Cette technique consiste à faire un dépôt de métal sur un préforme de polymère**[8].** La préforme est ensuite dissoute chimiquement et éliminée par élévation de la température. De même pour la technique utilisée afin de produire des sphères creuses en nickel non liées ou les empilements de sphères creuses en acier inoxydable. La mousse INCOFOAMTm de la Figure 3-a est aussi obtenue de cette façon. Une autre technique dite la réplication utilisant également une préforme, consiste à infiltrer un mélange de poudre de NaCl avec un métal fondu. Le sel est ensuite éliminé par dissolution dans l'eau **[9]** .Le procédé le plus répandu consiste à introduire des bulles dans des métaux liquides ou en poudres. Dans le cas des poudres, l'alliage est mélangé à un agent dégageant du gaz à haute température. Pour l'aluminium, on utilise généralement du TiH2. Le mélange est ensuite extrudé puis maintenu à 600°C. L'agent gazant libère alors l'hydrogène. L'aluminium étant encore à l'état semi-solide à cette température, l'hydrogène forme des bulles dans l'alliage qui constitue les cellules de la matériau cellulaire . L'autre solution consiste à souffler un gaz dans un métal fondu. Le gaz crée alors des bulles qui, lors de la solidification contrôlée du métal ,forment les cellules. Un exemple de matériau cellulaire d'aluminium obtenue par ce procédé est visible à la Figure 3-b. Enfin les procédés par assemblage permettent d'obtenir des structures plus régulières. Le matériau cellulaire est généralement obtenu par frittage ou soudage de structures. C'est

la solution retenue pour assembler les sphères creuses en nickel, un des matériaux étudié dans la présente thèse. Les sphères creuses sont crées par dépôt électrochimique de Ni puis de NiB. Les sphères sont ensuite empilées dans un moule et chauffées pour former le matériau cellulaire par brasage. Ce procédé est plus coûteux que les autres solutions exposées.

1.4. Familles de matériaux cellulaires

1.4.1. Les matériaux cellulaires à pores ouverts

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

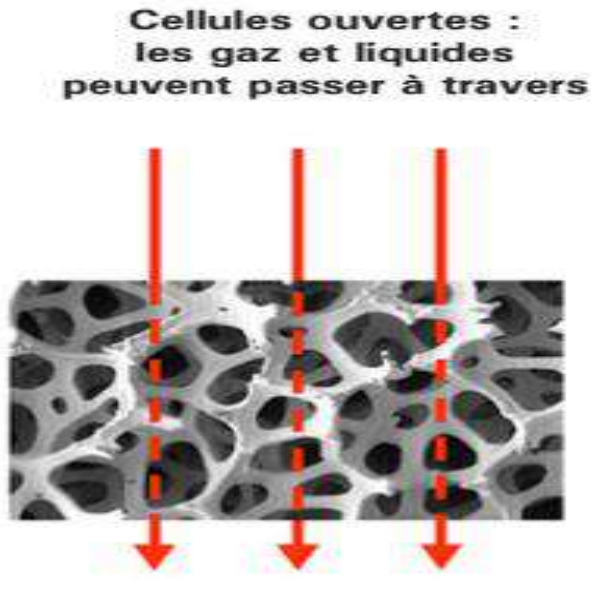


Figure 4 : matériaux à pores ouverts **[10]**

1.4.2. Les matériaux cellulaires à pores fermés

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. Les matériaux cellulaire à cellules fermées sont tellement étanches et légères qu'elles flottent 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.

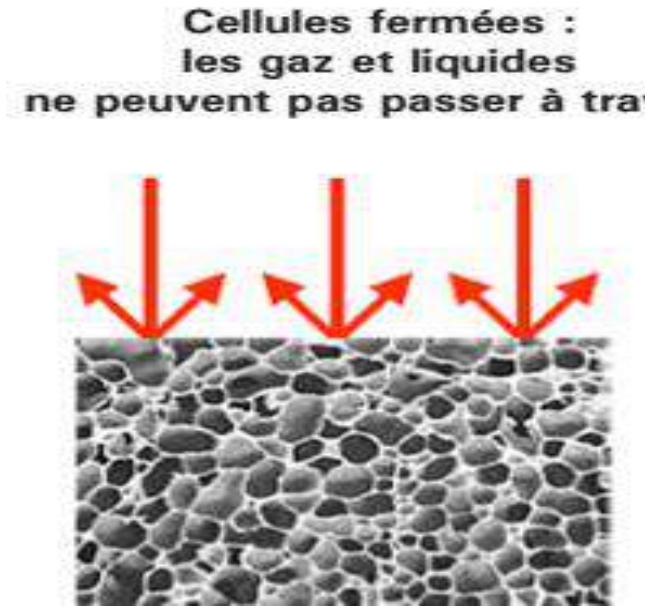


Figure 5: matériaux à pores fermés ***[11]***

1.5. Classification des métaux cellulaires

Les métaux cellulaires, caractérisés par la distribution à l'échelle mésoscopique de zones cavitaires en leur sein, présentent une grande variété de structures qui diffèrent selon les procédés de mise en œuvre. Pour distinguer les spécificités propres à chacune, il est nécessaire d'employer un vocabulaire qui leur est adapté. Dans ce qui suit, nous proposons quelques définitions de termes spécifiques au domaine des métaux cellulaires.

Métal cellulaire (ou matériau cellulaire métallique) : corps métallique solide dans lequel il existe des cavités. Structure périodique : structure dans laquelle l'ordonnancement de la matière peut être décrit par duplication d'un motif élémentaire.

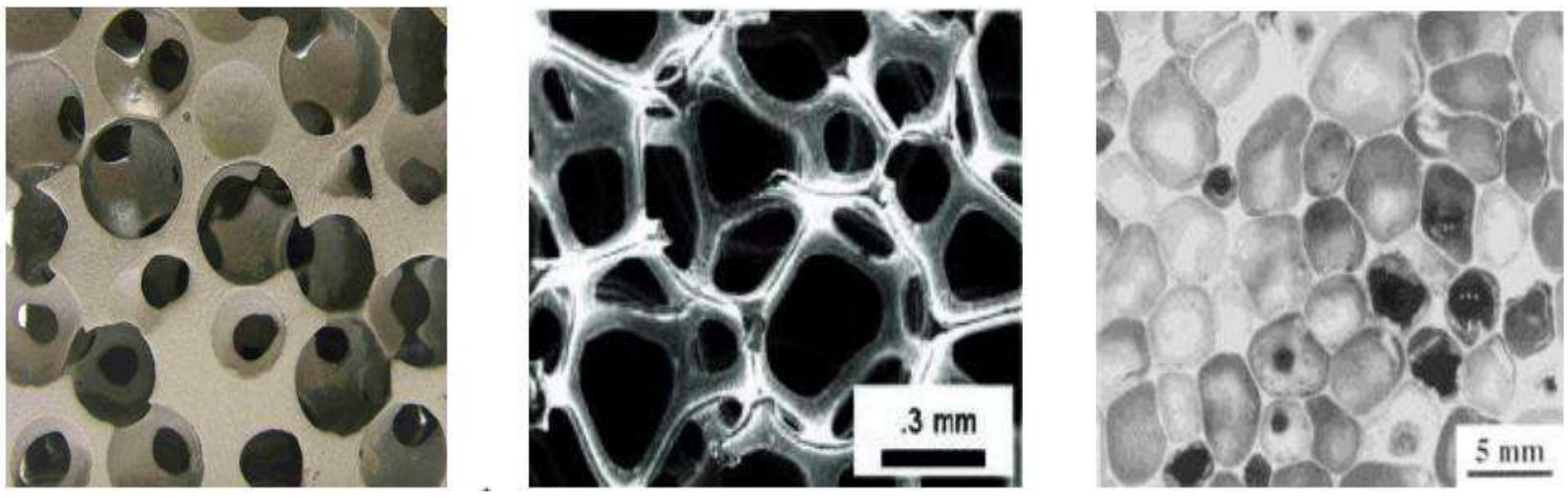
Structure stochastique : structure dans laquelle la répartition de la matière est aléatoire et continue. Cette répartition peut néanmoins être décrite de façon statistique.

Métal poreux : métal cellulaire stochastique dont les cavités sont globalement sphériques, isolées les unes des autres et représentent en général moins de 70% du volume du matériau. métal cellulaire syntactique : métal cellulaire stochastique dont les cavités sont sphériques et interconnectées entre elles.

Eponge métallique : métal cellulaire stochastique dont les cavités sont interconnectées entre elles et dans lequel le métal se répartit sous forme de ligaments . **[12].**

- Définitions

Mousse métallique : stricto-sensu, métal cellulaire provenant de la solidification d'une mousse métallique liquide, c'est-à-dire d'un mélange liquide-gaz métastable. Les produits obtenus de cette manière présentent des cavités isolées les unes des autres, globalement polyédriques et séparées par des cloisons fines, appelées films L'utilisation du terme «**matériaux cellulaire** » a été étendue pour désigner aussi les éponges métalliques dont les structures présentent des similitude **[13].**



Matériau cellulaire *Eponge métallique* *Matériau cellulaire métallique*

Figure 6- Différents types de métaux cellulaires stochastiques

Nid-d'abeilles : métal cellulaire dont la structure, souvent périodique, se définit dans un plan treillis métallique (ou LBM : Lettice Block Matériel) : métal cellulaire fait de poutres interconnectées entre elles qui forment un réseau, le plus souvent périodique, dans lequel l'agencement de la matière est déterministe

Pore : cavité dans un matériau cellulaire. A titre d exemple matériaux syntactique,

Pores ouverts : lorsque les pores se communiquent sont interconnectés.

Pores fermés : les pores ne se communiquent pas entre aux .

Pores semi-ouverts : pores communicant entre eux par des orifices de dimension très inférieure à leur taille moyenne. Les matériaux cellulaires syntactiques sont à pores semi-ouverts.

Taux de porosité : rapport (exprimé en %) entre le volume occupé par les pores au sein d'un métal cellulaire et le volume total occupé par ce matériau.

Masse volumique apparente : rapport entre la masse d'un matériau cellulaire et le volume global qu'il occupe

$$\rho^* = \frac{m_{Acier}}{V_{total}} = \frac{\rho_{acier} \, . \, V_{Acier}}{V_{totale}}$$

Densité relative (D_r) : rapport entre la masse volumique apparente du matériau cellulaire et celle du métal qui le compose.

$$D_r = 1 - porosité \Leftrightarrow 1 - \mathrm{D_r} = \text{porosité}$$

Porosité =1-D_r

$$D_r = \frac{\rho}{\rho^*}$$

$$\rho = matériau\ cellulaire$$

$$\rho^* = matériaux\ dense$$

$$D_r = \frac{\frac{m}{v}}{\frac{m^*}{v^*}} = \frac{m}{m^*}$$

$v = v^*$ **[14].**

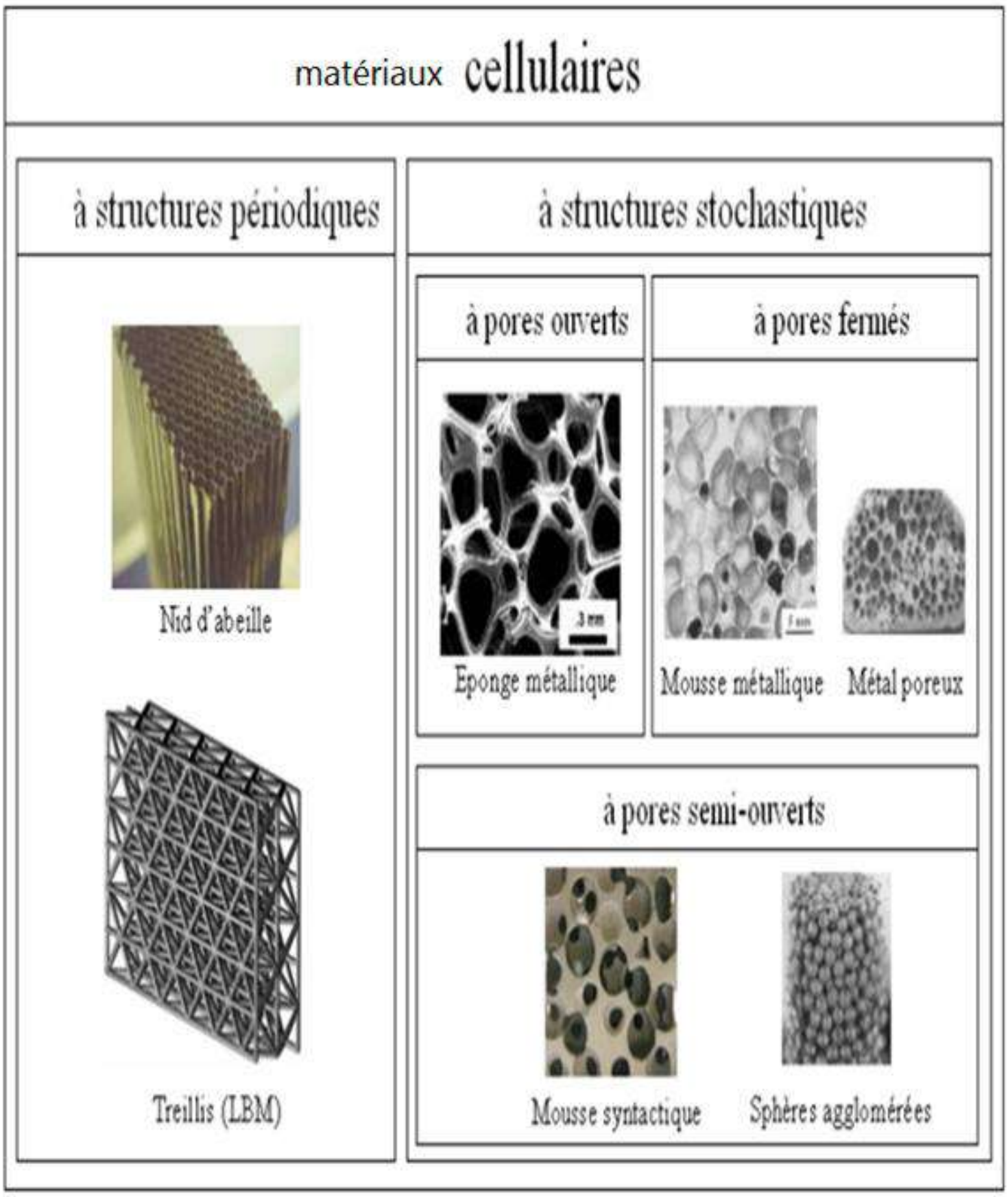


*Figure 7 – Représentation de quelques matériaux cellulaires, classés suivant leur structure***[15].**

1.6.structure et propriétés des matériaux cellulaires

1.6.1.structure des matériaux cellulaires

Les matériaux cellulaires sont des matériaux qui forment un réseau interconnecté de poutres et de plaques solides qui représentent respectivement les arêtes et les faces des cellules ,les caractéristiques structurales d'un matériau cellulaire sont la topologie de ces cellules , leur taille et leur forme .

a) Topologie

Il existe deux distinctions topologiques à faire :

La classe géométriques : les matériaux cellulaire peuvent être classés en deux groupes , le premier nommé (nids d'abeilles) concerne les matériaux cellulaire à microstructure bidimensionnelle, dans ce cas , les cellules admettent un générateur commun dans le plan

Le deuxième, nommé (mousses) concerne les matériaux cellulaire à microstructure tridimensionnelle , dans ce cas , les cellules ont des orientations aléatoire dans l'espace. **[16 ,17].**

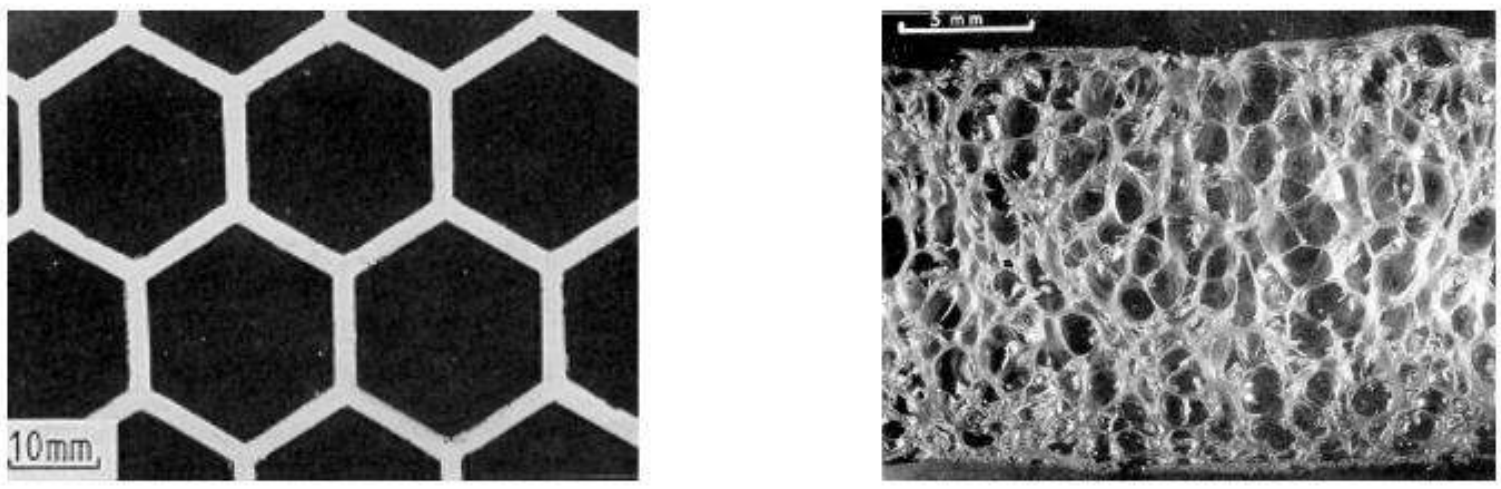


*Figure 8 :exemples de solides cellulaire***[18].**

a) nid d'abeilles bidimensionnel *b)matériau cellulaire de polychlorure de vinyle*

La connectivité du squelette et de l'espace poreux : dans le cas d'une microstructure tridimensionnelle, il faut distinguer les matériaux cellulaires à porosité ouvert et les matériaux cellulaires à porosité fermée , La microstructure de trois matériaux

cellulaires polymériques et montré dans la figure 9. Les deux première montrent la distinction entre la porosité ouverte ou il n'y a que les arêtes des cellules sont également solides , bien entendu , il existe aussi les matériaux cellulaire a porosité partiellement ouverts et partiellement fermé ou les faces des cellules sont également solides bien entendu. Il existe aussi des matériaux cellulaires a porosité partiellement ouverte et partiellement fermée , c'est le cas de troisième figure .

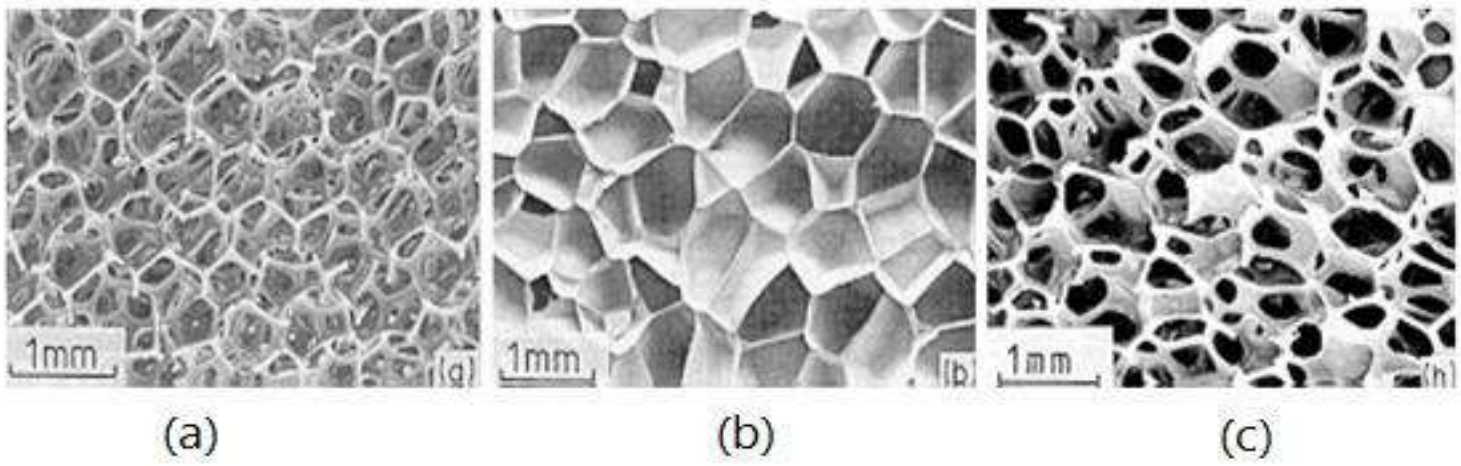


figure 9. trois types de matériaux cellulaires tridimensionnels

a)polyuréthane à porosité ouverte *b) polyuréthane à porosité fermée*

c) polyuréthane à porosité ouverte et fermée

b) taille de cellules : la taille des cellules est variable d'un solide cellulaire à une autre et également au sein du même solide.la distribution de la taille de cellules peut être très étroite comme pour les nid d'abeilles , ou encore tellement large que les plus grandes cellules sont cent fois plus important que les plus petites , comme c'est le cas dans la figure 10 cette dispersion n'implique pas l'anisotropie.



Figure10. (a) schéma d'un matériau cellulaire a très large distribution

(b) micrographe d'un matériaux cellulaire en polymère montrant une structure qui ressemble a schéma (a) de cette figure **[19].**

c) formes des cellule : la forme des cellules a une grande influence sure le comportement que leur taille lorsque la forme des cellules n'a pas de direction privilégiée , les propriétés sont isotropes .En revanche, si les cellules sont allongées ou aplaties , une anisotropie est induite ou niveau macroscopique , C'est pourquoi la géométrie des matériaux cellulaires a fait l'objet de plusieurs études. Plateau a identifié la formes des cellules comme un dodécaèdre rhombique (polyèdre a 12 faces) lord Kelvin l'a remplacé par un tétrakaidécaèdre (polyèdre a 14faces). **[20].** ,pour simplifier les ont modélisées par des cubes .

1.6.2. propriétés des matériaux cellulaires

a) densité relative des matériaux cellulaires

Les matériaux cellulaires essentiellement caractérisées par leur densité relative .Elle représente leur fraction volumique de matière :

$$D_{r=}\frac{\rho}{\rho^*}$$

où :

ρ : la masse volumique du matériau cellulaire.

ρ^*: la masse volumique du solide compose .

En générale pour les matériaux cellulaires $D_r < 0.3$ certains ont une densité relative aussi faible que 0.003,et peut aller jusqu'à 0.001 Il s'agit d'une densité spéciale ultra basse , les matériaux cellulaires utilisée pour l'isolation ,l'emballage et l'amortissement ont qui 'est entre 0.05 et 0.2 .Au dessus de la valeur 0.3 on a une transition d'une structure cellulaire à une solide contenant des pores isolés.

Tenons compte de la forme des cellules dans les études micromécaniques , on peut relier la densité relative aux dimensions des arêtes et des faces des cellules d'une manière simple consiste à considérer**[21].**

$D_{r=c_1}\varepsilon^2$ pour un matériau cellulaire à porosité ouverte .

$D_{r=c_1}\varepsilon$ pour un matériau cellulaire à porosité fermée.

Ou c_i est un paramètre proche de 1 qui dépend la forme des cellules et $\varepsilon = t/l$ et le rapport de l'épaisseur t d'une arête d'une cellule sure sa langueur l ($t \ll l$ pour une Densité relative faible)

la fraction d'espace poreux dans la cellule et la porosité .Elle donné par : $P = 1 - d_r$

la distance entre porosité ouverte et porosité fermée est claire sur un micrographe on peut également la déterminer à partir d'une mesure de perméabilité du matériau cellulaire

b) plage des propriété des matériaux cellulaires

Parmi ses propriété, on distingue sa densité , son module de Young E , sa résistance à la compression et sa conductivité thermique (voir fig.11). la grande plage de propriété des matériaux cellulaires ouverte permet des applications qui ne peuvent pas être remplies facilement par les solides denses qui les compensent :

- Faibles densités relatives, permettent de fabriquer des structures légères à composantes rigides.
- Faible conductivité thermique, permet une isolation thermique fiable et économique
- Faible rigidité , rend les matériaux cellulaires attractives pour les applications d'absorption d'énergie

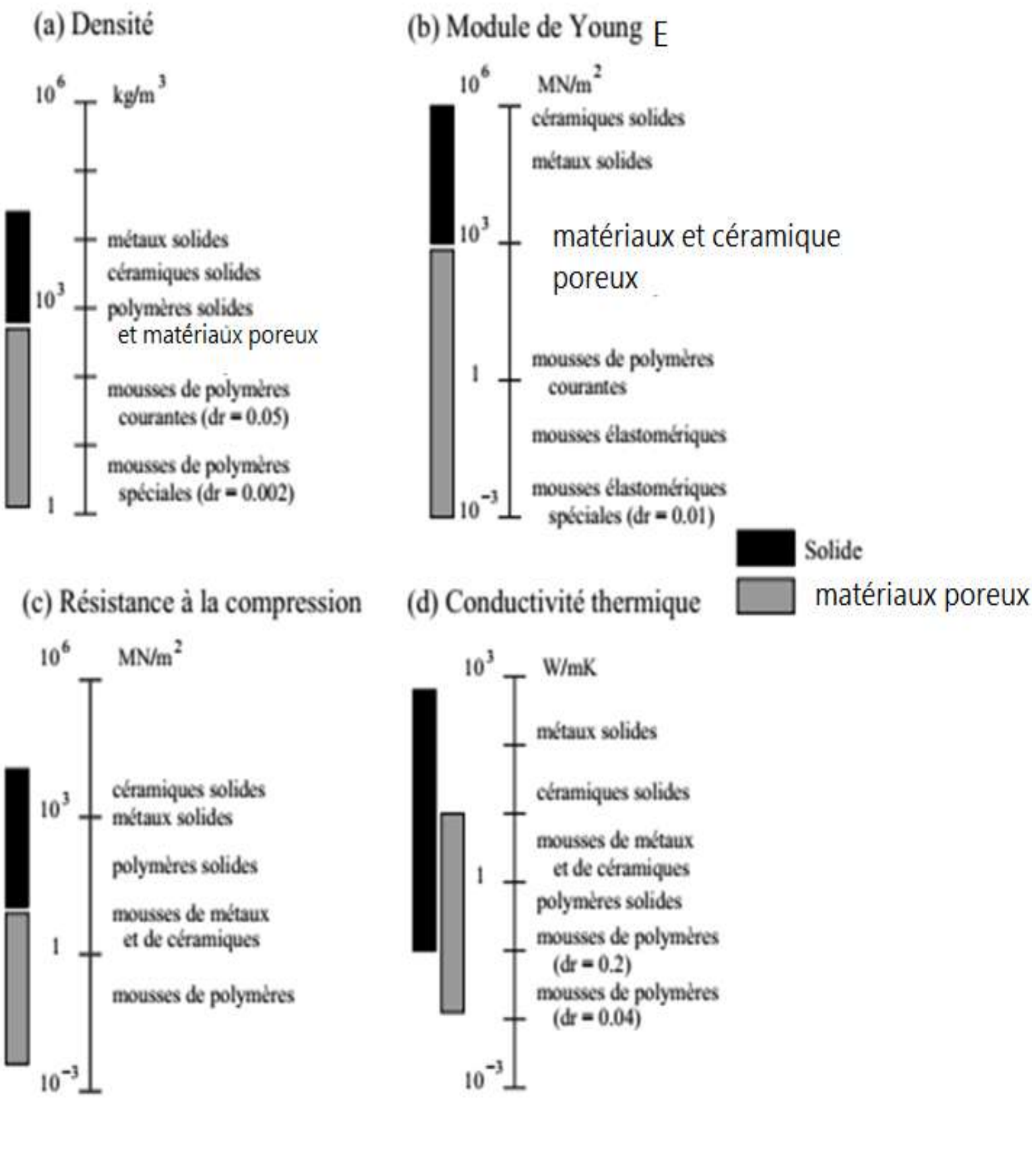


Figure11. plage de propriété de déférents matériaux poreux :(a)densité ;

(b) module de Young ; (c) résistance à la compression ;(d) Conductivité thermique

c) Absorption d'énergie

L'énergie par unité de volume nécessaire pour déformer un matériau jusqu'à une valeur ε

Est l'aire comprise sous la courbe contrainte –déformation jusqu'à cette valeur ε .

(La Figure 12) et un schéma ou sont représentées les réponses en compression d'une solide élastique dense et d'une matériau cellulaire fabriquée à partir de ce solide. Les énergies absorbées par unité de volume sont les aires hachurées.

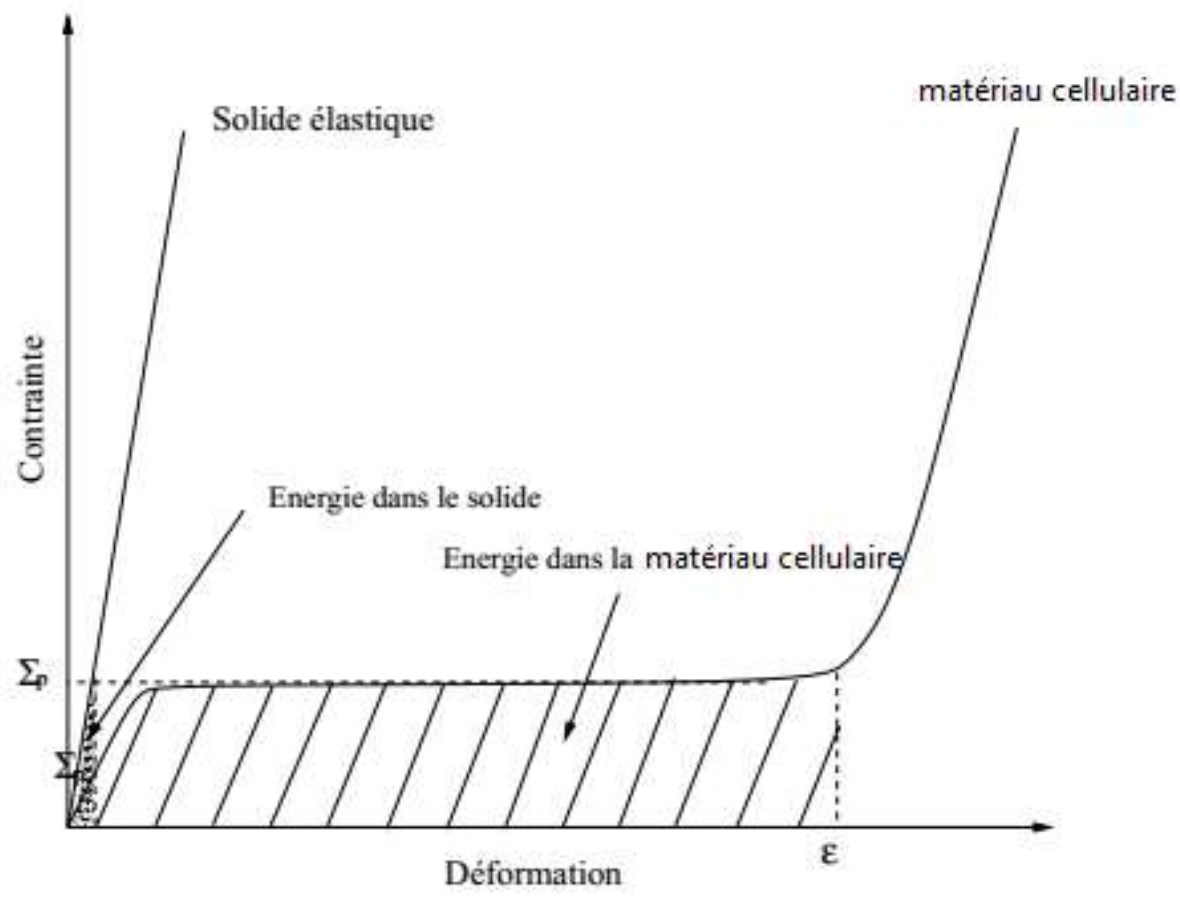


Figure12 .schéma de courbes contrainte – déformation d'un solide élastique et d'un matériau cellulaire du même solide ; montrant l'énergie par unité de volume absorbée à la contrainte du plateau $\sum p$

On voit que pour une même contrainte , un matériau cellulaire absorbe une quantité d'énergie beaucoup plus importante que celle absorbée par le solide qui la compose . Ce qui implique que , pour la même quantité d'énergie absorbé , le matériau cellulaire produit un moindre pic de contrainte .

Comme la figure 12 le montre , c'est le longe plateau de la courbe contrainte-déformation qui permet une grande absorption d'énergie à contraint $\sum p$ presque constante .En moyenne ,ce plateau peut aller jusqu'à une déformation ε de 70% .

Selon le type de matériau solide qui constitue le matériau cellulaire , ce plateau et du à l'effondrement des cellules par flambement élastique ; fléchissement plastique ou écrasement fragile ; il peut y avoir également d'autres mécanismes qui interviennent dans l'absorption d'énergie tel que la compression ou la diffusion du fluide dans les cellules. **[22].** Cette particularité du comportement ,la présence d'un plateau dans la courbe contrainte – déformation , est développée plus loin.

1. 7. Modélisation mécanique des matériaux cellulaires métalliques

L'objectif de ces modélisations est généralement de décrire le comportement monotone des matériaux cellulaires. Examinons tout d'abord ce comportement en nous appuyant d'un côté sur la courbe contrainte/déformation d'un essai de compression (Figure 13) et de l'autre sur les observations des modes d'endommagement du paragraphe précédent.

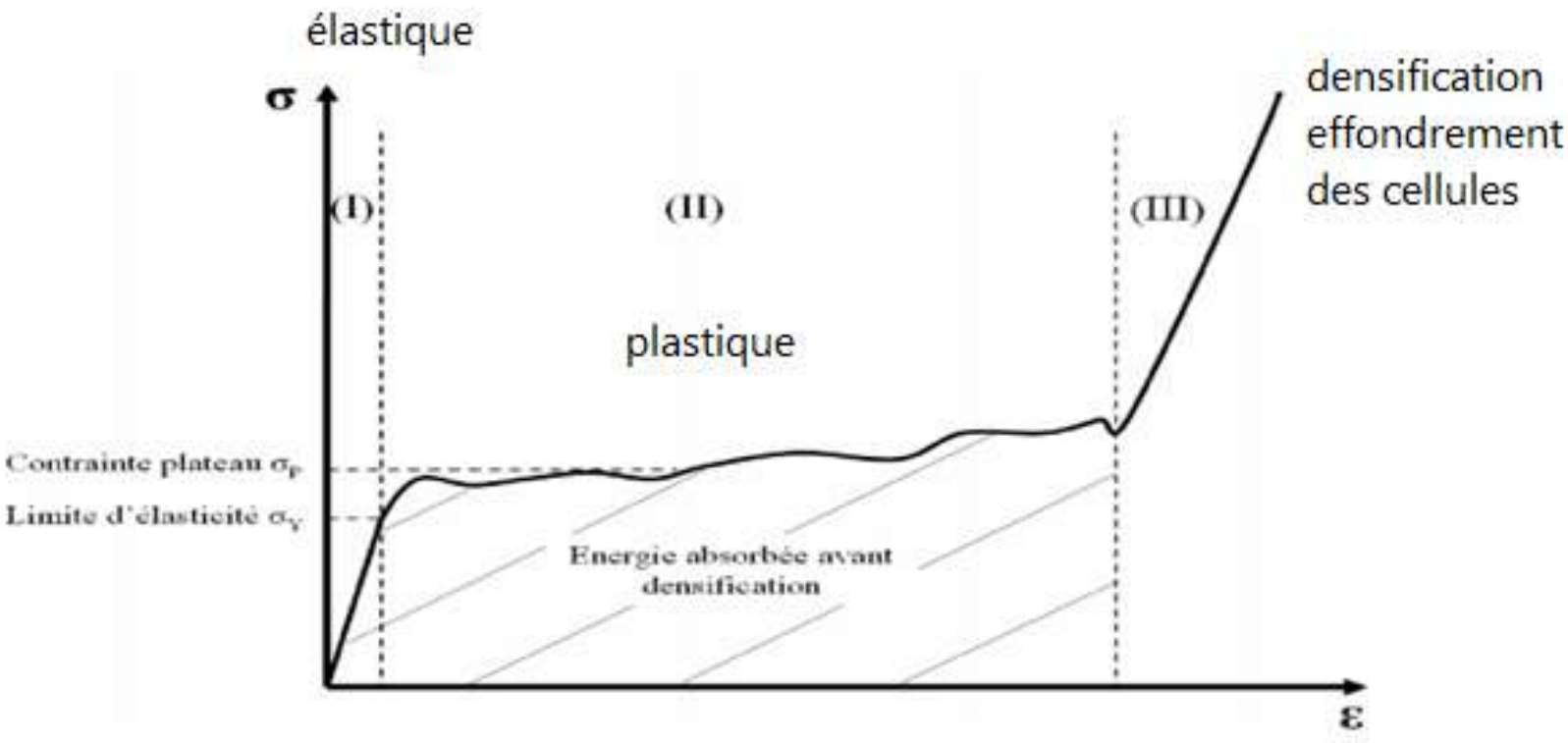


Figure 13. schématisation de la courbe contrainte/déformation obtenue lors d'un essai de compression sur un matériau cellulaire.

La Figure13permet de définir trois domaines :

Le domaine (I) correspond à la partie linéaire des premiers stades du chargement. Ce domaine s'apparente au domaine élastique des matériaux compacts. C'est la flexion et/ou la traction- compression des arêtes et des murs qui contrôle le comportement du matériau. Localement il apparaît de la micro-plasticité et le matériau peut s'adapter aux dispositifs d'attachement. Lors de la décharge, la pente peut alors changer. L'identification du module d'Young doit donc être réalisé sur des trajets de décharge.

Le domaine (II) présente un plateau correspondant à l'effondrement progressif des cellules. Cet effondrement est bien visible à la Figure 11 et correspond à des plastifications locales par la création de "rotules plastiques". Ceci se produit par flexion ou flambement des parois. Le premier pic correspond généralement à l'effondrement du premier ensemble de cellules. On observe ensuite des réarrangements et de nouveaux contacts créés dans la structure jusqu'à effondrement d'un ensemble de cellules dans une autre zone.

Le troisième domaine (III) correspond à la densification du matériau cellulaire. Lorsqu'il n'y a plus de place pour les effondrements et les réarrangements, on entre dans LE le régime de

densification du matériau qui se traduit par une augmentation brutale de sa rigidité. Les modélisations proposées se focalisent généralement sur le domaine des faibles déformations voire uniquement sur le domaine élastique (I). Il existe des approches par champ moyen considérant la mousse comme un matériau biphasé constitué d'un mélange de matière et de vide. Le modèle auto cohérent généralisé (ou modèle 3 phases)semble adapté aux matériaux à cellules fermées mais ne sera pas décrit dans ce manuscrit. D'autres approches visent à reproduire de manière régulière des réseaux de différents types de cellules L'approche de Gibson et Ashby repose sur la modélisation des cellules de la matériaux comme présenté dans la Figure 14

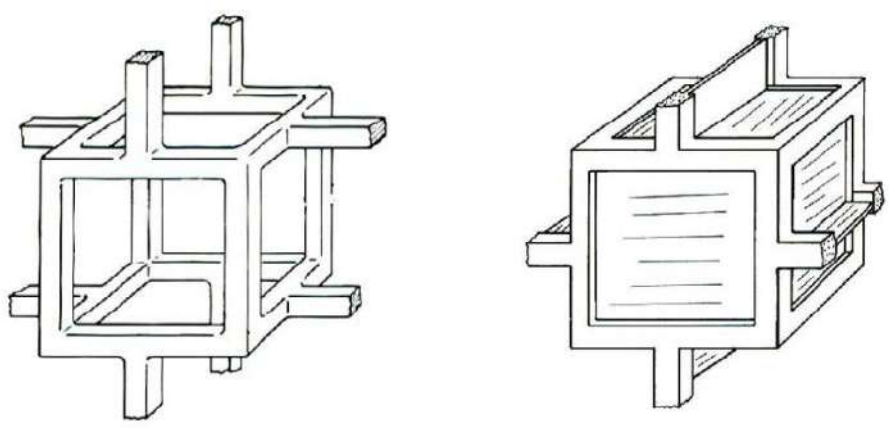


Figure 14 . Schémas des cellules utilisées par Gibson et Ashby pour modéliser les propriétés des cellules ouvertes (à gauche) et fermées (à droite)

Il s'agit d'un réseau cubique de poutres arrangées de telle sorte que les poutres de chaque cellule se rencontrent en leurs milieux. Cet arrangement induit une flexion des poutres horizontales et le calcul repose essentiellement sur les bases de la théorie de résistance des matériaux (RDM) pour le calcul du module d'Young. Pour le calcul de la limite d'élasticité, les modèles font l'hypothèse que cette dernière correspond à l'apparition de la première rotule plastique. Les auteurs aboutissent aux résultats du Tableau 1 et distinguent les deux types de matériaux cellulaires selon qu'elles sont à porosités ouvertes ou fermées. Pour les m à porosités fermées, les auteurs introduisent un paramètre ϕ représentant la proportion volumique de matière contenue dans les arêtes. Les expressions sont alors plus compliquées du fait des déformations élastiques ou plastiques des parois minces

Tableau 1 : Récapitulatif des lois d'évaluation des modules d'Young et limites d'élasticité des matériaux cellulaires en fonction de la densité relative

	Cellules fermées	Cellules ouvertes
Module d'Young relatif	$\frac{E^*}{E_S} \approx \left(\frac{\rho^*}{\rho_S}\right)$	$\frac{E^*}{E_S} \approx \phi^2\left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^2 + (1-\phi)\left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)$
Limite d'élasticité relative	$\frac{\sigma_Y^*}{\sigma_{Y_S}} \approx 0.3\left(\frac{\rho^*}{\rho_S}\right)^{3/2}$	$\frac{\sigma_Y^*}{\sigma_{Y_S}} \approx 0.3\left(\phi\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^2 + 0.4(1-\phi)\left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)$

.

Dans le Tableau 1., *ES* et *E** représentent les modules d'Young respectivement du matériau constitutif et de la mousse. $\sigma Y\ S$ et $\sigma Y\ *$ représentent les limites d'élasticité respectivement du matériau constitutif et de la matériau cellulaire .ρS et $\rho*$ sont les densités du matériau constitutif et de la matériau cellulaire. Ces expressions sont bien adaptées à des matériaux cellulaires suffisamment régulières et fournissent des estimations intéressantes pour ces grandeurs. Elles sont cependant insuffisantes pour prendre en compte la variabilité des structures ou des défauts de structures. En générant des structures par la méthode de tessellation de Voronoï ou par des méthodes de plans radicaux des études ont permis de montrer l'influence du désordre sur le module d'Young. Ces raffinements sont encore insuffisants pour prendre en compte la structure de certaines matériaux cellulaires , comme les empilements de sphères creuses qui sont à la fois des mousses ouvertes et fermées. De plus ces calculs ne permettent pas d'accéder aux concentrations locales de contraintes nécessaires aux calculs de fatigue

Ces dernières années, l'utilisation de la microtomographie aux rayons X a permis de nouvelles méthodes de modélisation. Les images de tomographie décrivent parfaitement et en trois dimensions la structure des matériaux cellulaires. Ces images couplées à des maillages destinés aux calculs éléments finis permettent de générer des modèles reflétant l'architecture très complexe des matériaux cellulaires. On dénomme ce domaine le calcul de microstructures On peut distinguer différentes techniques utilisées sur les matériaux cellulaires

Technique I : les images de tomographie contiennent quantité d'informations qui sont plus ou moins difficiles à extraire. Des nombreux algorithmes ont été développés pour mesurer des paramètres comme la taille de pores, leurs positions et différents points clés de la géométrie du matériau. Ces données peuvent ensuite être utilisées pour recréer numériquement des matériaux cellulaires correspondant au matériau réel. Ceci en faisant des hypothèses sur la morphologie des cellules et en utilisant des parois parfaites. Cette technique est particulièrement adaptée aux mousses ouvertes NITECH (Figure 15) où les poutres et les nœuds sont facilement identifiables.

En appliquant ensuite des propriétés aux poutres et en imposant des conditions aux limites, il est possible de réaliser des calculs de structure. Ces calculs peuvent être utilisés pour déterminer un comportement macroscopique ou trouver des zones de concentration de contrainte

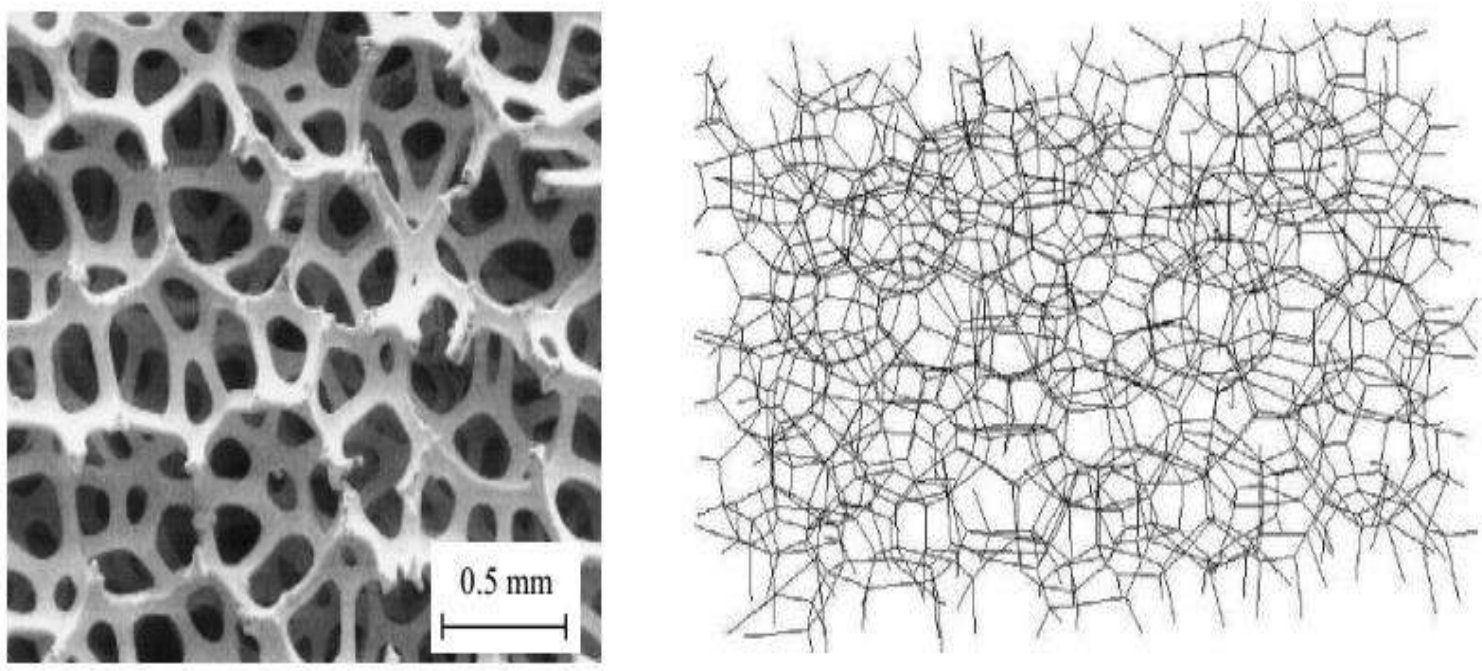


Figure 15 : illustration d'une matériau cellulaire de nickel NiTECH et structure numérique modélisant cette mousse. Modèle produit par analyse d'images tomographiques.

Technique II : à partir des volumes produits par tomographie aux rayons X, on peut aussi

transcrire directement chaque voxel de l'image en un élément cubique, Ce type de maillage est communément appelé voxel/élément un calcul réalisé sur une mousse d'aluminium à porosités fermées est présenté à la Figure 1.6.4. La taille de chaque élément est liée à la résolution utilisée lors de l'acquisition, le nombre d'éléments et donc le temps de calcul est lié aux dimensions de l'image. La taille de calcul devient vite énorme et il est très difficile de simuler des mousses avec des volumes représentatifs et des résolutions suffisantes.

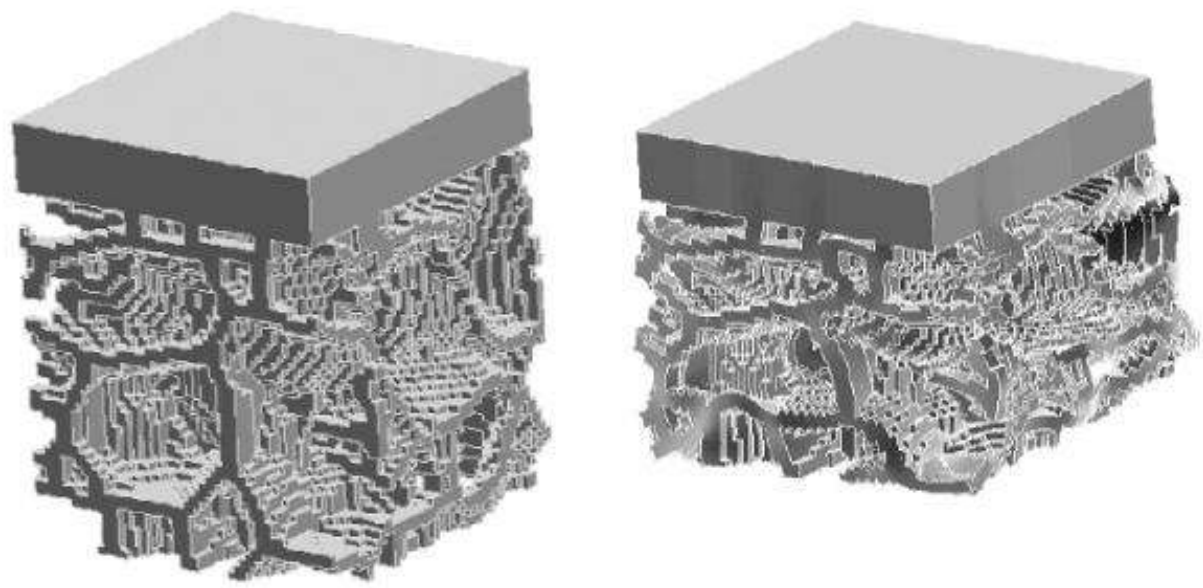


Figure 16 : Etat initial et déformé en compression d'une matériau cellulaire d'aluminium simulé par la technique voxel éléments.

Technique III : pour contourner ces problèmes, il est préférable d'avoir recours à des éléments tétraédriques Ces éléments peuvent s'adapter à la géométrie réelle et avoir des dimensions plus grandes que la résolution de tomographie. La méthodologie pour créer ce type de maillage repose généralement sur une première étape de maillage des surfaces par un algorithme de marching cubes. Le maillage obtenu après cette étape est très fin avec un très grand nombre d'éléments. Il doit donc être simplifié avant d'être maillé en volume grâce à un algorithme d'avancé de front. Ce type de maillage permet d'obtenir d'excellentes descriptions des géométries mais impose d'avoir des matériaux avec suffisamment d'épaisseur dans les parois pour être maillés (plus de 5 pixels). Les raffinements locaux sont difficiles à contrôler et imposent des maillages fins dans leur globalité. Selon la complexité des microstructures, ceci engendre des problèmes de taille de calcul. En acceptant des tailles d'échantillon à simuler modestes ou en utilisant les calculs parallèles, ces modèles permettent d'excellentes estimations des champs de contrainte et de déformation dans toute la structure 3D comme le montre la Figure 1.6.5. Il est alors possible de réaliser tout type de calculs, comme par exemple des calculs micromécaniques des calculs thermiques ou des calculs couplés .On peut aussi accéder à des comportements macroscopiques de la structure et tracer la courbe contrainte/déformation macroscopique de la structure pour différents modes de sollicitation

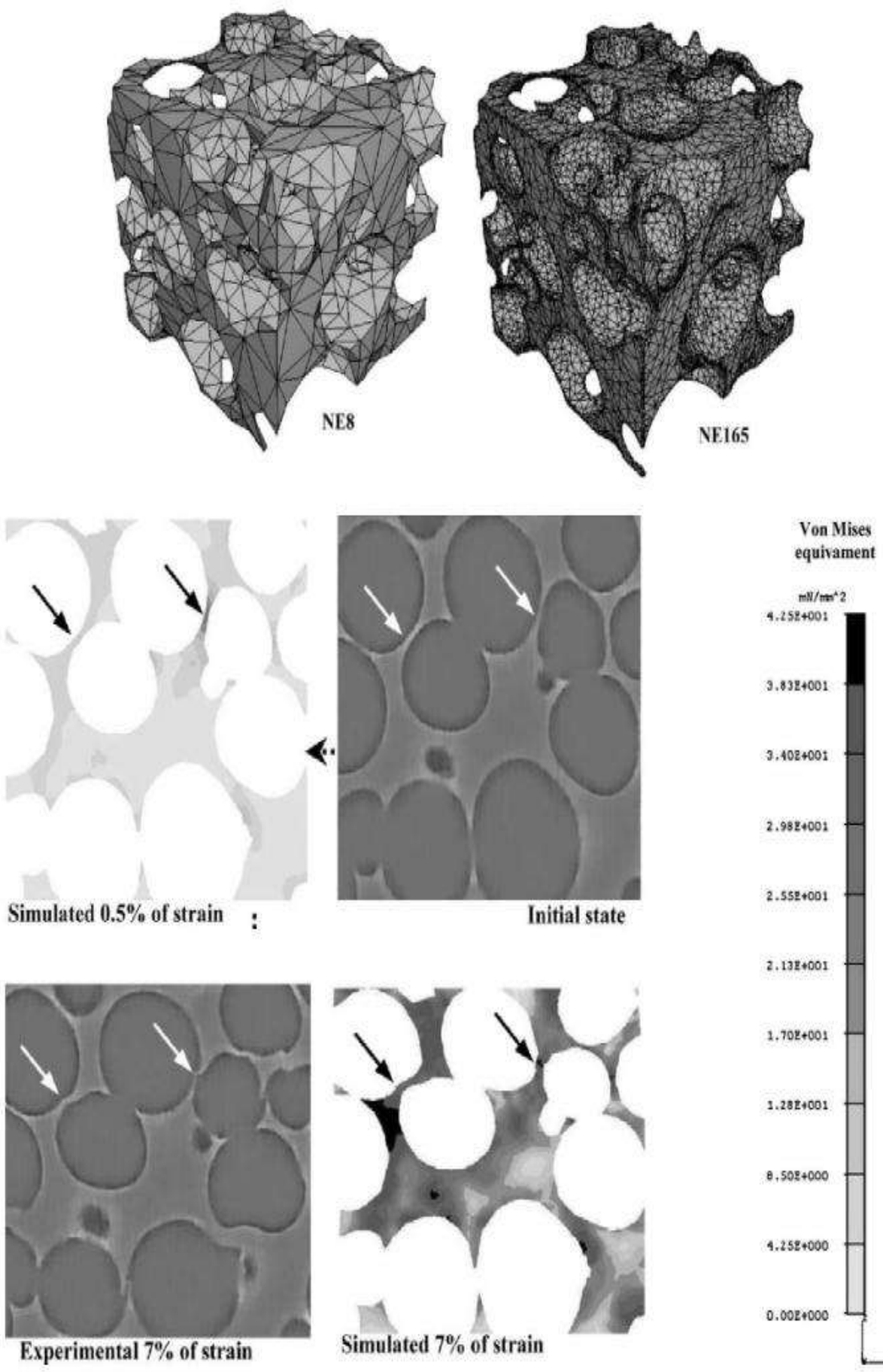


Figure 17 . En haut, exemples de matériaux cellulaires polymères maillées avec des éléments volumiques tétraédriques. En bas, résultat d'une coupe du calcul de compression élastique comparé à un essai de compression avec observation in-situ en tomographie aux rayons X.

1.8. Applications des matériaux cellulaires dans l'industrie

De nos jours, les matériaux cellulaires sont largement utilisés dans l'industrie en raison de leur haute résistance spécifique (en terme de masse). On les trouve souvent sous forme d'âmede panneaux ou de poutres sandwich en vue d'accroître le rapport rigidité/masse de structures mécaniques dans l'aérospatiale, l'automobile... Ils sont fréquemment utilisés comme absorbeurs d'énergie en cas d'impact grâce à leur déformation plastique dissipée à un niveau d'effort presque constant sur une large gamme de déformations. Un exemple est la crash box utilisée pour absorber l'´energie cinétique en cas de collision d'un véhicule. Ils sont aussi utilisés pour l'amortissement des vibrations dans les machines outils, la résistance au feu dans les bâtiments, la mise en point de prothèses, d'implants médicaux, etc. Les matériaux cellulaires sont aussi présents dans l'industrie d'emballage : les matériaux polyuréthane et polystyrène et le nid d'abeille thermoplastique sont largement utilisés dans le transport de marchandises. Ils sont aussi excellents isolateurs acoustique lorsque ce sont des structures à cellules fermées. Au contraire ils ont une excellente capacité de transfert de chaleur et d'échange chimique lorsqu'ils ont une structure à porosité ouverte. Cependant, ces propriétés sont souvent combinées. Une application idéale serait une application qui servirait à la fois `a réduire le poids de la structure, à absorber l'´energie dans une situation d'accident et d'isoler le bruit et la chaleur. Une telle application multifonctionnelle est, naturellement, difficile `a mettre en œuvre, mais souvent il serait possible de satisfaire une application `a double intérêt, par exemple la réduction de poids et l'isolation acoustique. **[40].**

a) Construction automobile

Le poids des véhicules a tendance à augmenter sous l'effet des équipements de sécurité. En même temps on cherche à les alléger pour diminuer la consommation de carburant. L'introduction de panneaux sandwichs en mousse d'aluminium est un des moyens de concilier ces deux aspects antagonistes. Le recours à ces panneaux permet, en plus du gain de poids considérable, d'obtenir des structures avec une grande capacité d'absorption de l'énergie et une bonne résistance à la chaleur. Cette aptitude est exploitée aux points les plus susceptibles d'être accidentés pour y créer une

déformation contrôlée et une dissipation optimale de l'énergie. Les mousses d'aluminium sont utilisées également dans les pare-chocs et les crash-box pour l'absorption de choc à l'avant de véhicule. Ces derniers systèmes, placés entre le pare-chocs et le châssis, sont constitués de boîtes de mousse d'aluminium à 75 % de vide qui absorbent l'énergie par écrasement en cas de choc. Une mousse d'aluminium à 95% de vide, tapissant le capot avant protégerait les piétons de chocs frontaux en cas de heurts à faible vitesse. Positionnée sous le bloc volant elle protégerait les jambes du conducteur. Sur le montant entre la vitre et le pare-brise, elle protégerait sa tête **[41].**

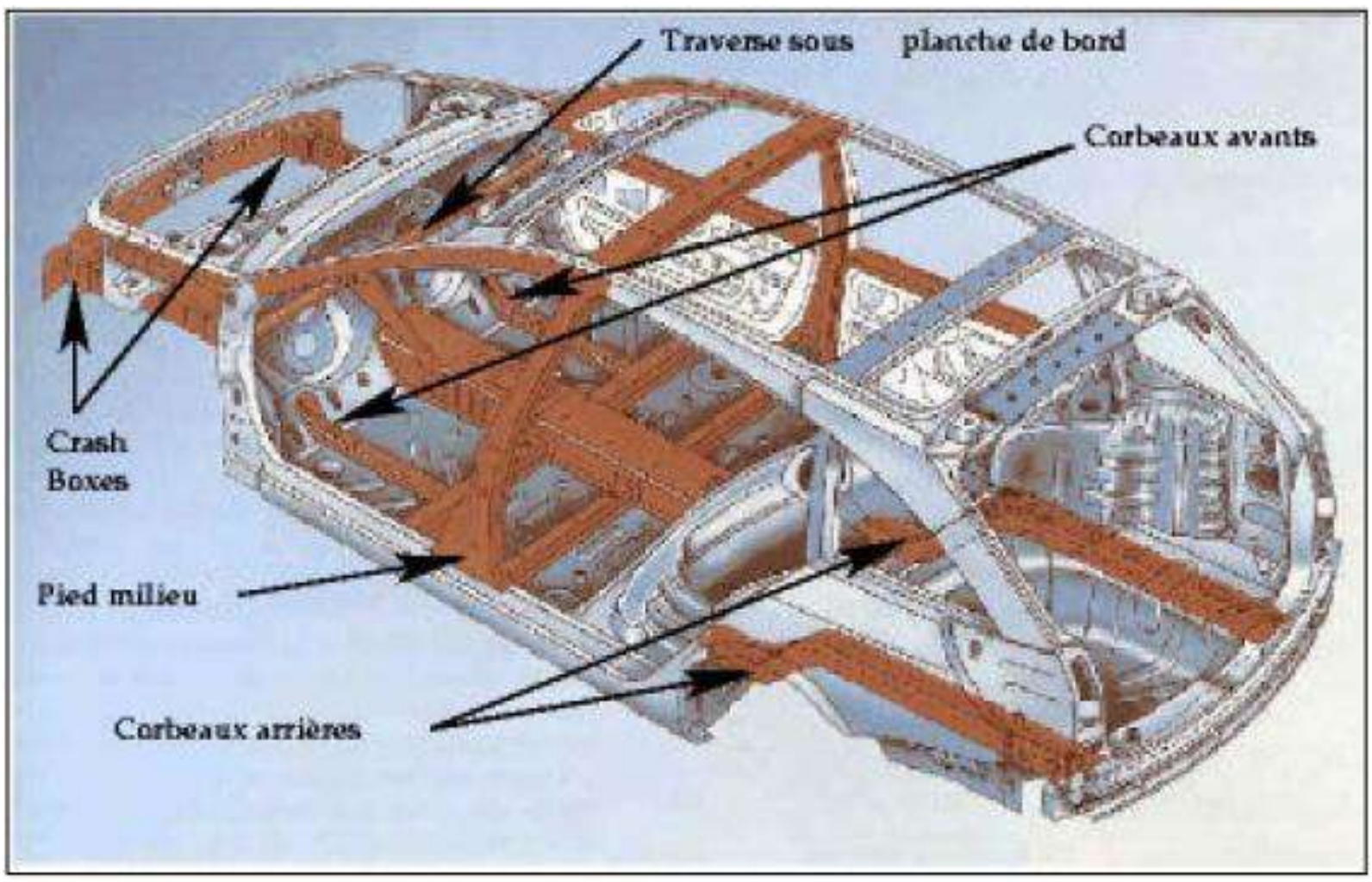


Figure 18 : Caisse de RENAULT: renforcement structural avec des matériaux cellulaires d'aluminium

b)Construction aéronautique

Les matériaux cellulaires sont très utilisés dans l'aéronautique où la réduction de poids est capitale. Elles y remplacent de plus en plus souvent les structures à nids d'abeille car elles sont moins coûteuses et résistent mieux à la chaleur. Elles sont utilisées dans

tous les éléments structurels (ailes, fuselage, plancher…) et dans les moteurs (silencieux, échangeurs, filtres, injection de carburant…)

C)Construction navale

Ce secteur est également un gros consommateur de matériaux cellulaires d'aluminium (sous forme de panneaux) pour leur légèreté et leurs caractéristiques mécaniques. Les matériaux cellulaires à pores isolés sont utilisés comme structures flottantes grâce à leur tolérance élevée aux dégâts. Elles maintiennent leur flottabilité même quand elles sont localement endommagées. De plus, elles résistent à de plus hautes pressions et températures que les matériaux cellulaire polymères. On retrouve également des structures en matériaux cellulaires d'aluminium sur des plates formes élévatrices à bord de porte avions



Figure 19: Exemples de pièces dans l'industrie (FOAMINAL)

d)Application mécanique

Comme le nid d'abeille, les matériaux cellulaires sont utilisés pour rigidifier une structure sans augmenter la masse de la structure. Pour ce type d'application, on utilise des matériaux cellulaires en général à pore fermé et en aluminium. Les panneaux de

mousse sont collés à des plaques aluminium pour obtenir un sandwich composite résistant localement (selon l'épaisseur de la tole) et rigide sur la longueur en fonction de l'épaisseur de mousse .Les matériaux cellulaires sont utilisés dans d'autres domaines plus ciblés comme l'absorption d'énergie. Exemple de domaine: - Automobile et ferroviaire (crash) - Sécurisation de l'humain dans le militaire L'avantage des mousses métalliques, qu'elles soient régulières ou stochastiques, est que la réaction est constante quel que soit le sens de l'effort. En effet, les mousses sont homogènes. Elles présentent un plateau de contrainte constant suivant la déformation. Cette déformation peut aller jusqu'à 80 % d'allongement. **[42].**

Chapitre. II

Techniques expérimentales et matériaux de l'étude

Chapitre 2 : 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. [43].** Une caractérisation microstructurale, des essais mécaniques en compression 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.

2.1Matériaux 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 20



Figure. 20 : Photographie de l'échantillon obtenu par le procédé de réplication inverse de granulométrie de 2 mm

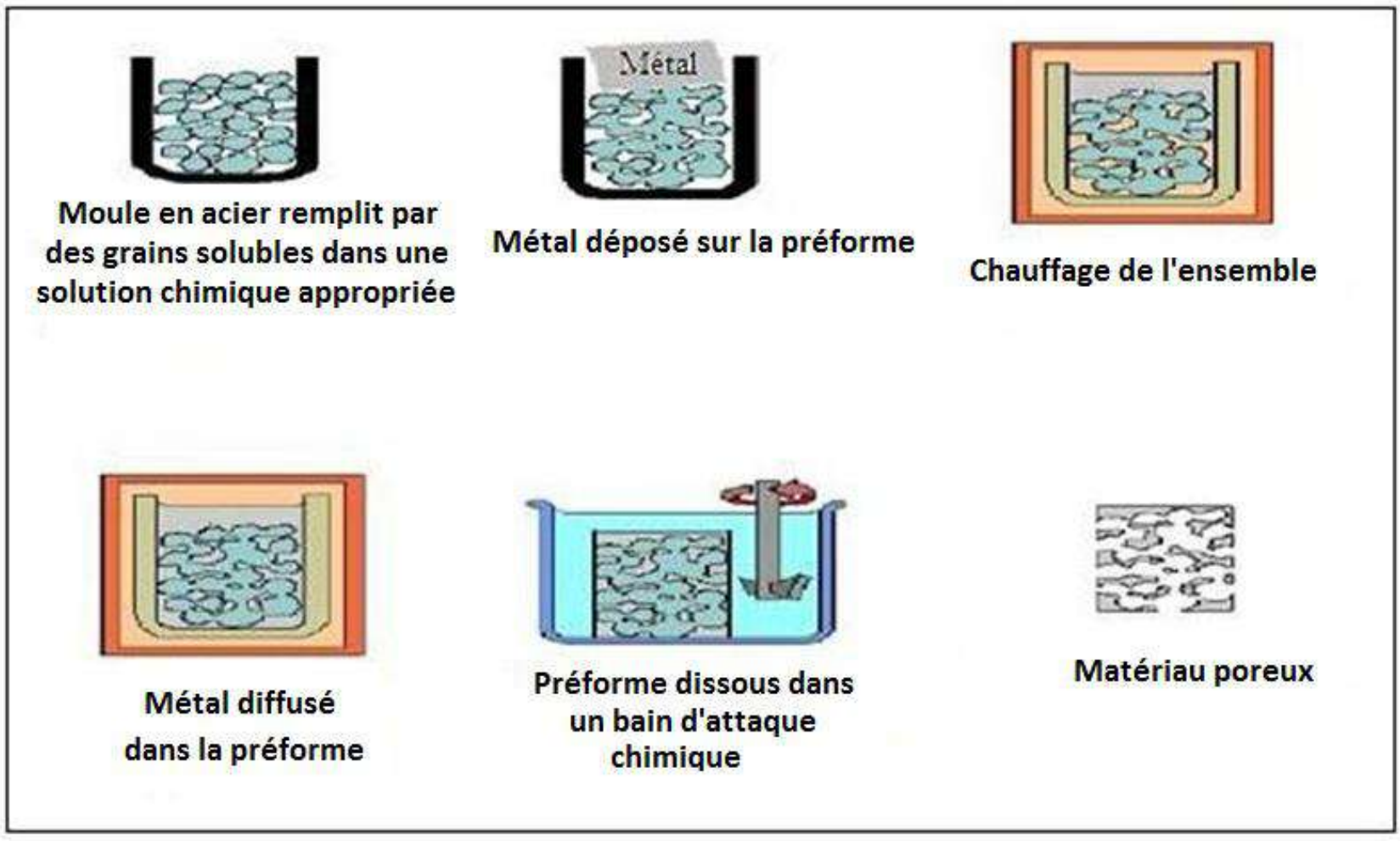


Figure. 21 : Principe de la méthode d'élaboration des matériaux poreux par la méthode de réplication inverse.

2.2 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 conductivimètre 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.

2.3 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 fig. 22).

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.

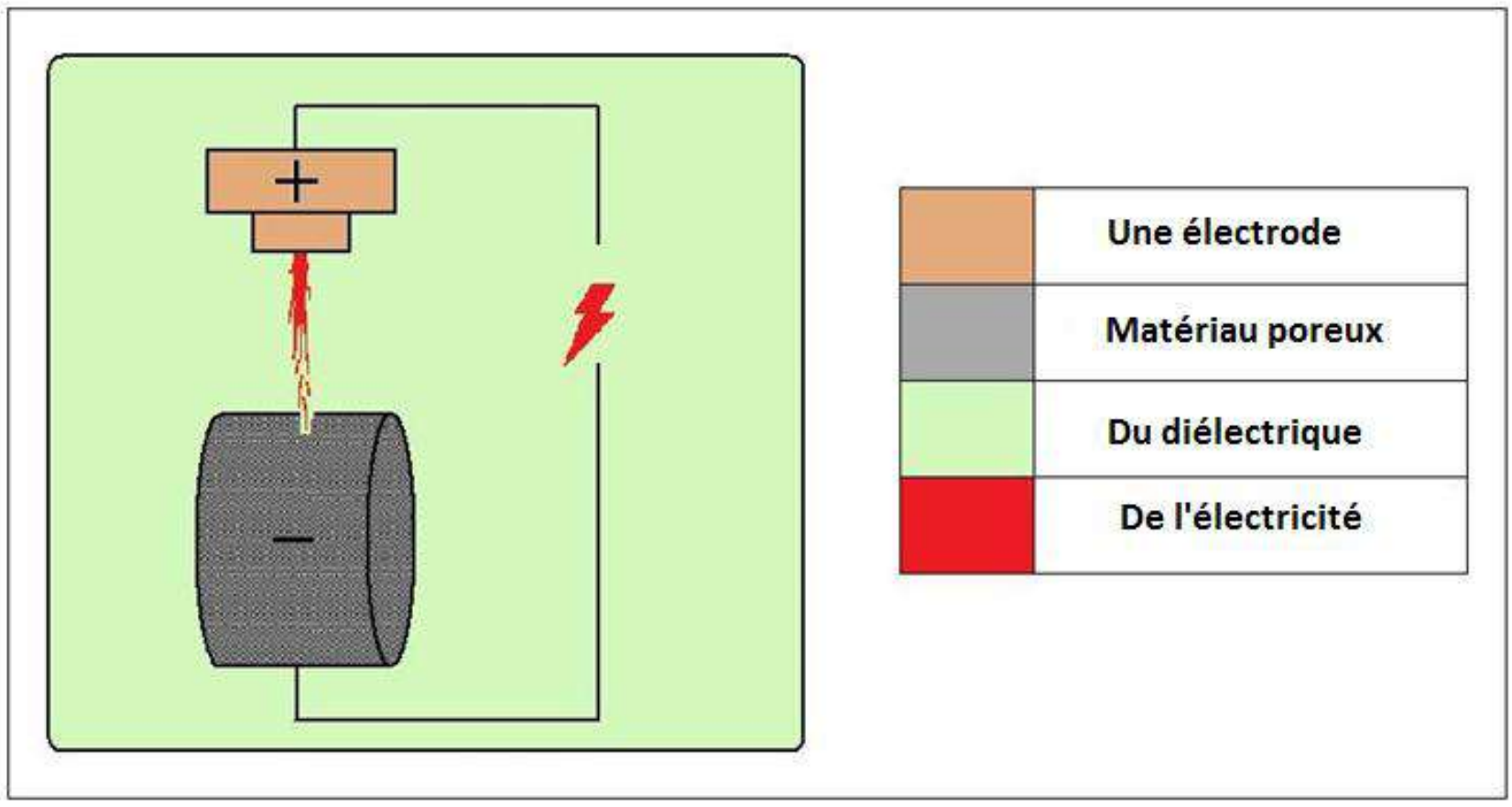


Figure. 22 : Schéma du principe du processus d'électroérosion.

2.4 Techniques de caractérisation structurale

2.4.1. 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.

2.5 Caractérisations mécaniques des échantillons

2.5.1. Essais mécaniques de compression uniaxiale

Le dispositif expérimental est représenté sur la figure 23. Nous avons utilisé une machine de compression (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 24 Le choix de la vitesse de déformation a été fait de façon à ne pas influencer le changement de mécanisme de nos échantillons mousseux.

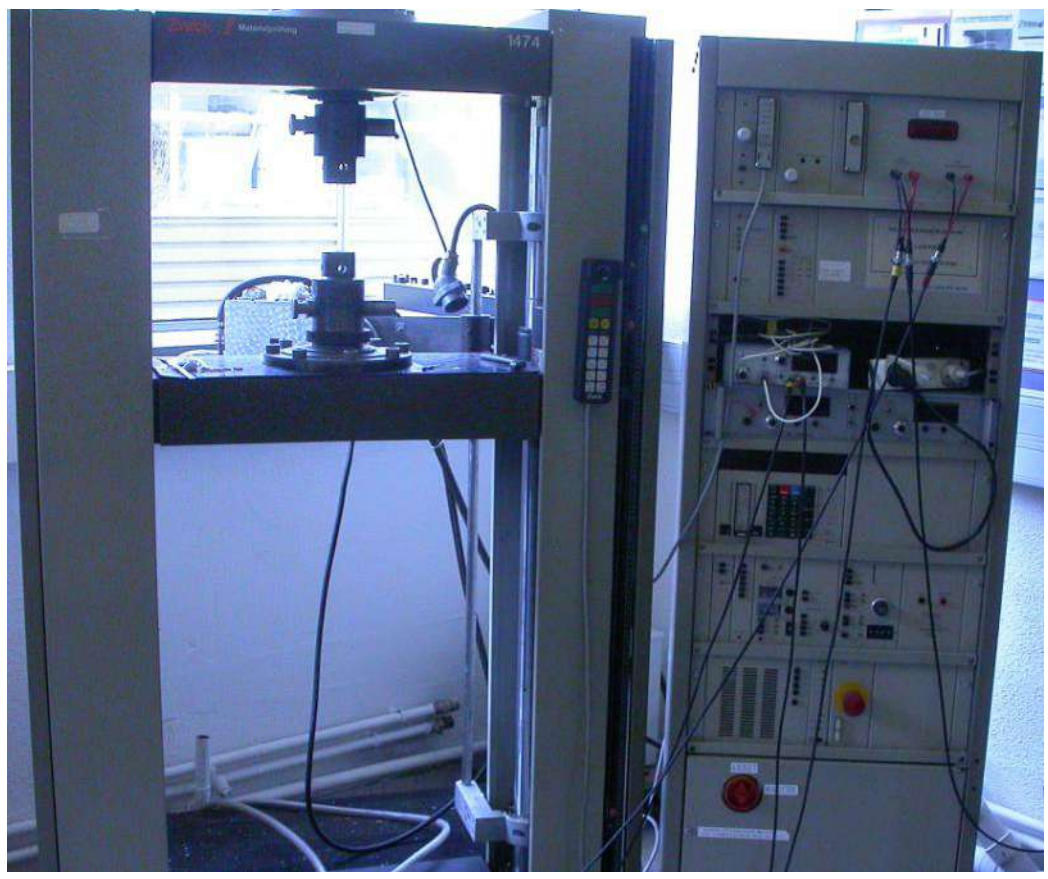


Figure. 23 : Dispositif expérimental pour les essais de compression sur les matériaux cellulaires élaborés au cours cette étude.

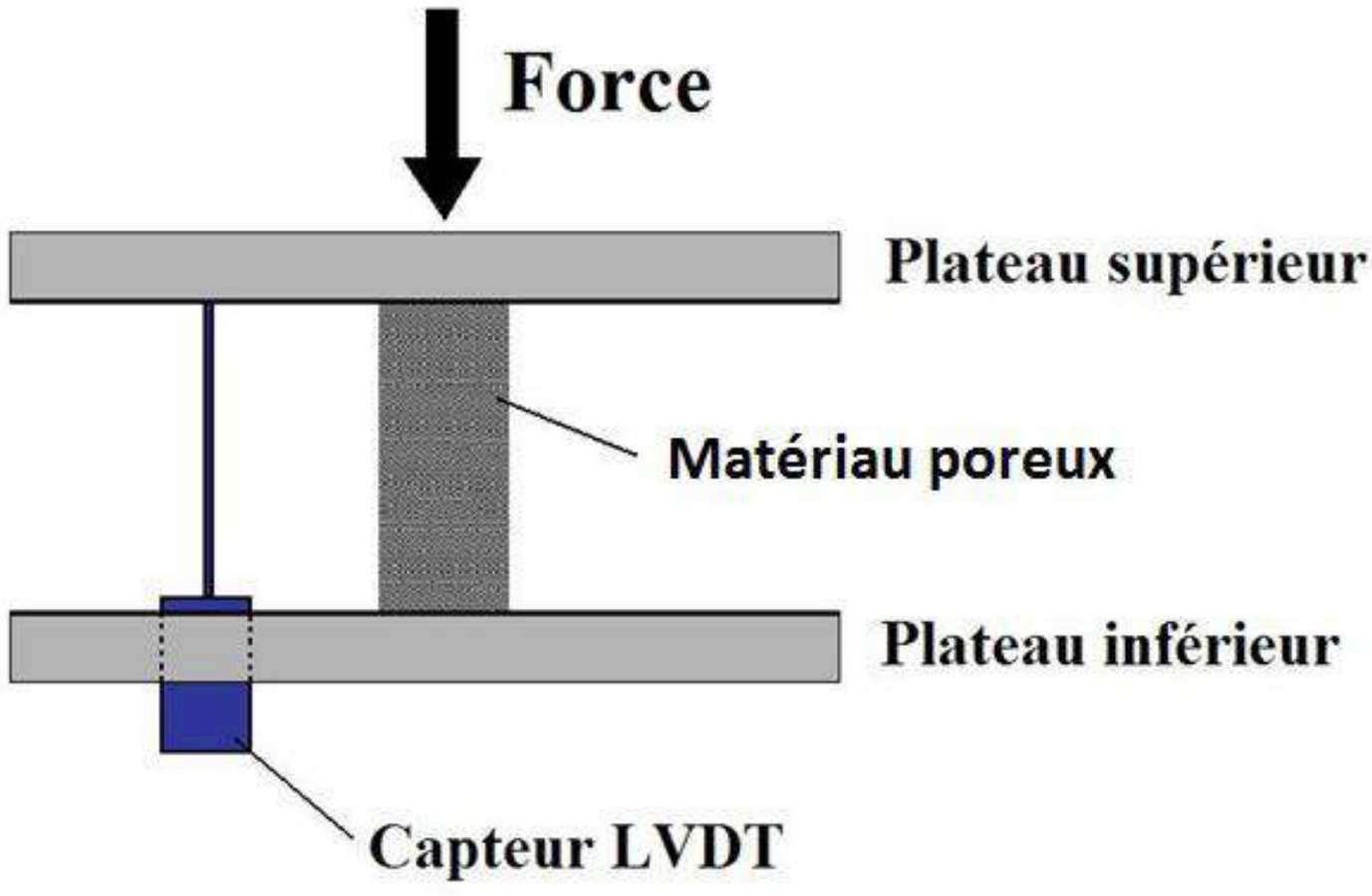


Figure. 24 : Croquis des plateaux de la machine d'essai de compression sur lesquels est monté un capteur de déplacement linéaire LVDT.

2.6 Programme utilisé pour le calcul des énergies d'absorption

Les courbes obtenues lors des essais de compression uniaxiale lors de cette étude sont représentées dans le prochain chapitre de cette thèse. Néanmoins, nécessite le calcul de la surface obtenu par un logiciel : MATLAB sous la version 2008 sous la license_Client-PC_161051_R2008a.lic (Voir programme N°1) .

2.6.1 programme N°1

```
function integral=echantillon(num,limite)

switch  num
    case 01
dh=xlsread('01Echantillon 3A.xls',2,'B4:B3004');
p=xlsread('01Echantillon 3A.xls',2,'F4:F3004');
titre='01Echantillon 3A';
case 02
dh=xlsread('02Echantillon 1A.xls',2,'B5:B2481');
p=xlsread('02Echantillon 1A.xls',2,'F5:F2481');
titre='02Echantillon 1A';
case 03
dh=xlsread('03Echantillon 1B.xls',2,'B3:B2487');
p=xlsread('03Echantillon 1B.xls',2,'F3:F2487');
titre='03Echantillon 1B';
case 04
dh=xlsread('04Echantillon 2A.xls',2,'B3:B2271');
p=xlsread('04Echantillon 2A.xls',2,'F3:F2271');
titre='04Echantillon 2A';
case 05
dh=xlsread('05Echantillon 2B.xls',2,'B3:B2339');
p=xlsread('05Echantillon 2B.xls',2,'F3:F2339');
titre='05Echantillon 2B';
case 06
dh=xlsread('06Echantillon 4.xls',2,'B13:B2643');
p=xlsread('06Echantillon 4.xls',2,'F13:F2643');
titre='06Echantillon 4';
case 07
dh=xlsread('07Echantillon-D-détai.xls',1,'B16:B2256');
p=xlsread('07Echantillon-D-détai.xls',1,'F16:F2256');
titre='07Echantillon-D-détai';
end
scatter(dh,p,'r','.')
[dht,ai]=sort(dh);
pt=p(ai);
j=1;
vu(1)=dht(1);
```

```
for i=1:(length(dht)-1)
    if dht(i)<limite
      if dht(i)<dht(i+1);
      j=j+1;
 vu(j)=dht(i+1);
      end
    end
end
for i=1:length(vu)

    mc=find(vu(i)==dht(:));
 mdm(i)=mean(pt(mc));
end
mdm(1)=0;
hold on
plot(vu,mdm)
integral=0;
for i=1:(length(vu)-1)
  t=((mdm(i)+mdm(i+1))/2)*(vu(i+1)-vu(i));
  integral=integral+t;
  hold on
  px=[vu(i+1),vu(i+1)];
  py=[0,mdm(i+1)];
  plot(px,py);
end
axis on
    xlabel('Displacement delta L (mm)')
ylabel('Compression Load (kN)')
title(titre)
grid on
```

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

Chapitre.III

Matériaux cellulaires de Sn-Pb
Résultats & discussions

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

3.1. Procédé d'élaboration de matériau cellulaire 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 la compression 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.21 du chapitre2).

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 ?

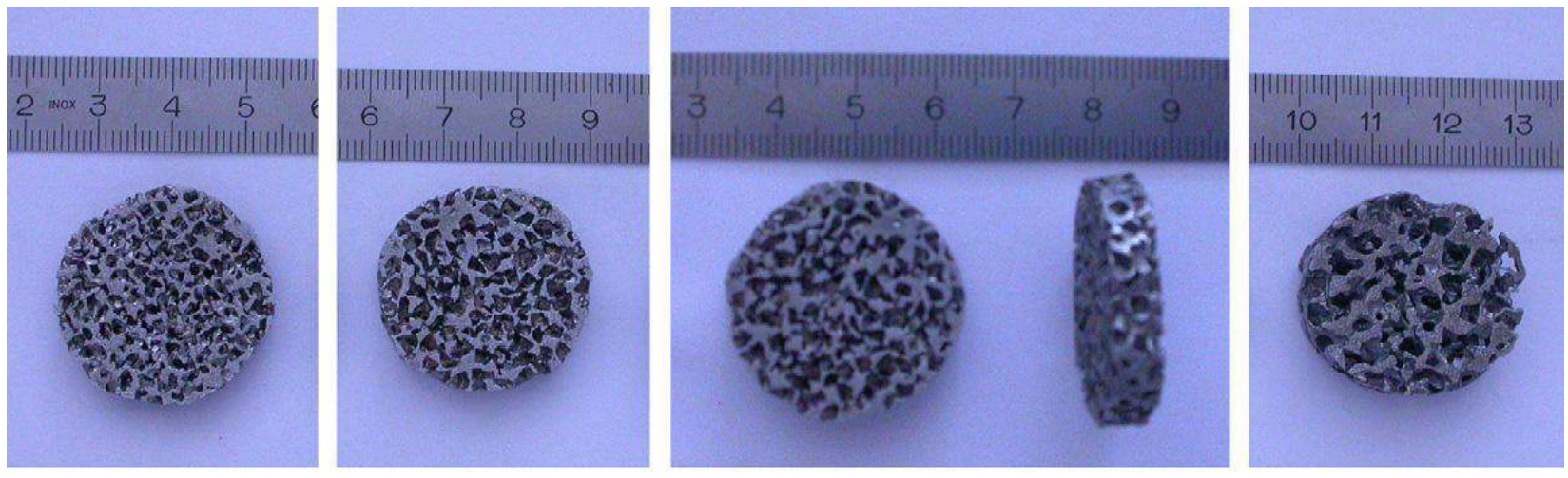
Pour répondre à la question, nous avons utilisé le même protocole expérimental pour la mesure de la conductivité électrique. Mais cette fois ci, à l'aide d'une perceuse électrique possédant une mèche très fine, nous avons fait des trous partout dans l'échantillon qui est plongée dans l'eau distillée. 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	25	25	25
Valeur de conductivité de l'eau distillée en µS/cm	0,658	0,872	0,639
Valeur de conductivité (eau distillée et mousse) en µS/cm	0,731	0,864	0,607
Valeur de conductivité (eau distillée et mousse percée) en µS/cm	0,679	0,863	0,621

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 fig. 25).



(a) *(b)* *(c)* *(d)*

Figure. 25 : Photographies des échantillons de Sn-Pb de différentes granulométries découpées par le processus d'électroérosion.

(a) granulométrie 1,6mm, (b) granulométrie 2mm, (c) granulométrie 2,5mm,

(d) granulométrie 3,15mm.

3.2. Technique de caractérisation structurale

3.2.1. 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 (voire figure,.26).

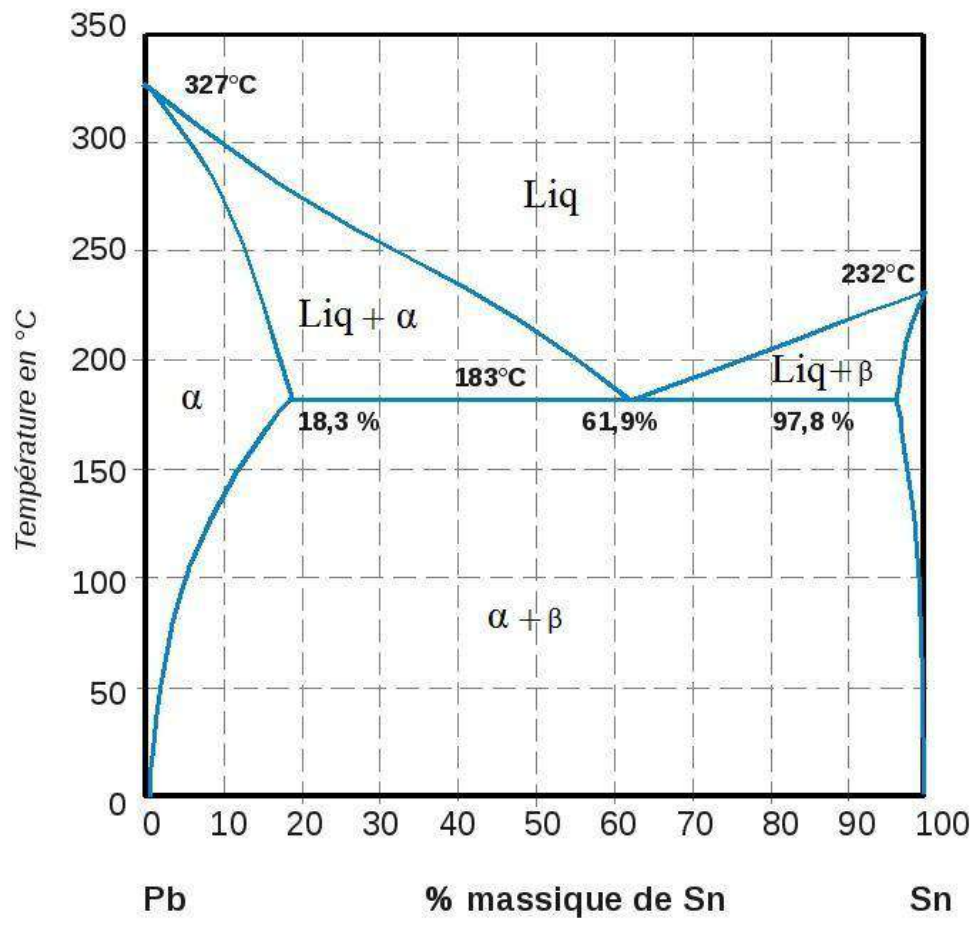


Figure. 26: Diagramme d'équilibre de phases de l'alliage binaire Sn-Pb

Ce diagramme comporte :

- une phase Liquide : mélange de α et β tout 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.

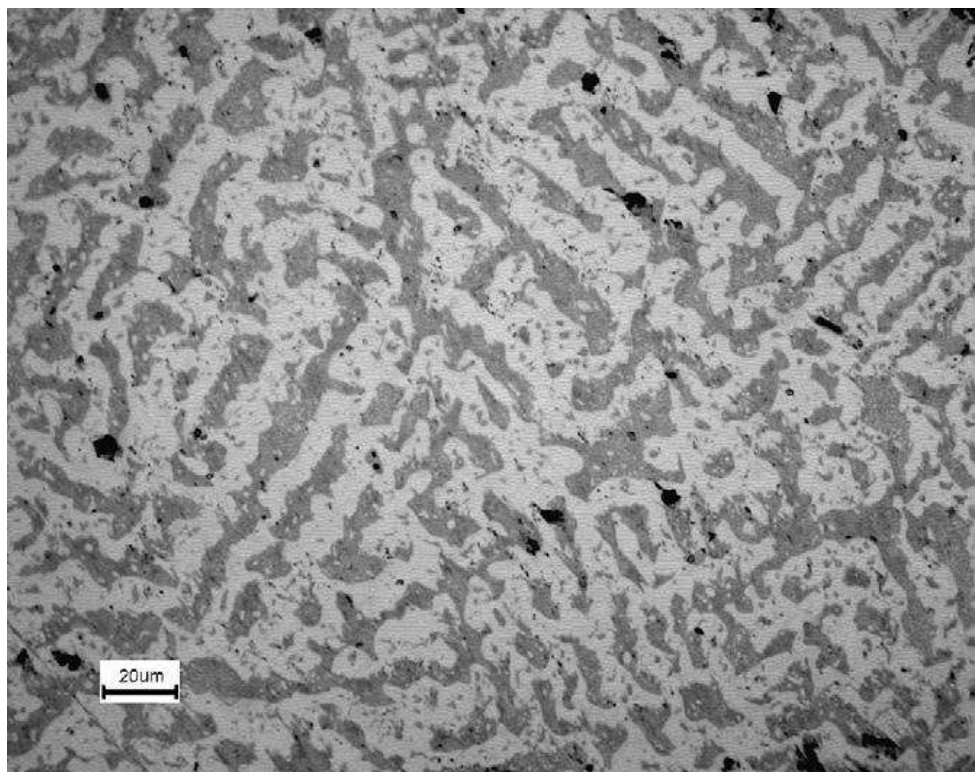


*Figure.2***7:** *Observation micrographique de l'alliage Sn50-Pb50, de granulométrie moyenne des pores de 1,6mm.*

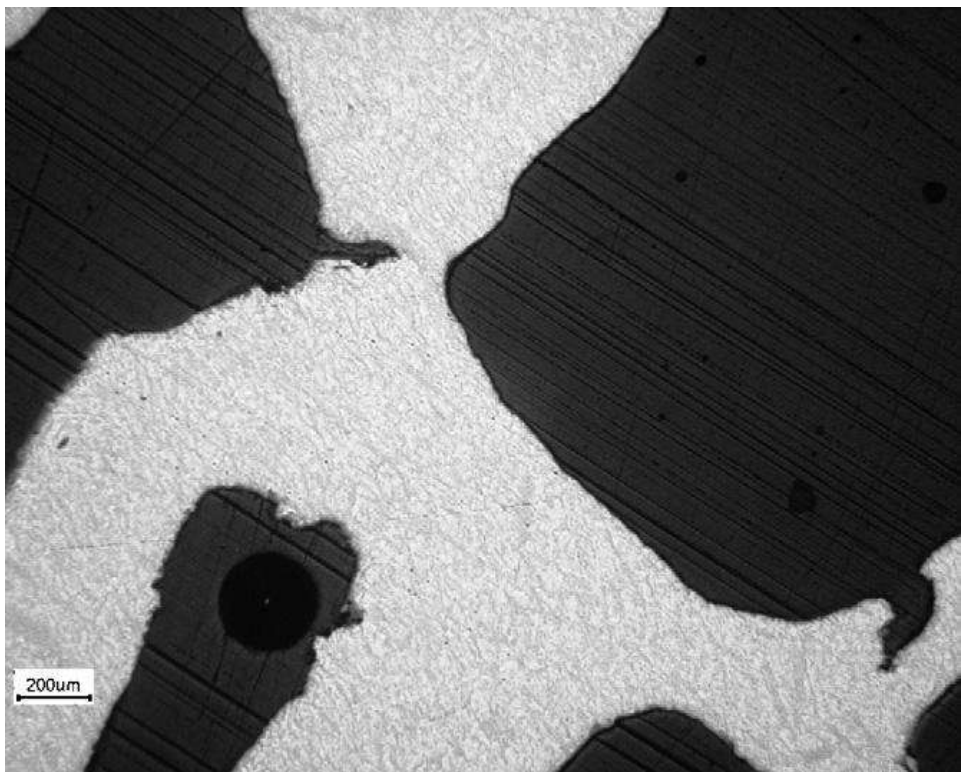


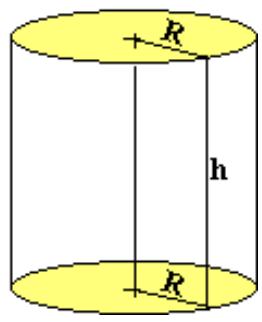
*Figure.28***:** *Observation micrographique de la mousse métallique Sn50-Pb50, de granulométrie moyenne des pores de 3,15mm.*

3.3. Caractérisations mécaniques des matériaux poreux Sn-Pb

3.3.1. 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 :

$$\rho^* = m / \pi R^2 .h$$



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 :

- à 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	11,8082	30 mm	6 mm	2,7856	0,3144
B	2,00 mm	13,8401	30 mm	6 mm	3,2649	0,3685
C	2,50 mm	15,7327	30 mm	6 mm	3,7114	0 ,4189
D	3,15 mm	12,5780	30 mm	6 mm	2,9672	0,3349
E	4,00 mm	12,3601	30 mm	6 mm	2,9158	0,3291

3.3.2. Essais mécaniques de compression uniaxiale

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

a- Courbes force-allongement

La figure 29 illustre l'allure de l'essai de compression de l'échantillon de **classe D.** Cette figure met en évidence trois domaines dont le premier correspond au domaine élastique qui est contrôlé par la compression des arêtes et des parois. Le domaine linéaire, caractérisé par un module de Young apparent E^*, est parfois difficile à mettre en évidence sur ce type de courbe, en raison notamment d'un régime de réarrangement au début de l'essai de compression. Le deuxième domaine, le plateau de compression correspond à l'effondrement progressif des cellules. Le troisième domaine, lorsqu'il n'y a plus de place pour l'effondrement des cellules, des contacts entre les brins s'opèrent et on entre alors dans un régime de densification.

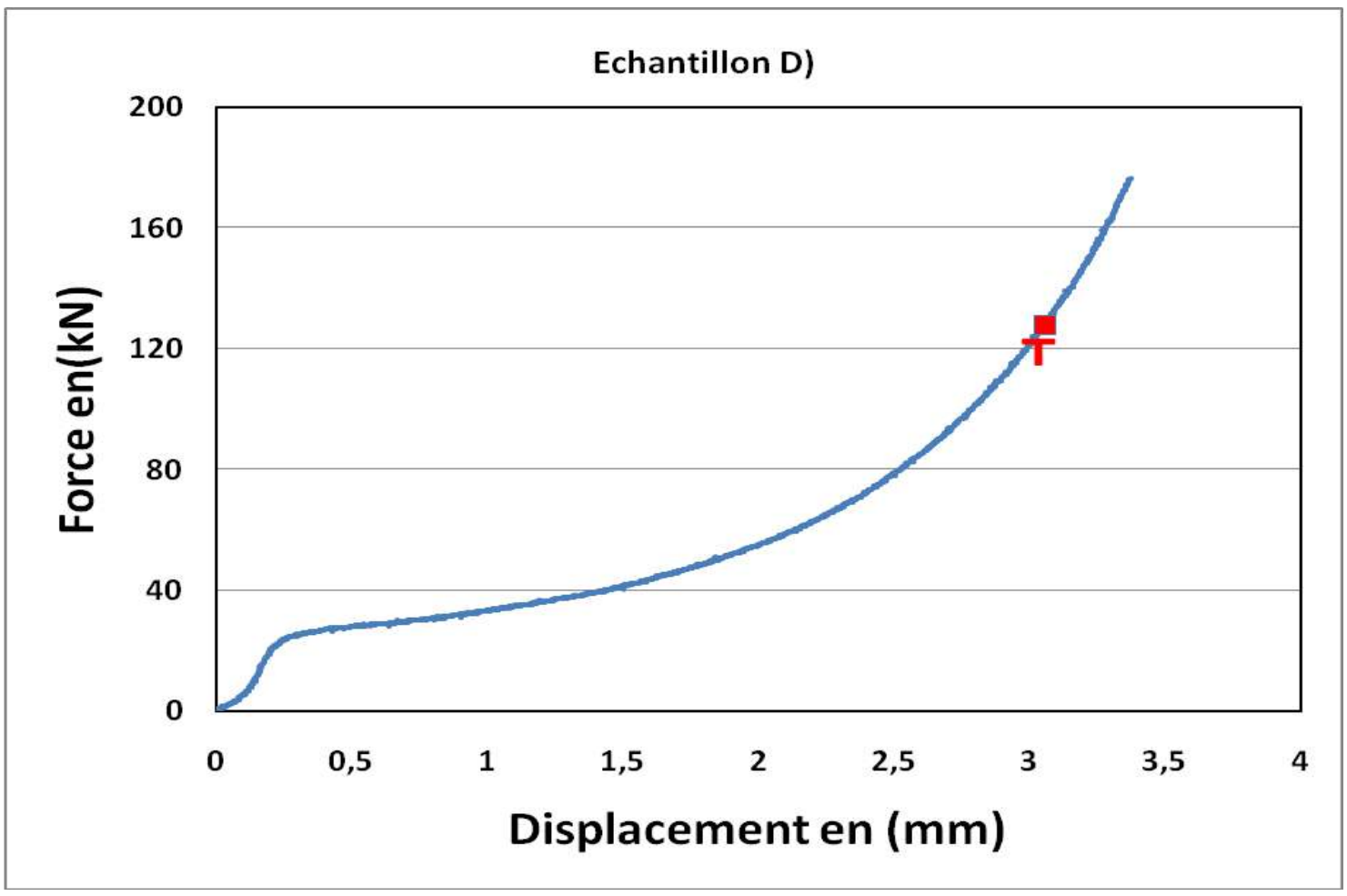


*Figure.***29***: Courbes* ***force-allongement*** *obtenue au cours de l'essai de compression uniaxiale sur l'échantillon de classe D.*

b- Courbes contrainte-déformation

La figure 30, illustre l'allure de l'essai de compression de l'échantillon de classe D.

Pour rappel :

Contrainte = force/ section

Déformation = allongement / H0

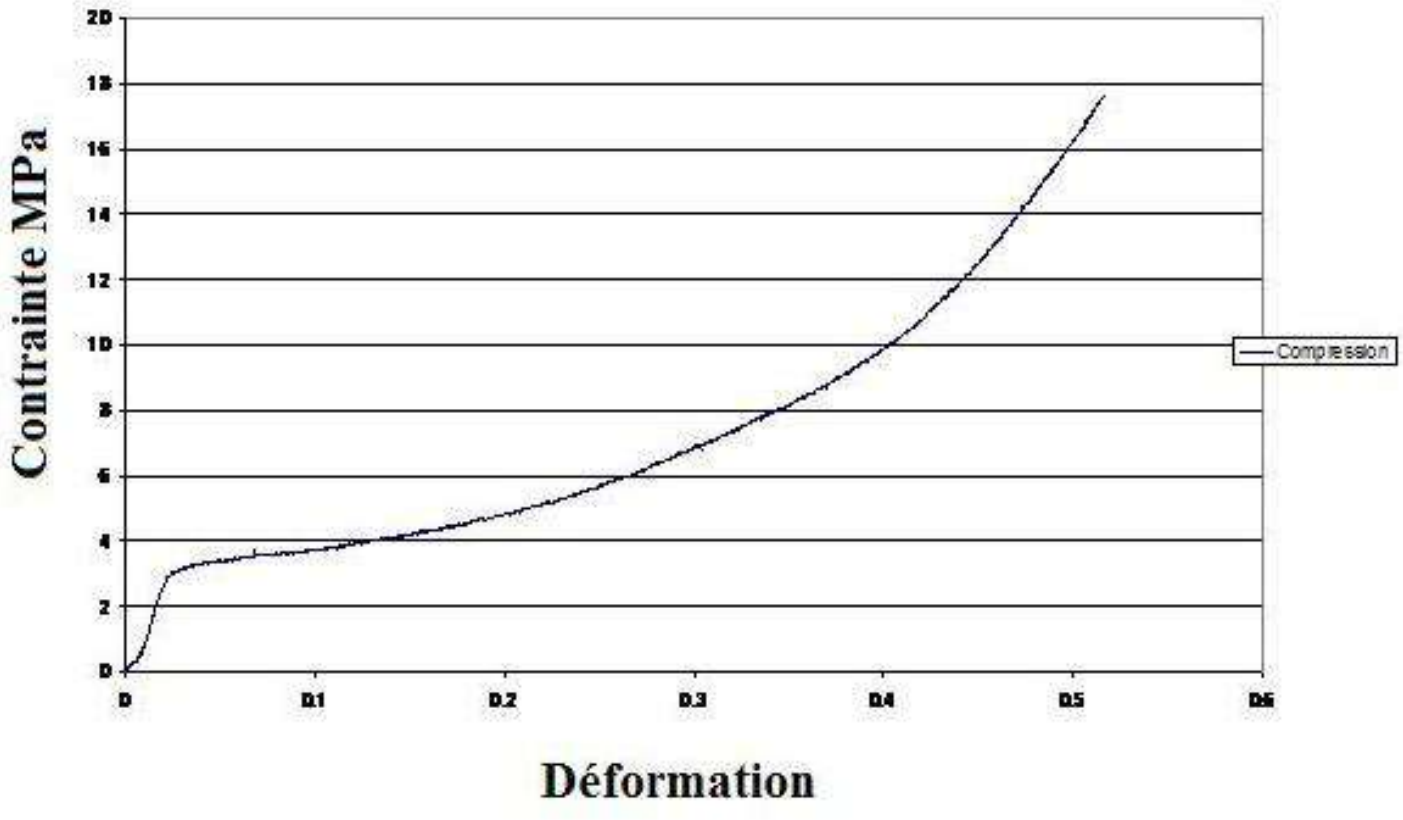


*Figure.***30** :*Courbes contrainte déformation obtenue au cours de l'essai de compression uniaxiale sur l'échantillon de classe D.*

La méthode de détermination de la contrainte de plateau σ_p est également schématisée sur la figure 31. 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).

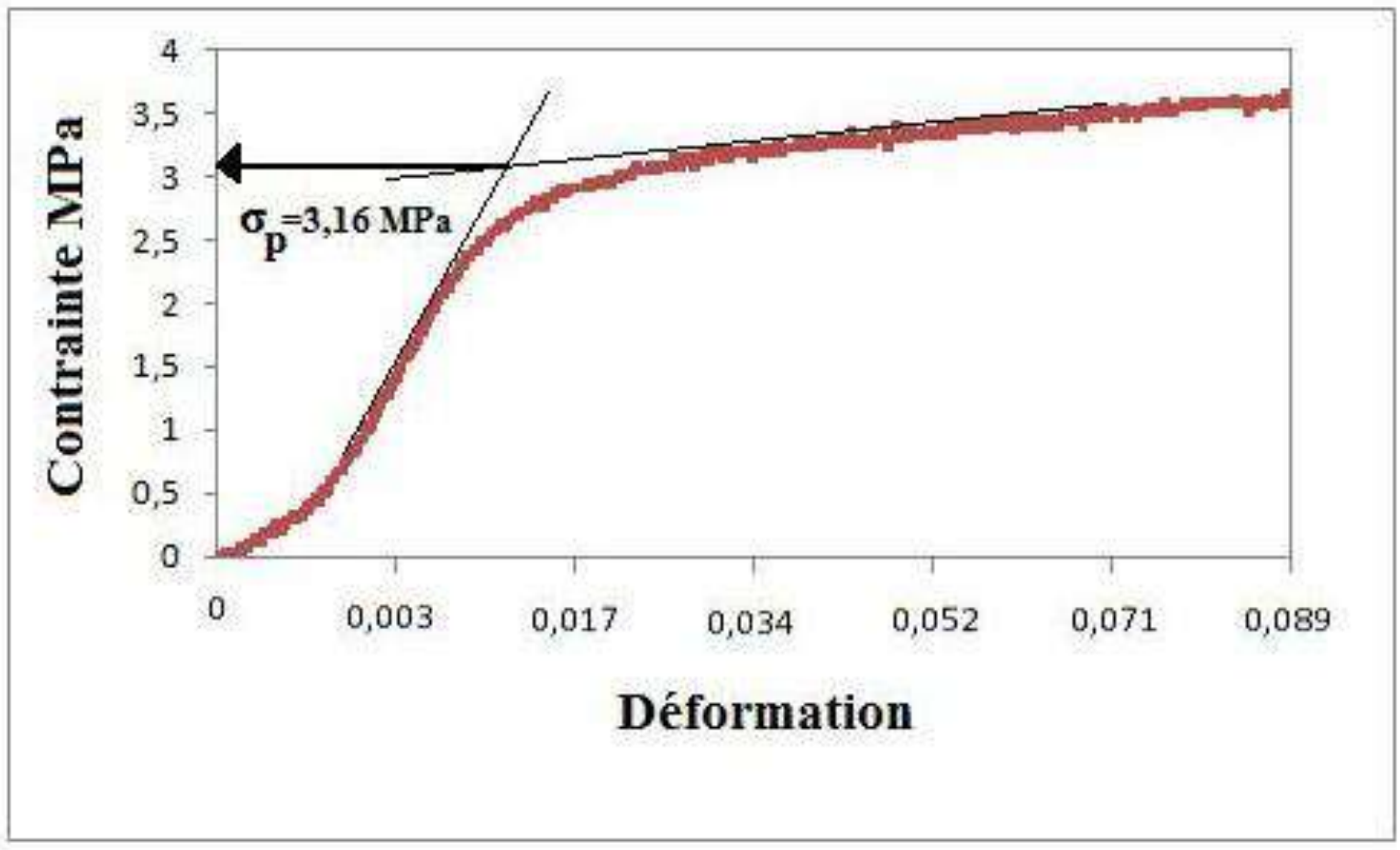


*Figure.***31:** *Agrandissement de la courbe de compression pour les faibles déformations. Schématisation de la méthode de détermination de la contrainte plateau* σ_p.

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

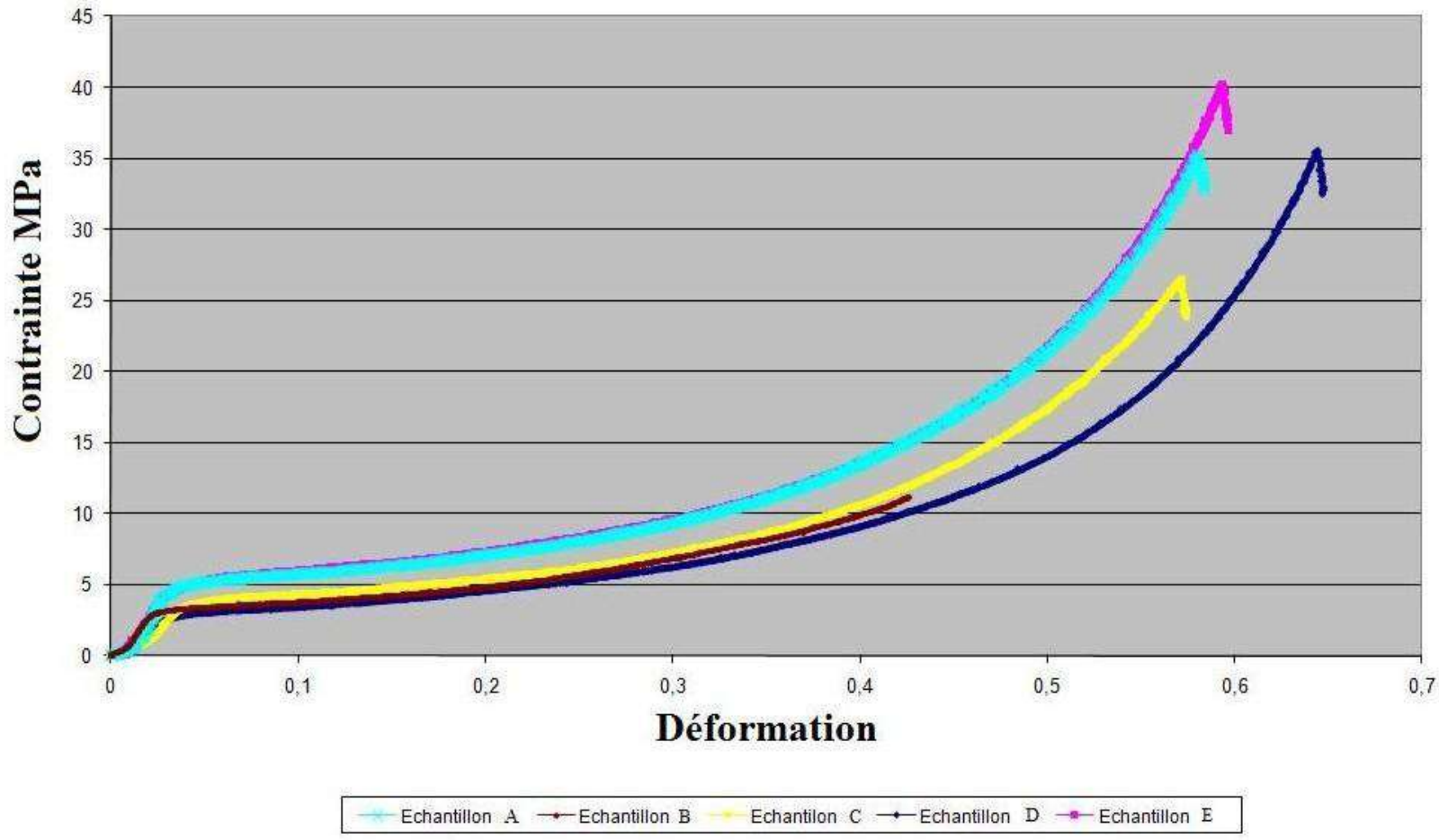


*Figure.***32** *: Courbes contrainte-déformation obtenues au cours des essais de compression uniaxiale sur cinq échantillons type de leur classe de granulométrie.*

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 échantillon et valeur moyenne pour chaque mousse.*

Echantillons		**Densité relative ρ^*/ρ**	**Contrainte de plateau σ_p (MPa)**
A	n°1	0,31 35	2,83
	n°2 (échantillon type)	**0,3144**	**2,88**
	n° 3	0 ,3148	2,89
	Moyenne	**0,3142**	**2,87**
B	n°1	0,3635	3,79
	n°2 (échantillon type)	**0,3685**	**3,84**
	n° 3	0,3692	3,86
	Moyenne	**0,3670**	**3,83**
C	n°1	0,4183	4,98
	n°2 (échantillon type)	**0 ,4189**	**5,00**
	n° 3	0,4192	5,08
	Moyenne	**0,4188**	**5,02**
	n°1	0,3341	3,11

D	**n°2 (échantillon type)**	**0,3349**	**3,16**
	n° 3	0,3353	3,17
	Moyenne	**0,3347**	**3,15**
E	n°1	0,3283	2,99
	n°2 (échantillon type)	**0,3291**	**3,00**
	n° 3	0,3296	3,06
	Moyenne	**0,3290**	**3,02**

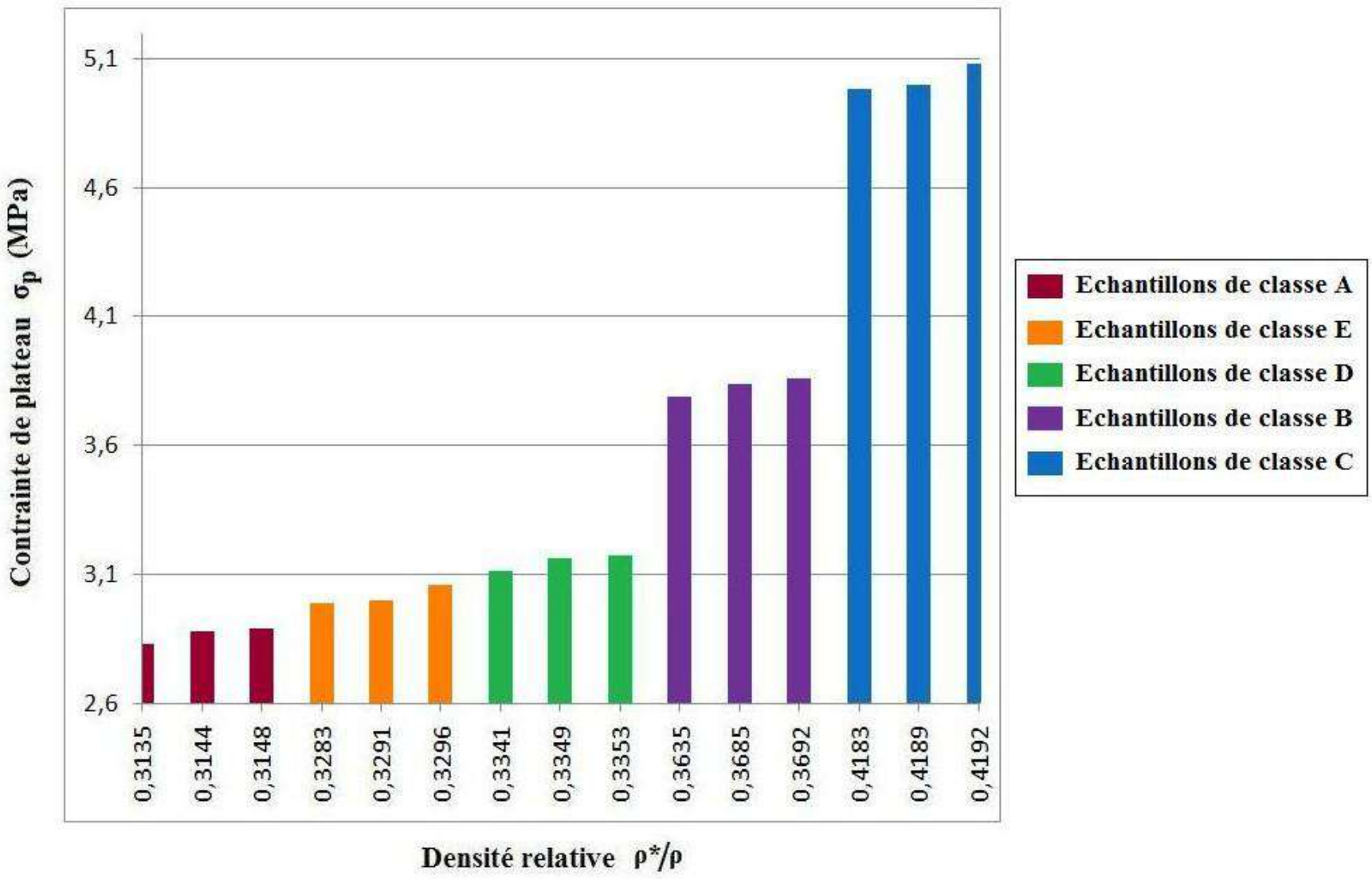


*Figure.***33 :** *Histogramme de la contrainte en fonction de la densité relative des matériaux poreux de différentes classes de granulométries étudiées au cours de l'essai de compression uniaxiale.*

3.4Energie d'absorption

L'absorption d'énergie d'une matériau cellulaire peut être déterminée par des essais de compression. Dans la figure 34, la courbe force-déplacement d'une matériau cellulaire en compression est illustrée. La quantité d'énergie absorbée est l'intégrale de la force de compression par la distance de compression. Pour effectuer une comparaison des différents matériaux comme les absorbeurs d'énergie, la mesure de « l'efficacité » est utilisée. A déformation définie, l'efficacité est le quotient de l'énergie absorbée par le produit de la force maximale et la durée de déformation

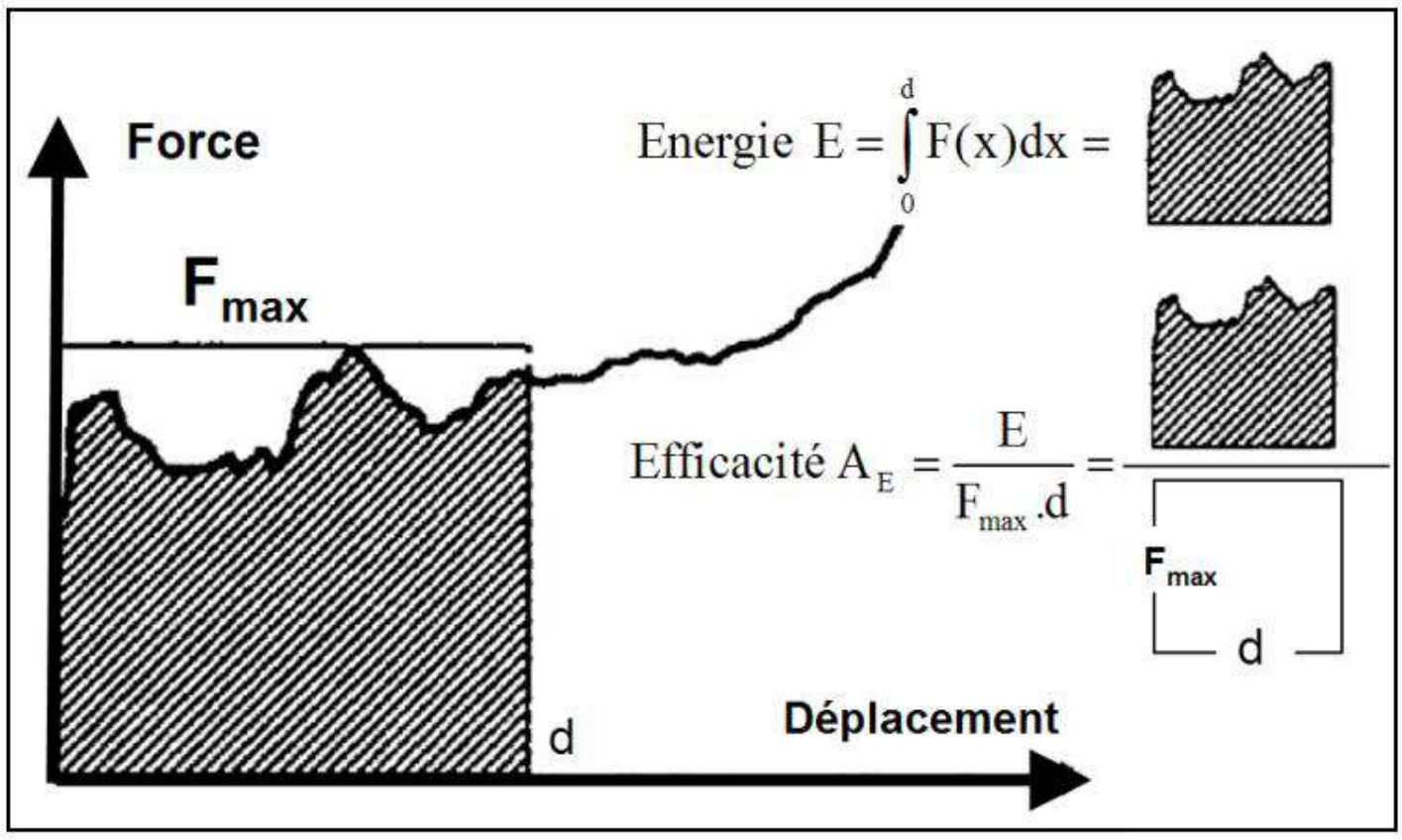
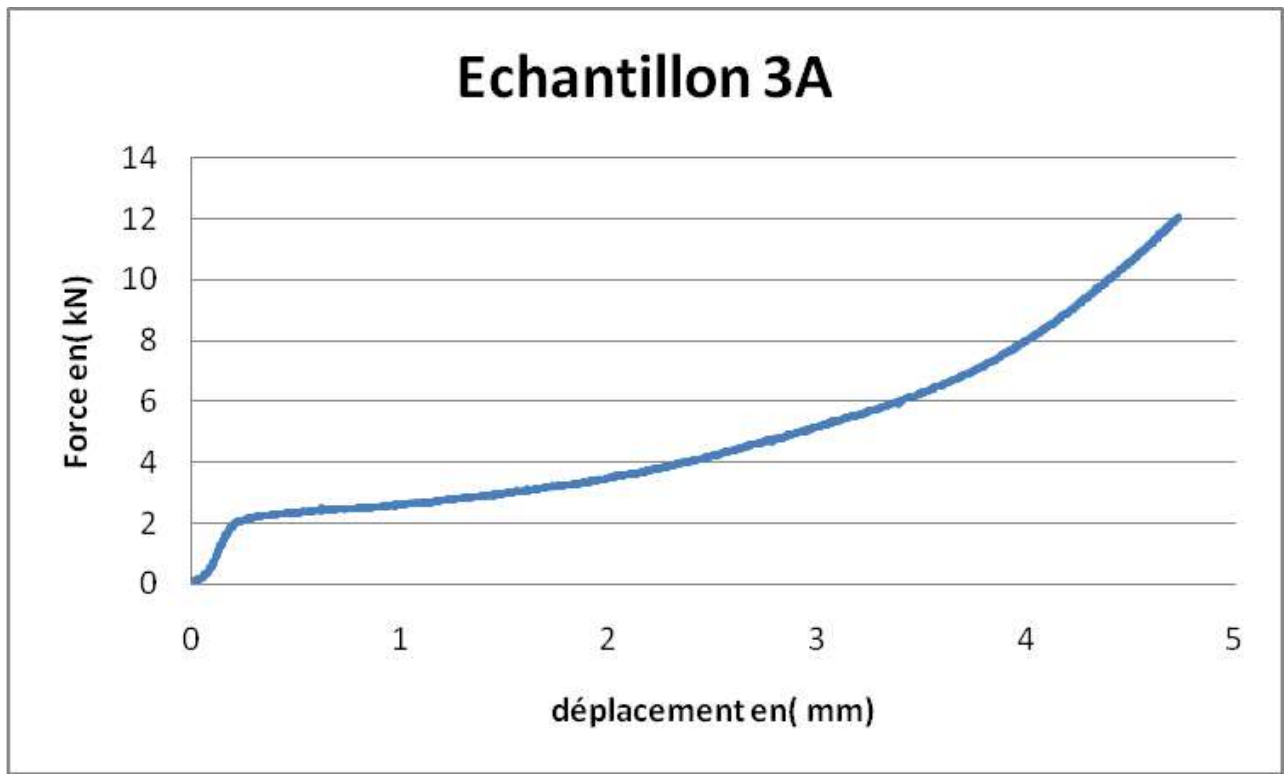


Figure 34: Energie d'absorption et efficacité des matériaux cellulaires

La forme caractéristique de la courbe de l'essai de compression d'une matériaux cellulaires comporte trois zones principales :

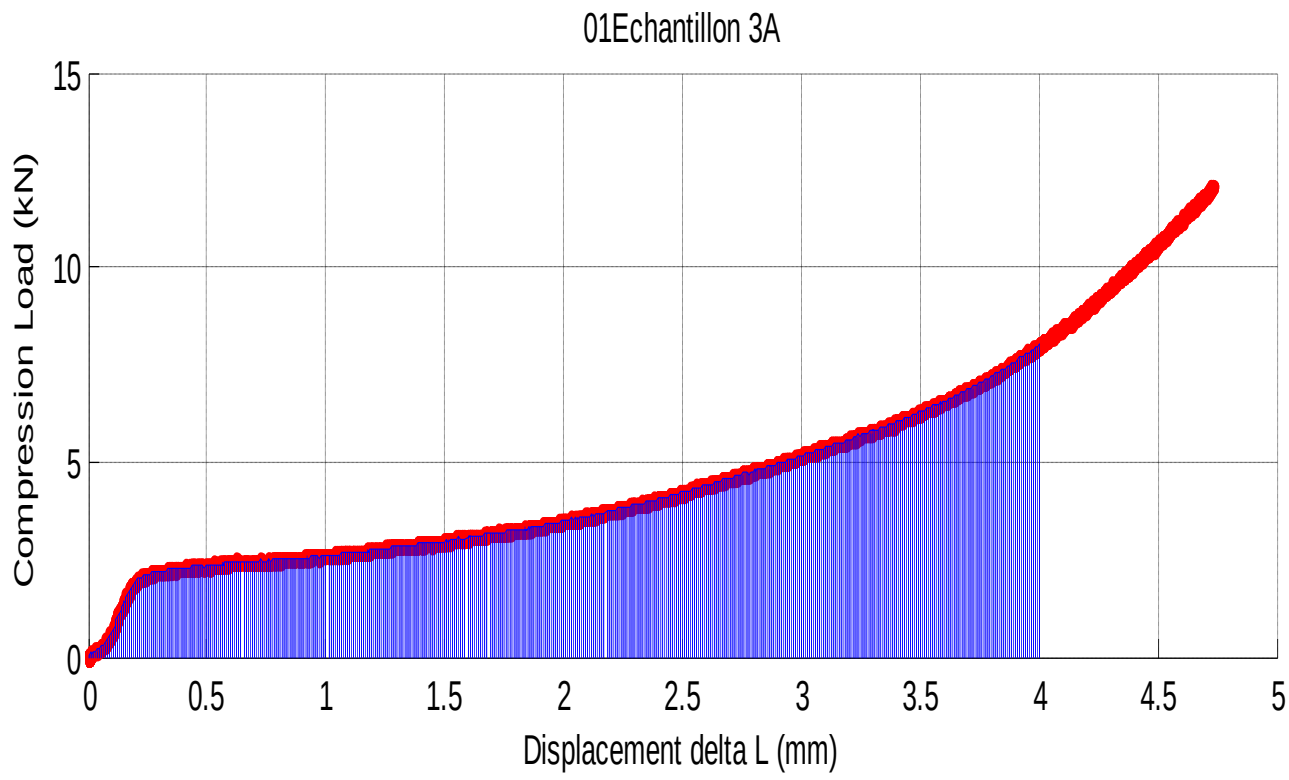
1. Une première phase élastique linéaire, limitée aux faibles déformations.
2. Une deuxième phase de plateau zone d'absorption d'énergie.
3. Une troisième de phase de densification caractérisée par une forte hausse de l'effort.

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.



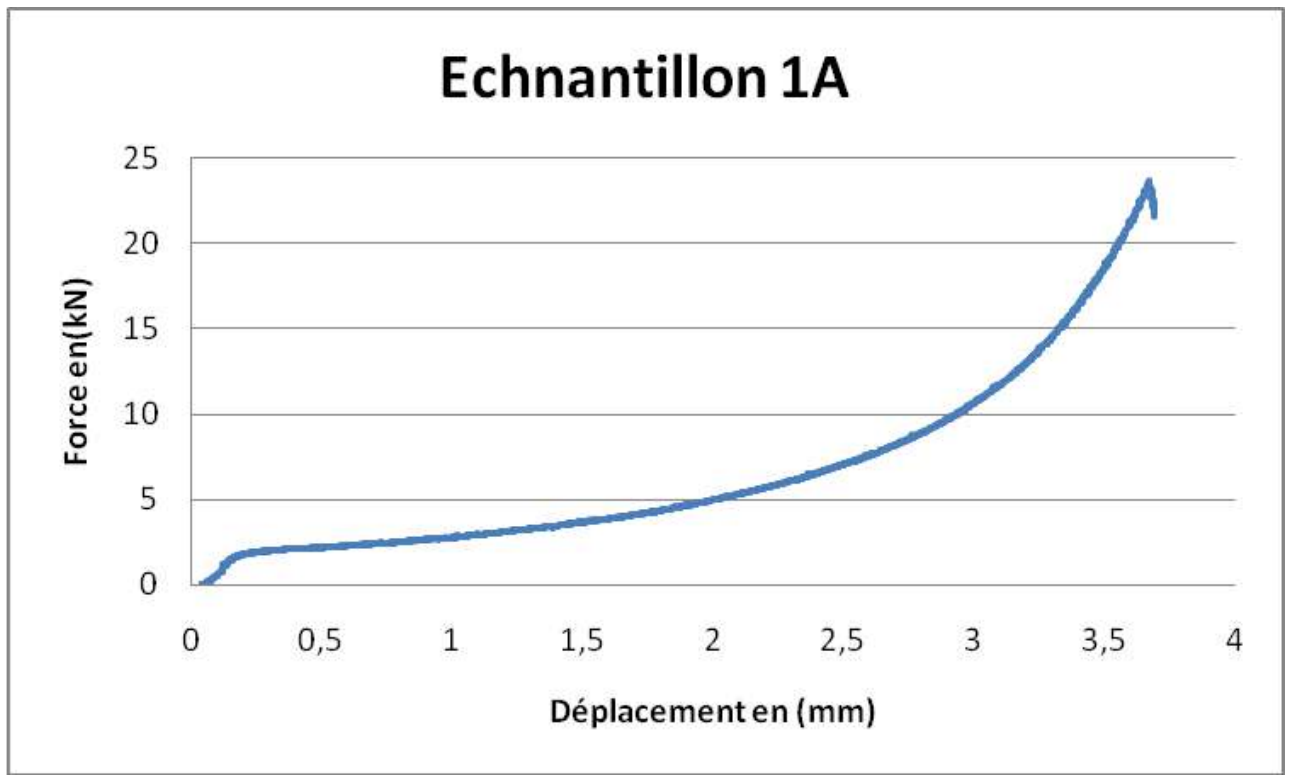
T (8kN ; 4 mm)

Figure 35– Echantillon (3A) programme Excel



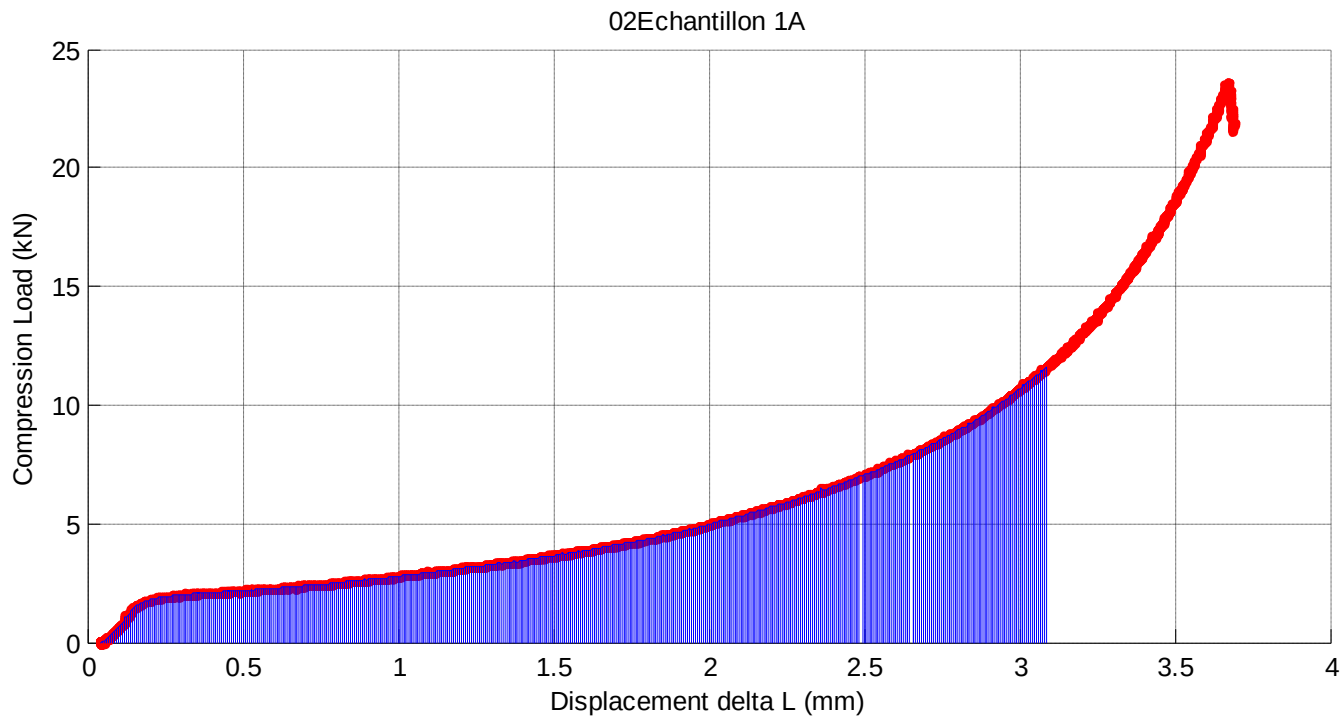
T (8kN ; 4 mm)

Figure 36– Echantillon (3A) programme MATLAB



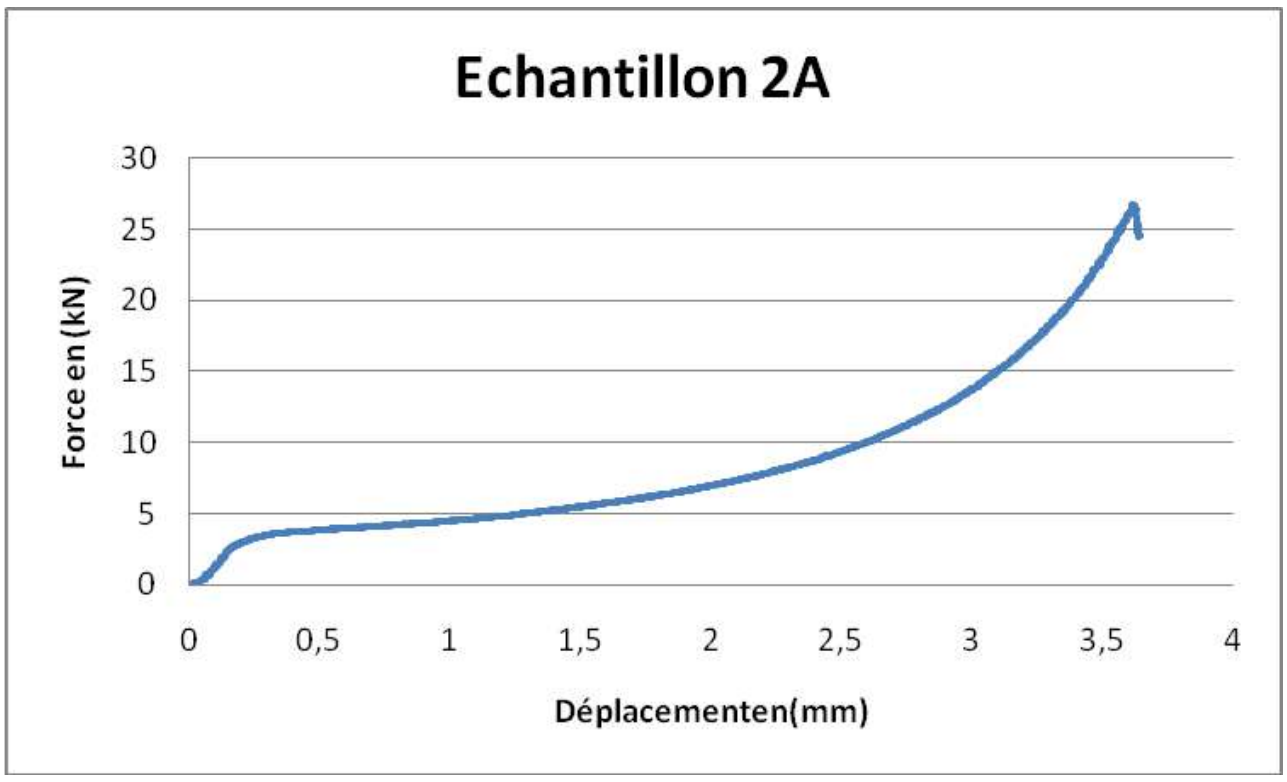
T (11.25 kN ; 3,0.85 mm)

Figure 37– Echantillon (1A) programme Excel



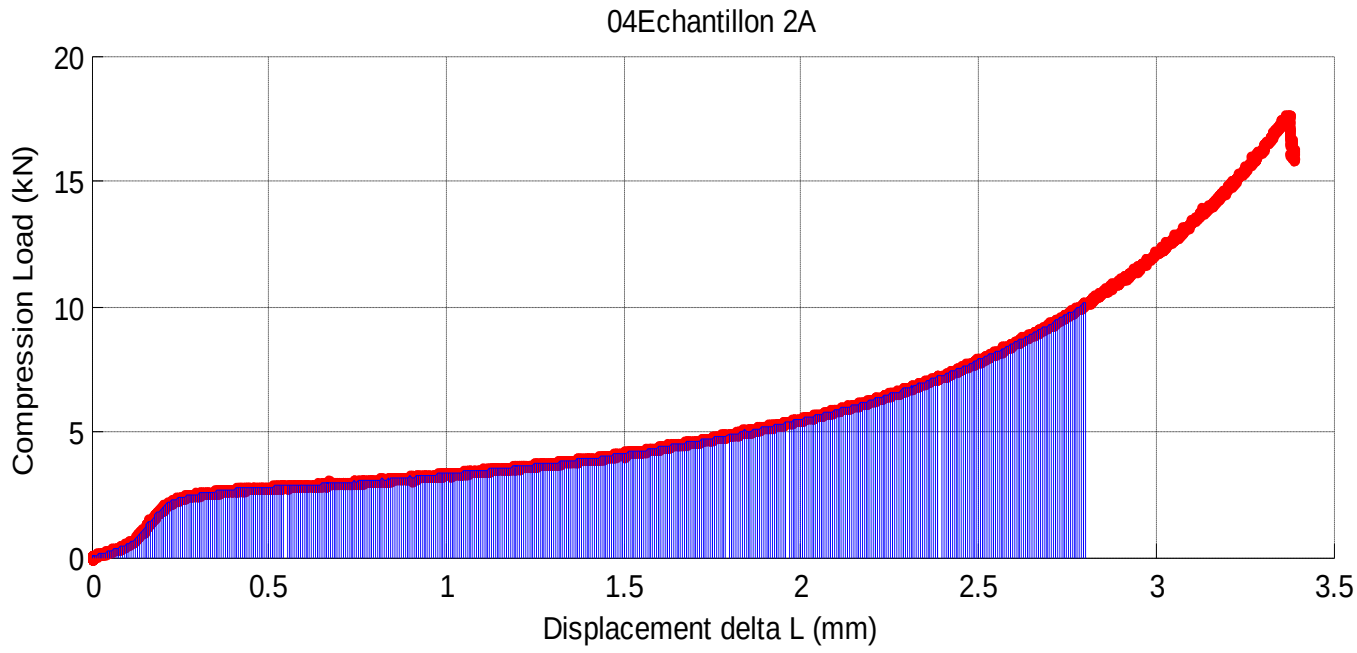
T (11.25 kN ; 3,085 mm)

Figure 38– Echantillon (1A) programme MATLAB



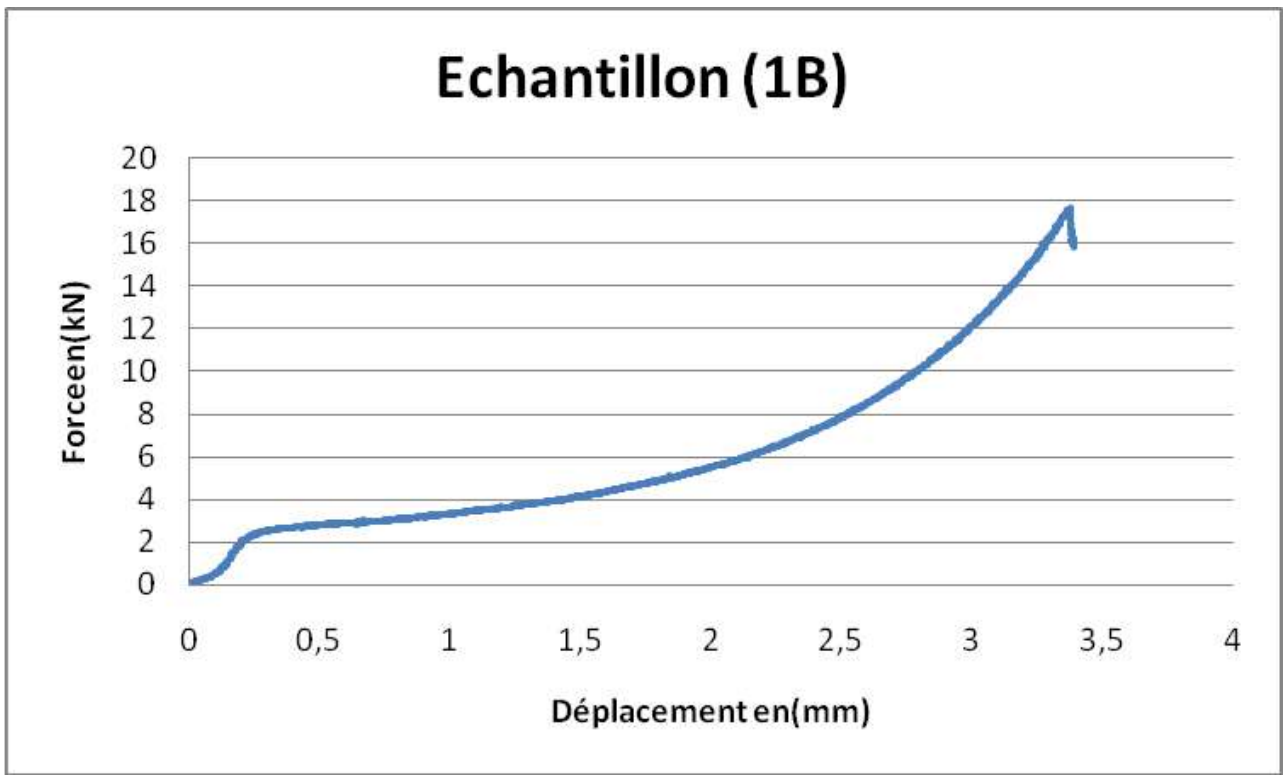
T (11kN ; 2 .8 mm)

Figure 39– Echantillon (2A) programme Excel



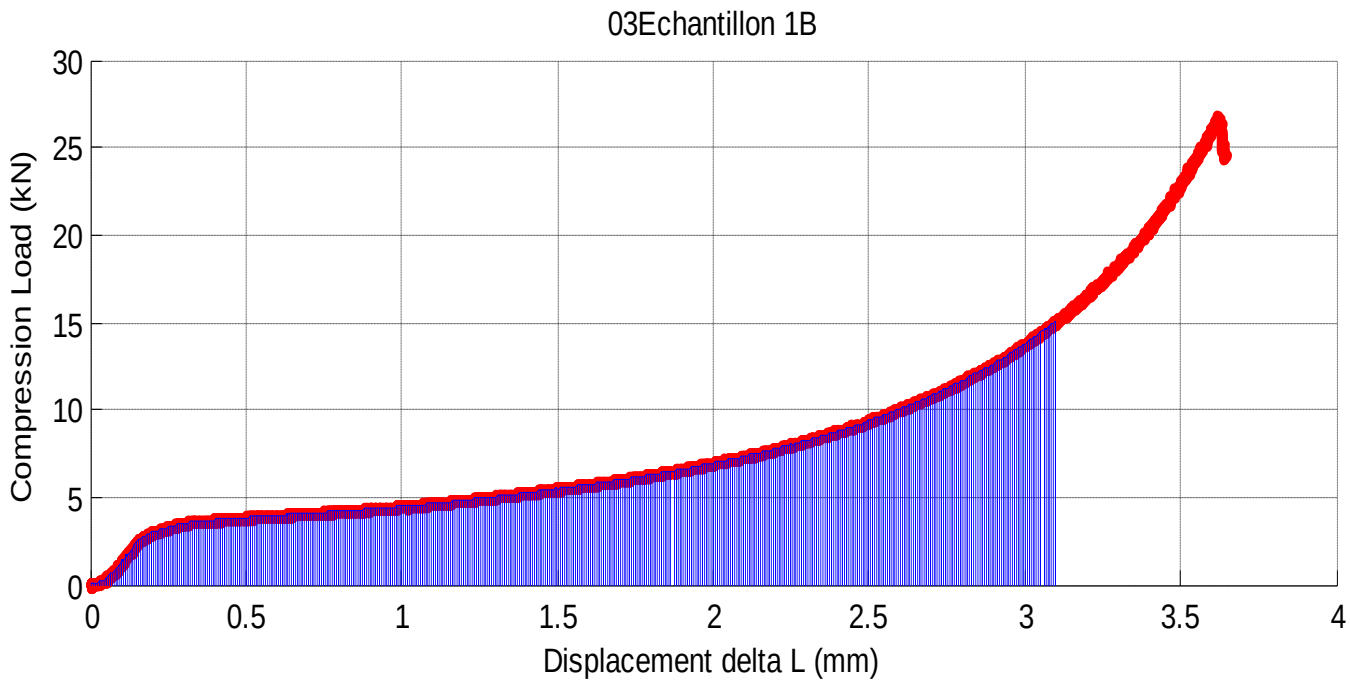
T (11kN ; 2 .8 mm)

Figure 40– Echantillon (2A) programme MATLAB



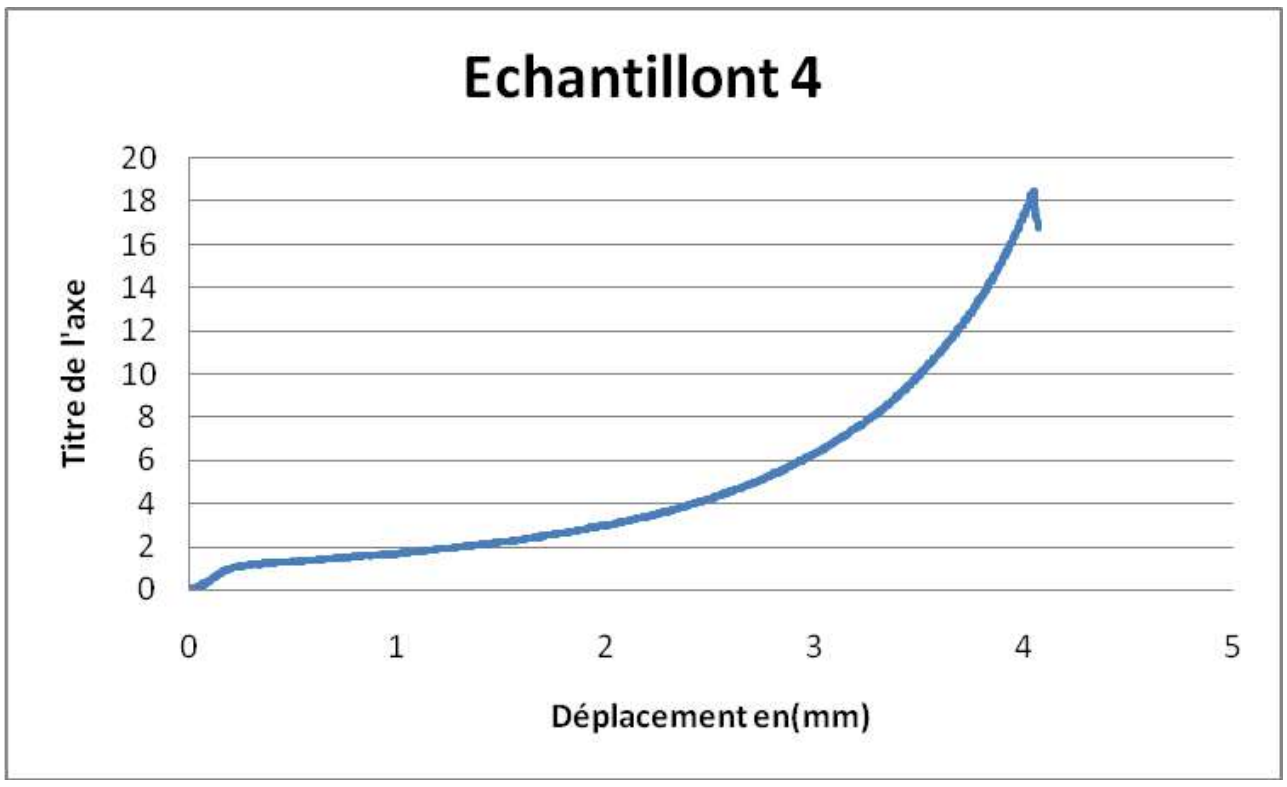
T (15 kN ; 3.1 mm)

Figure 41– Echantillon (1B) programme Excel



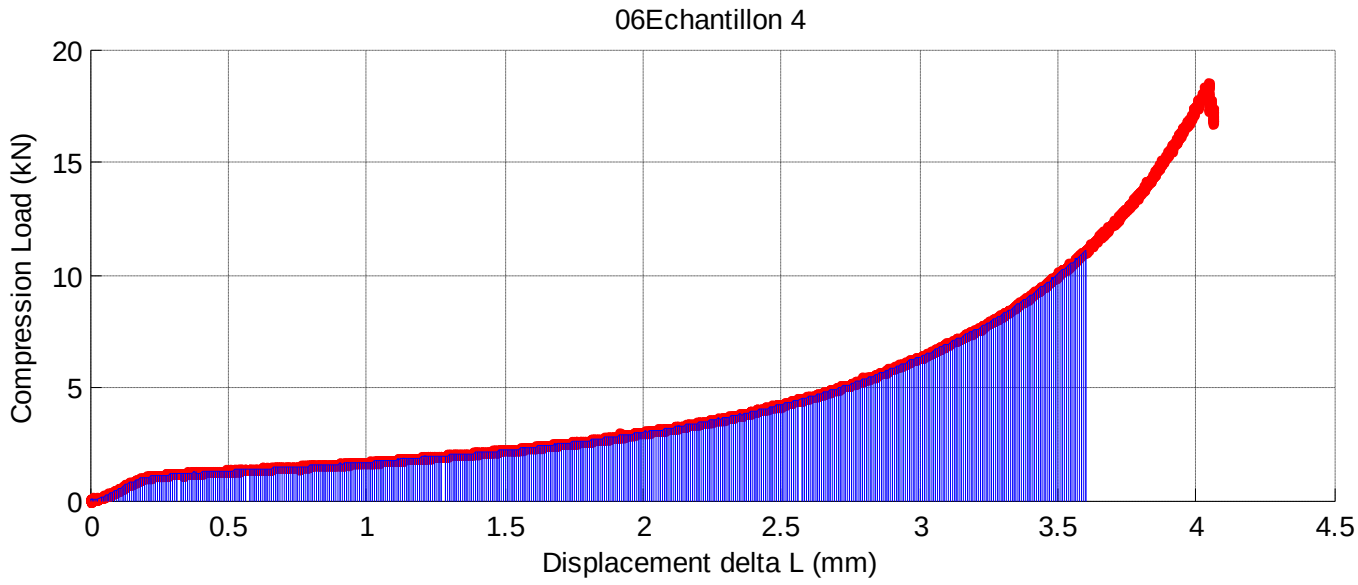
T (15 kN ; 3.1 mm)

Figure 42– Echantillon (1B) programme MATLAB



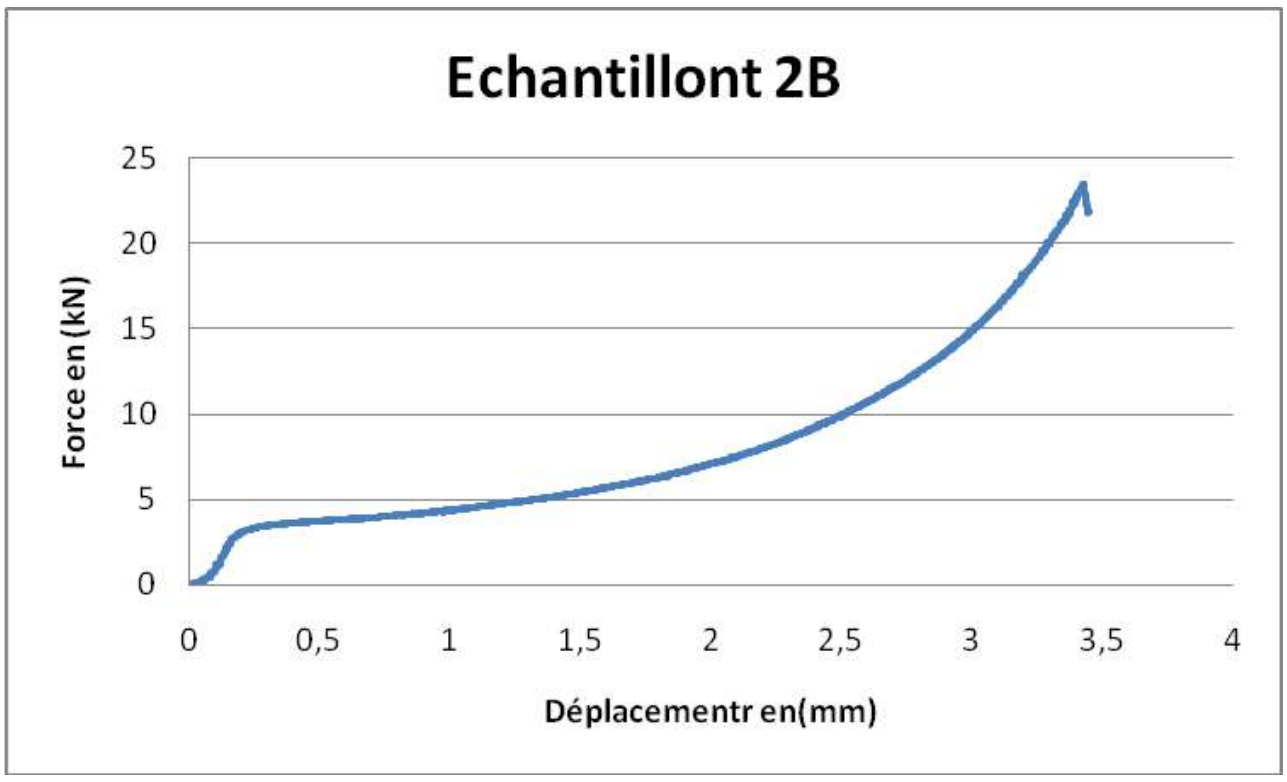
T (11kN ; 3,6 mm)

Figure 43– Echantillon (4) programme Excel



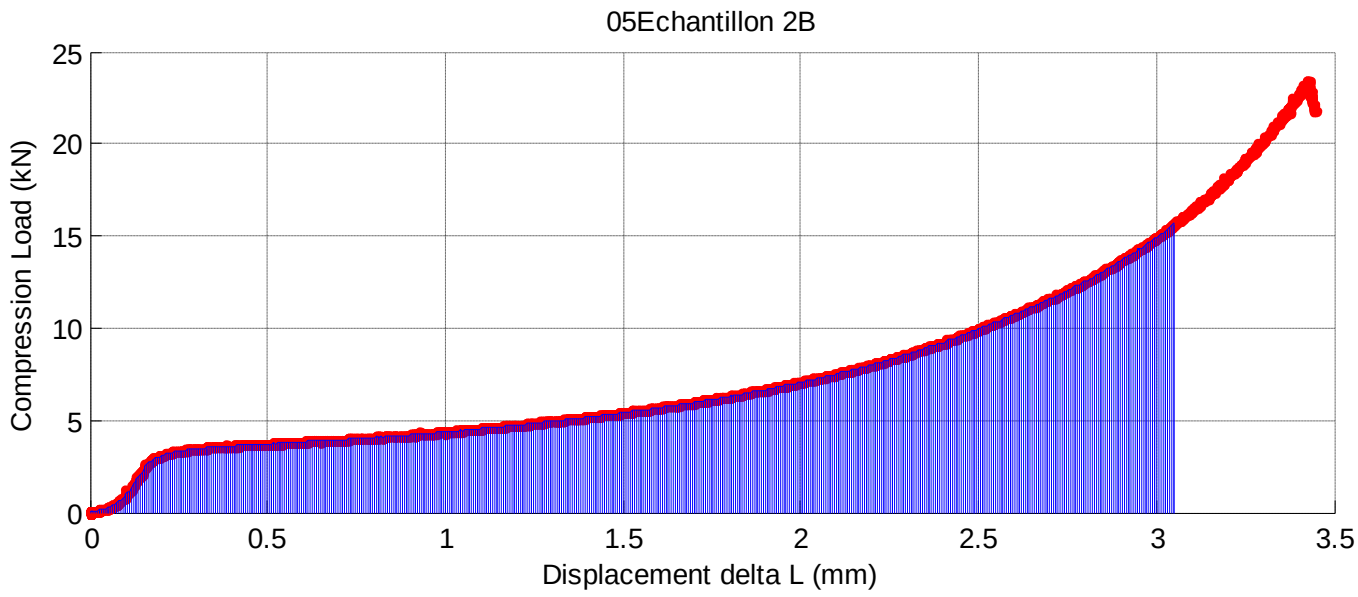
T (11kN ; 3,6 mm)

Figure 44– Echantillon (4) programme MATLAB



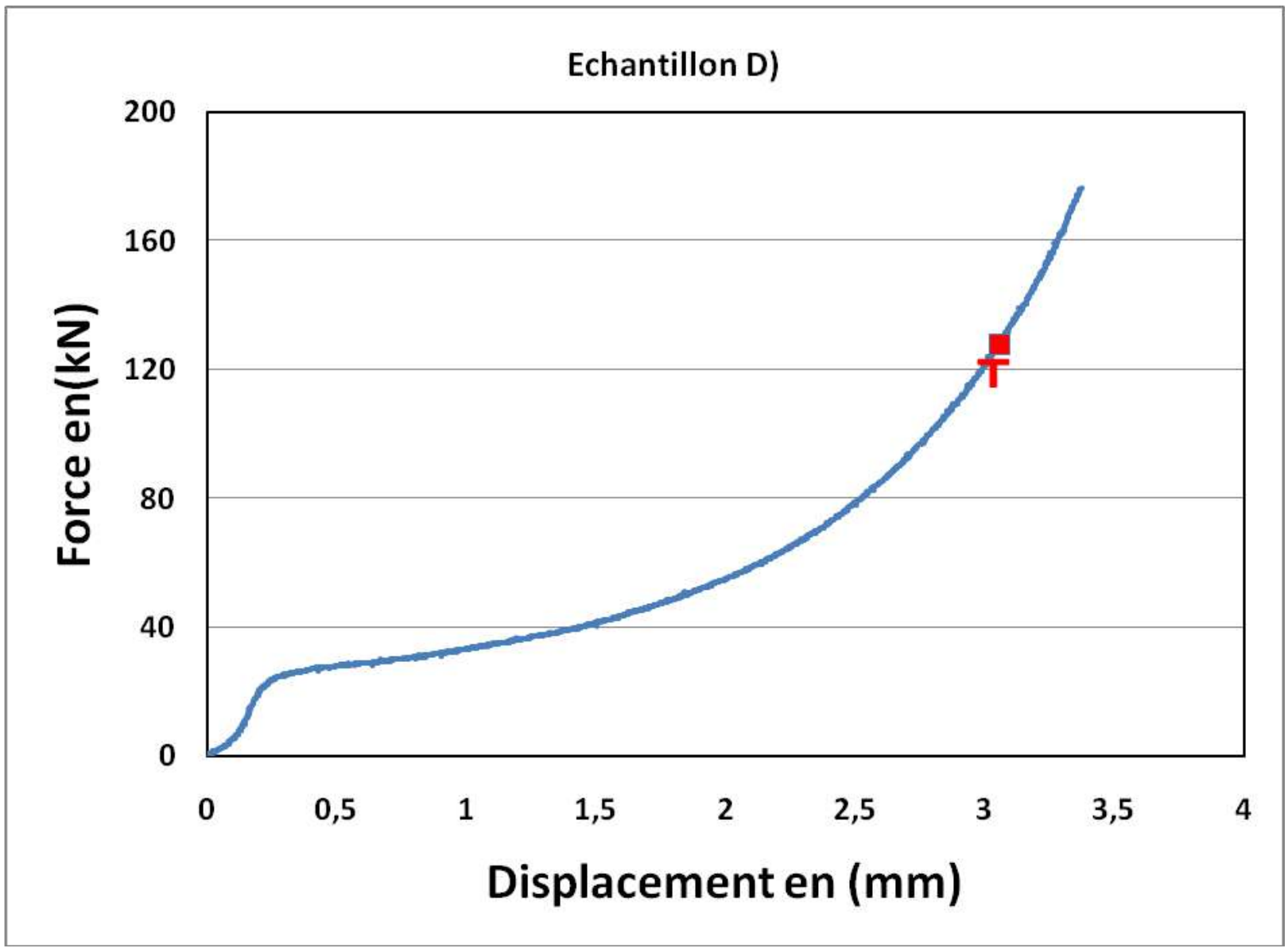
T (15.1kN ; 3,05 mm)

Figure 45– Echantillon (2B) programme Excel



T (15.1kN ; 3,05 mm)

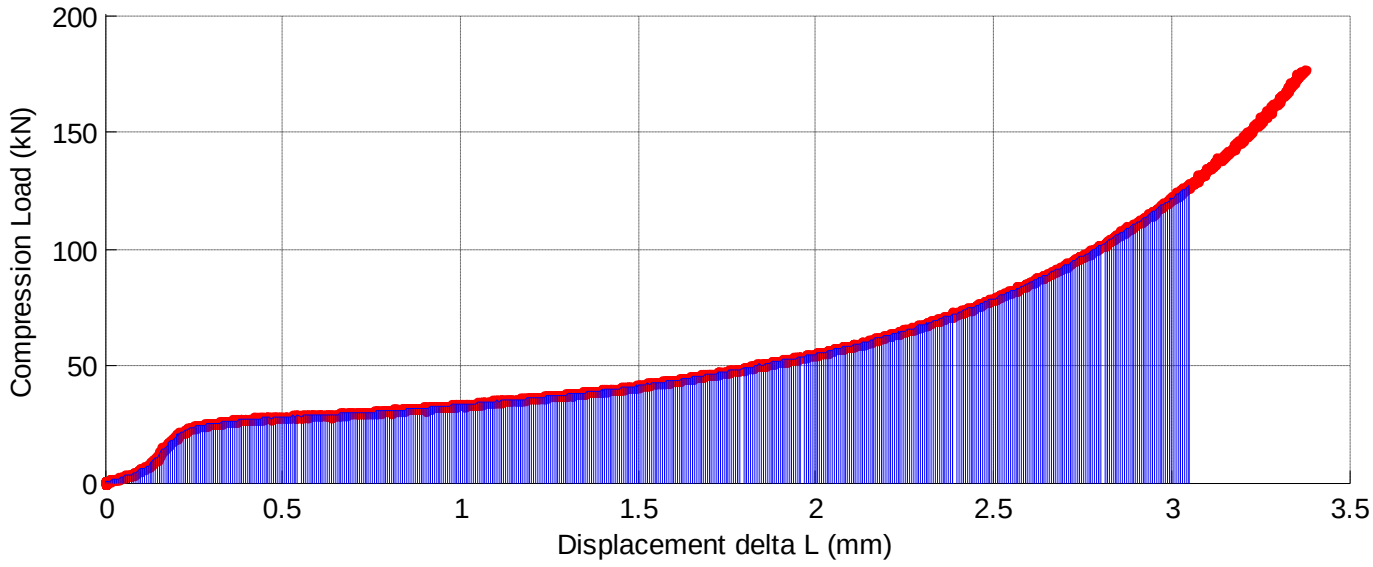
Figure 46– Echantillon (2B) programme MATLAB



T (127,1973kN ; 3,051 mm)

Figure 47– Echantillon (D) programme Excel

07Echantillon-D-détai



T (127,1973kN ; 3,051 mm)

Figure 48– Echantillon (D) programme MATLAB

Tableau 5: Récapitulatif des résultats obtenus lors des mesures des énergie d'absorption

	Echantillon	E_A (kj)	D_r
1	3A	15.71	0.3685
2	1A	13.95	0.3349
3	2A	12. 66	0.3144
5	4	12 .93	0.3291
6	2B	19.88	0.4189

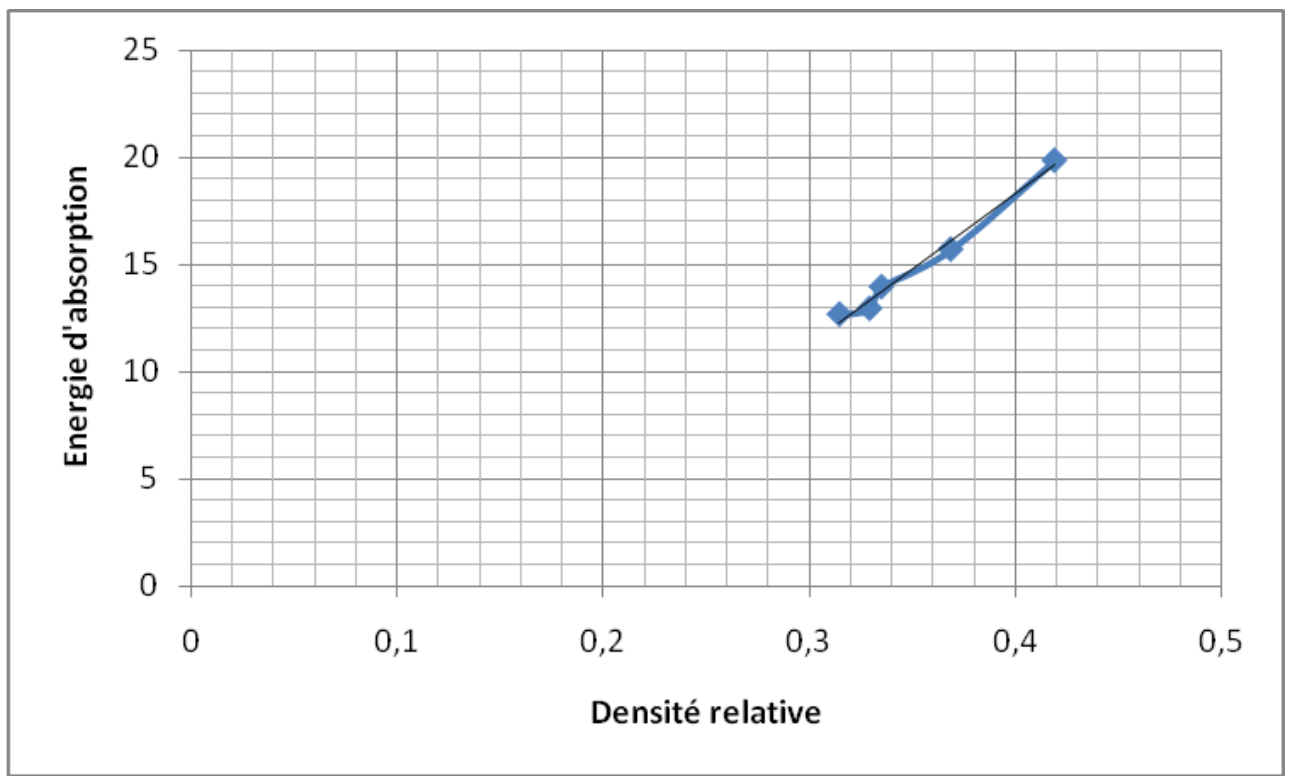
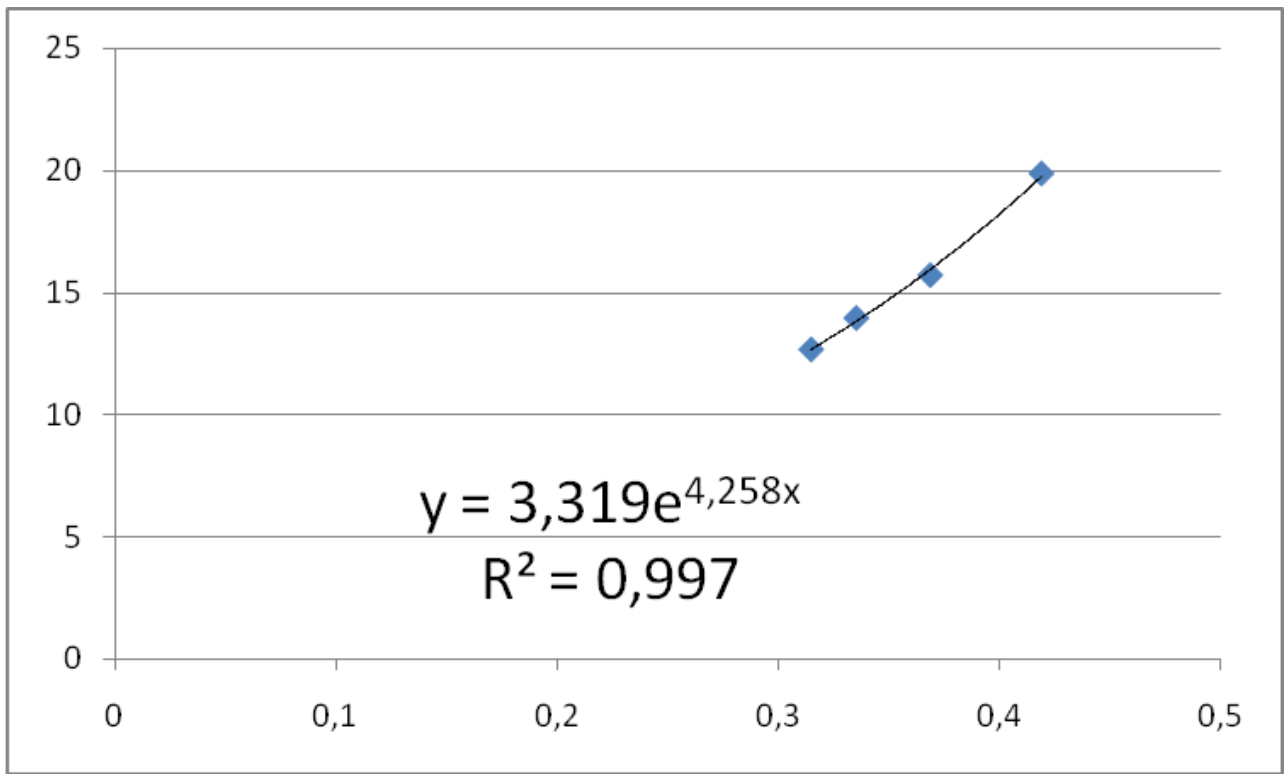


Figure.49 *Courbes Energie d'absorption Densité relative*

La fonction de cette courbe :



Après le graphe :

Y= Energie d'absorption

X=Densité relative

Donc :

$$Ea = 3{,}319\ e^{4{,}258Dr}$$

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 compression uniaxiale afin de déterminer leur limite d'élasticité σ_p *en fonction de la densité relative. Les essais réalisés en compression uniaxiale sur ces matériaux poreux sont reproductibles concernant la contrainte plateau.*

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 compression de manière non négligeable. Plus la densité relative augmente, plus la limite d'élasticité est élevée.

Références Bibliographiques

Références Bibliographique

[1] Olivier CATY . Fatigue des empilements de sphères creuses métalliques. 2008.

[2] L. Gibson and M. Ashby. Cellular solids : structure and propretés. Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, 1999. 10, 11, 102, 155

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

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

[5] Banhart, J. (2001). Manufacture, characterisation and application ofcellular metals and metal foams Progress in Materials Science Vol. 46, No. (6), pp. 559–632, ISSN 0079-6425

[6] FAZEKAS A. Etude de l'influence des dispersions microstructurales sur les propriétés effectives des matériaux cellulaires. Thèse. Grenoble : INPG. 2003

[7] GASSER S. Etude des propriétés acoustiques et mécaniques d'un matériau métallique poreux modèle à base de sphères creuses en nickel. Thèse. Grenoble : INPG. 2003.

[8] MAIRE E. Etude en volume de l'endommagement dans les matériaux hétérogène métalliques en sollicitation monotone. Mémoire d'HDR. Villeurbanne : INSA de Lyon, 2002.

[9] SANDERS W.S. Mechanical behaviour of closed cell and Hollow-Sphere metallic foams. Phd theses. USA: MIT. 2002.

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

[11] Les mousses métalliques :un potentiel d'applicationsà découvrir 2009

[12] HAL Id: tel-00694478 https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00694478 ,Submitted on 4 Mai 2012

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

[14]. Jonathan Dairon. D´eveloppement d'une nouvelle technique d'´elaboration de mousses d'acier par fonderie et caract´erisation m´ecanique. Mat´eriaux. Ecole Centrale de Lille, 2008.

[15]. Miyoshi, T., Itoh, M., A. kiyama, S. & Kitahara, A. (2000). Alporas aluminum foam: production process, properties, and applications. Advanced Engineering Materials,

[16]. Ashby, M.F., Evans, A., Fleck, N.A., Gibson, L.J., Hutchinson, J.W. & Wadley, H.N.G. (2000).Metal foams — a design guide, Butterworth-Heinemann, ISBN 0-7506-7219-6, London, England

[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 Kindgom

[18]. [Papon et Leblond,1990]. Papon P, Leblond J. ,Thermodynamique des états de la matière, Hermann ,paris , 1990

[19]. [Weaire et Rivier, 1984].Weare D.et Rivier N. ,Contemp.phys.,25,pp.59,1984.

[20]. [Plateau ,1873]. Plateau J.A.F. ,Statique expérimentale et théorique des liquides soumis aux seules forces moléculaires ,Ghent ,1873

[21]. [Thomson ,1887].Thomsent W Lord Kelvin , On the division of space with minimum partional area. Phil. Mag.,24,pp,503,1887

[22]. Myriam Laroussi , Modélisation du Comportement Des Mousses Solides A porosité ouverte :Une Approche Micromécanique ., le 12 juillet 2002.

[23]. MAIRE E., BUFFIERE J.Y., SALVO L., BLANDIN J-J., WOLFGANG L., LETANG J-M. On the application of X-Ray Microtomography in the Field of Materials Science. Advanced Engineering Materials, vol 3, n°8. 2001. 539-546

[24]. CHRISTENSEN R.M., LO K.H. Solution for effective shear properties in three phase sphere and cylinder models. Journal of the Mechanics and Physics of Solids. 27. 1979. 315-330.

[25]. CHRISTENSEN R.M. Mechanics of cellular and other low-density materials. Int. Journal of Solids and Structures. 2000. 93-104

[26]. ZIXING L. Détermination of effective moduli for foam plastics basedon three phase spheroïdal model. Acta Mechanica Solida Sinica. 1995

[27]. FAZEKAS A. Etude de l’influence des dispersions microstructurales sur les propriétés effectives des matériaux cellulaires. Thèse. Grenoble : INPG. 2003.

[28]. MAIRE E. Etude en volume de l’endommagement dans les matériaux hétérogène métalliques en sollicitation monotone. Mémoire d’HDR. Villeurbanne : INSA de Lyon, 2002.

[29]. MADI K. Influence de la morphologie tridimensionnelle des phases sur la composition mécanique de réfractaires électrofondus. Thèse. Evry : Mines de Paris. 2006.

[30]. 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. 301-306.

[31]. ELLIOTT J.A., WINDLE A.H, HOBDELL J.R., EECKHAUT G., OLDMAN R.J., LUDWIG W., BOLLER E., CLOETENS P., BARUCHEL J. In-Situ deformation of open-cell flexible foams using 3D computed microtomography. Journal of Materials Science 37. 2002. 1547-1555.

[32]. GARBOCZI E.J., DAY A.R. An algorithm for computing the effective linear elastic properties of heterogeneous materials: Three-dimensional results for composites with equal phase Poisson ratios. Journal of the Mechanics and Physics of Solids 43. 1995. 1349-1369

[33]. ROBERTS A.P., GARBOCZI E.J. Elastic moduli of model random threedimensional closed-cell cellular solids. Acta Materialia 49. 2001.189-197

[34]. ROBERTS A.P., GARBOCZI E.J. Elastic properties of model random threedimensional open-cell cellular solids. Journal of the mechanics and Physics of Solids 50. 2002. 33-55

[35]. BOHN R.B., GARBOCZI E.J. User Manual for Finite Element Difference Programs: A Parallel Version of NISTIR 6269. National Institute of Standards and Technology Internal Report 6997, 2003.

[36]. YOUSSEF S., MAIRE E., GAERTNER R. Finite element modelling of the actual structure of cellular materials determined by X-Ray tomography. Acta Materialia 53. 2005. 719-730.

[37]. MADI K. Influence de la morphologie tridimensionnelle des phases sur la composition mécanique de réfractaires électrofondus. Thèse. Evry : Mines de Paris. 2006.

[38]. MADI K., FOREST S., BOUSSUGE M., GAILLIERE S., LATASTE E., BUFFIERE J-Y, BERNARD D., JEULIN D. Finite element simulation of the deformation of fused-cast refractories based on X-Ray computed tomography. Computational Materials Science 39. 2007. 224-229.

[39]. YOUSSEF S. Etude par tomographie X et modélisation par éléments finis du comportement mécanique des mousses solides. Thèse. Villeurbanne : INSA Lyon, 2004.

[40]. 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 -

[41] Development of Metal Foam Based Aftertreatment on a Diesel Passenger Car – Virtual Conference Center [archive]. Vcc-sae.org. Retrieved on 2011-11-19.

[42] https://fr.wikipedia.org/wiki/Mousse_métallique 03/04/2017

[43] 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.