

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique



## Mémoire de Magister

Présentée à l'Université 8 Mai 1945 – Guelma  
Faculté des Sciences et de la technologie

Département de : **Génie Mécanique**  
Spécialité : **Génie Mécanique**

Par : **BOUCHAHDANE Karima**

---

**Sujet de Mémoire : Elaboration et caractérisation mécanique des  
mousses polyuréthane**

---

### JURY

<b>Président:</b>	Pr. S. GUENFOUD	Université de Guelma
<b>Encadreur:</b>	Pr. A BEZAZI	Université de Guelma
<b>Examineur:</b>	Pr. M. A. YALLESE	Université de Guelma
<b>Examineur:</b>	Dr MC/A. A. BELBAH	Université de Guelma

---

**2012**

---

# **Dédicace**

**A la mémoire de ma mère**

**A mon père**

**A mes frères**

**A mes sœurs**

## **REMERCIEMENTS**

*Je tiens à remercier en premier lieu mon directeur de Thèse, Monsieur le Professeur **Abderrazak BEZAZI**, qui m'a encadré dans ce travail ; pour ses conseils, sa disponibilité et son suivie attentif tous le long de la préparation de ce mémoire.*

*Je remercie également Monsieur le Professeur **Salah GENFOUD** enseignant au département de Génie mécanique, université de Guelma qui m'a fait le plaisir et l'honneur de présider le jury de ce mémoire.*

*J'exprime toute ma gratitude aux membres du jury le Dr **Ahmed BELLBAH** Pr **Mouhamed Athmane YALLESSE**, enseignants au département de Génie mécanique, université de Guelma, pour l'intérêt qu'ils ont montré à l'examen du contenu de ce mémoire.*

*Mes vifs remerciements s'adressent également au Dr **Mouhamed Cherif DJAMAA**, chef du département de Génie Mécanique qui ma permis de bénéficier des moyens du département.*

*Enfin, je remercie tout le personnel technique et administratif du département de Génie Mécanique de l'université de Guelma en particulièrement Mr: **M<sup>ed</sup> AIB**, **A/Aziz MADI***

## Résumé

L'élaboration et la caractérisation des mousses polyuréthane (production Algérienne) à cellules ouvertes dédiée pour cette étude consistent à une étude du comportement mécanique en traction, compression statique et fatigue cyclique. Dans ce travail une technique est présentée pour la réalisation de la transformation des deux types de mousses ayant différentes densités de couleur rose et grise d'un état conventionnel ou originale ayant un coefficient de Poisson positif à un état transformé ou auxétique ayant un coefficient de Poisson négatif via un dispositif fabriqué spécialement.

L'étude basée sur trois série des échantillons, la première est préparé a partir des blocs de 180cm×60cm×5cm, une partie de cette série est transformés avec deux taux de compression. Pour la deuxième et la troisième série les échantillons sont découpé dans le sens vertical est horizontal à partir de blocs de mousse ayant les dimensions 190cm×140cm×15cm. Des comparaisons en compression statique sont faites pour des mousses transformés en auxétiques de ces deux dernières séries.

Les résultats obtenus ont montré le degré d'influence du taux de compression sur le comportement mécanique en compression et traction statique, et la fatigue cyclique des mousses. La détermination de plusieurs paramètres tel que : le coefficient de Poisson ( $\nu$ ), module de Young (E), l'énergie dissipée ( $E_d$ ), la perte de charge  $F/F_0$  est faite expérimentalement. En d'autres termes, ce travail a mis en évidence que la transformation des mousses permet l'amélioration des propriétés mécaniques en traction et en compression.

### *Mots clés*

Mousses, Polyuréthane, auxetic, compression, traction, fatigue, coefficient de Poisson, comportement mécanique, mousses polyuréthane.

## Abstract

The development and characterization of polyurethane foams (production Algerian) open cell dedicated for this study are to study the mechanical behavior in tension, compression static and cyclic fatigue. In this work a technique is presented for the realization of the transformation of two types of pink and gray foams with different densities of a conventional or original state with a positive Poisson's ratio in auxetic or a transformed state having a Poisson's ratio negative using a specially fabricated device.

The study based on three series of samples, the first is prepared from the blocks of  $180\text{cm} \times 60\text{cm} \times 5\text{cm}$ , a part of this series is transformed with two compression ratios. For the second and third series the samples are cut in the vertical and horizontal direction from a foam blocks with dimensions  $190\text{cm} \times 140\text{cm} \times 15\text{cm}$ . Comparisons are made for static compression transformed into auxetic foams of these last two rounds

The results have shown the degree of influence of compression ratio on the mechanical behavior in compression and tensile static and cyclic fatigue of foams. The determination of several parameters such as: the Poisson's ratio ( $\nu$ ), Young's modulus ( $E$ ), the dissipated energy ( $E_d$ ), the pressure drop  $f/f_0$  is performed experimentally. In other words, this work showed that the transformation of foam allows the improvement of mechanical properties in tension and compression.

### ***Keywords***

Foams, Polyurethane, auxetic, compression, tensile, fatigue, Poisson's ratio, mechanical behavior, polyurethane foams.

## ملخص

تطوير وإعداد رغاوي البوليبوريثان ( إنتاج جزائري) ذات الخلايا المفتوحة المخصصة لهذه الدراسة, من اجل دراسة السلوك الميكانيكي في التوتر، والتعب تحت ضغط ثابت ودوري. في هذا العمل يتم تقديم تقنية لتحقيق تحويل نوعين من الرغاوي ذات اللونين الوردي والرمادي مع كثافات مختلفة من حالة أصلية حيث نسبة بواسون موجبة في منمي الحجم إلى حالة تحول ذات نسبة بواسون سلبية عن طريق جهاز مصنوع خصيصا.

هذه الدراسة تقوم على ثلاث مجموعات من العينات، إعداد أول مجموعة من الكتلة ذات الأبعاد  $180 \text{ cm} \times 5 \text{ cm} \times 60 \text{ cm}$ ، يتم تحويل جزء من هذه السلسلة بنوعين من الضغط. السلسلة الثانية والثالثة يتم قطع العينات في الاتجاه العمودي والافقي من الكتل ذات الأبعاد  $190 \text{ cm} \times 140 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$  و. يتم إجراء مقارنات لضغط تحول الرغاوي منمي الحجم من هذه المجموعتين الأخيرتين.

وقد أظهرت النتائج درجة تأثير نسبة الضغط على السلوك الميكانيكي في ضغط التعب والشد ثابت ودوري من الرغاوي. لرصد تحديد تجريبيا معايير عدة مثل نسبة من بواسون ( $\nu$ )، معامل يونغ ( $E$ )، وتبدد الطاقة ( $E_d$ )، وانخفاض الضغط  $f/f_0$  وبعبارة أخرى، أظهر هذا العمل الذي يحول الرغاوي لحسين الخواص الميكانيكية في التوتر والضغط

### كلمات سرية

رغاوي البوليبوريثان، منمي الحجم، الضغط، الشد، الإجهاد، معامل بواسون، السلوك الميكانيكي

# Table de matières

Dédicace	
Remerciements	
Résumé	
Introduction générale	

## Chapitre I Etat de l'art sur le comportement mécanique des mousses

I.1 Introduction.....	13
I.2 Polyuréthane.....	13
I.3 Formation des polyuréthanes.....	14
I.4 Principaux composés de base.....	14
I.4.1 Les isocyanates.....	14
I.4.2 Les polypoles.....	14
I.5 Principes chimiques des polyuréthanes.....	15
I.5.1 Polymérisation en chaîne polycondensation.....	15
I.5.2 Polycondensation.....	15
I.5.3 Polyaddition.....	15
I.6 Différents types de polyuréthane.....	15
I.7 Application des polyuréthanes.....	16
I.8 Mousse polyuréthane.....	17
I.8.1 Préparation des mousses polyuréthane.....	17
I.8.2 Utilisation des mousses.....	17
I.9 Isolation par mousse polyuréthane.....	19
I.9.1 Isolation murale.....	19
I.9.2 Isolation sol.....	20
I.9.3 Isolation toiture.....	20
I.10 Généralisées sur les matériaux cellulaires.....	21
I.10.1 Mousses métalliques.....	21
I.11 La mécanique des mousses.....	22
I.11.1 Mécanisme de déformation dans les mousses.....	22
I.12 Propriétés mécaniques des mousses.....	24
I.12.1 Compression.....	24
I.12.1.1 Elasticité linéaire.....	25
I.12.1.2 Elasticité non-linéaire.....	26
I.13 La fatigue.....	27
I.14 Matériaux auxétiques.....	27
I.15 Mousses auxétiques.....	28
I.16 Différents structures des cellules.....	29
I.17 Coefficient de Poisson.....	29
I.18 La mesure de coefficient de Poisson pour les mousses polyuréthanes.....	31
I.19 Etat de l'art.....	33

I.19.1 Matériaux élaborés à partir de fibres enchevêtrées pour une application cœur de structure sandwich.....	33
I.19.2 Influence du traitement thermique sur les mousses .....	34
I.19.3 Transfert de chaleur des matériaux cellulaires.....	35
I.19.4 Modélisation du comportement contrainte-déformation de la mousse structurale en compression cyclique de la mousse polyuréthane.....	36
I.19.5 Fatigue des composites à âme mousse.....	38
I.19.6 Traction des mousses PVDF (Polyvinylidene Fluoride).....	40
I.20 Position du problème et techniques adoptées.....	41

## **Chapitre II Techniques expérimentales**

II.1 Introduction.....	44
II.2 Matériau de recherche.....	44
II.3 Technique de préparation des mousses polyuréthane.....	45
II.4 Préparation des éprouvettes.....	46
II.4.1 Scie a ruban.....	46
II.4.2 Les coupoirs .....	47
II.4.3 Machine d'usinage.....	48
II.5 Première série des éprouvettes.....	49
II.6 deuxième série des éprouvettes.....	49
II.7 Usinage des pièces de traction.....	50
II.8 la transformation (en matériau auxétique).....	51
II.8.1 Dispositif de transformation.....	51
II.8.2 Processus de transformation.....	52
II.9 Préparation des échantillons.....	53
II.9.1 La découpe des éprouvettes .....	53
II.10 Techniques expérimentales.....	54
II.10.1 Machine des essais.....	54
II.10.2 Essais statiques.....	56
II.10.3 Essais de fatigue cyclique.....	56
II.10.4 Calcul de la densité des mousses.....	57
II.10.5 Mesure de la porosité.....	58
II.11 Conclusion.....	58

## **Chapitre III Etudes expérimentales de la compression statique**

III.1 Introduction.....	60
III.2 Essais de compression statique .....	60
III.2.1 Essais de compression statique de la mousse polyuréthane conventionnel.....	61
III.2.2 Comportement en compression statique de la mousse polyuréthane transformées.....	62
III.3 Compression de la première série .....	63
III.3.1 Compression statique de la mousse rose .....	63
A) Mousse rose originale .....	63
B) Mousse rose transformée .....	65



III.3.1.2 Compression statique de la mousse grise .....	68
A) Mousse grise originale .....	68
B) Mousse grise transformé.....	69
III.3.1.3 Comparaison entre la compression statique de la mousse rose et la mousse grise.....	71
III.3.2 Compression statique de deuxième série.....	72
III.3.2.1 Compression statique de la mousse rose.....	73
III.3.2.2 Compression statique de la mousse grise.....	74
III.3.2.3 Comparaison entre la compression statique de la mousse rose et la mousse grise.....	76
III.3.3 Compression statique de troisième série.....	77
III.3.3.1 Compression statique de la mousse rose.....	78
III.3.3.2 Compression statique de la mousse grise.....	79
III.3.3.3 Comparaison entre la compression statique de la mousse rose et la mousse grise.....	81
III.3. Comparaison entre les trois séries.....	82
III.4 Détermination du coefficient de Poisson ( $\nu$ ) .....	84
III.5 Essais de traction statique.....	86
III.5.1 Mousses rose.....	87
III.5.2 Mousses grise.....	90
III.5.3 Comparaison entre la traction de la mousse rose et la mousse grise.....	92
III.6 Conclusion.....	93

## **Chapitre IV Etudes expérimentales en fatigue cyclique**

IV.1 Introduction.....	95
IV.2 Essais de fatigue cyclique en compression.....	95
IV.2.1 Perte de charge .....	98
IV.2.2 Boucles d'hystérésis.....	101
IV.2.3 Energie dissipée.....	105
IV.3 Microstructures .....	107
IV.4 Conclusion.....	108
Conclusion générale .....	110
Perspectives.....	112
Références bibliographiques.....	114

# **Introduction générale**

## Introduction

Au cours de ces dernières années, plusieurs chercheurs se sont intéressés à l'exploitation des mousses en tant que matériau cellulaire, car elle possèdent des caractéristiques mécaniques très intéressante notamment l'isolation thermique, phonique, l'absorption des vibrations, résistance au choc ...etc. Pour cela, plusieurs travaux ont été menés sur des matériaux cellulaire type mousses à coefficient de Poisson positif et négatif ; l'étude menée dans ce mémoire de magister présente une application d'une méthode de transformation des mousses conventionnels au mousses auxétique.

Des essais statiques ont été réalisés en compression et en traction sur deux types de mousses polyuréthane ayant différentes densités de couleur rose et grise. Ces mousses ayant subi des transformations pour les rendre auxétique (ayant un coefficient de Poisson négatif).

Le premier chapitre est consacré à une recherche bibliographiques et un état de l'art, il comporte une présentation générale sur le polyuréthane, leurs constituants et composante, les définitions et des concepts des mousses polyuréthanes a cellules ouvertes (objet de cette étude), ainsi que leur différent domaines d'applications.

Le second chapitre, expose la technique de transformation des mousses polyuréthane a cellules ouvertes des deux types de mousse d'un état conventionnel (coefficient de Poisson positif) a un état auxétique (coefficient de Poisson négatif) ainsi q'une présentation du matériel et des machines utilisés ainsi les dispositifs de préparation et de découpe des échantillons.

Le troisième chapitre présente une vaste gamme d'essais de compression et de traction en statique pour les deux types de mousse (rose et grise), a l'état conventionnel ou auxétique obtenue avec différents taux de compression, et enfin une analyse de la microstructure. Il a été trouvé que la transformation des mousses conventionnels en mousse auxétique permet d'avoir une augmentation dans la charge a la rupture aussi bien en traction quant compressions.

L'analyse des résultats des essais de fatigue cyclique en compression est décrite dans le quatrième chapitre. Ces essais en été effectués seulement sur les mousses grise auxétique afin de maître en évidence l'évolution de la perte, des boucles d'hystérésis et de l'énergie dissipé de charge en fonction du nombre de cycles et du niveau de chargement.

## **Chapitre I**

# **Etat de l'art sur le comportement mécanique des mousses**

## **Chapitre I**

# **Etat de l'art sur le comportement mécanique des mousses**

### **I.1 Introduction**

Dans la première partie de ce chapitre, nous allons présenter une recherche bibliographique sur le phénomène de moussage des matériaux. Ce phénomène occupe une grande partie de la littérature et les recherches scientifiques anciennes et récentes à cause de leur intérêt, en plus de la diversité d'application dans plusieurs domaines tels que : l'isolation thermique, l'aéronautique, les sièges de voiture, fauteuil, emballage, absorption acoustique, électroménagers ... etc.

Parmi ces matériaux moussés, on note les mousses métalliques comme les mousses d'aluminium et de nickel aussi bien que les mousses alimentaires comme le pain, nous déterminons les mousses polyuréthane à cellules ouvertes qui concernent notre étude. La composition de base, les techniques de fabrication, et les principaux buts d'application sont aussi décrits.

Dans la deuxième partie, un état de l'art sur le comportement mécanique des différents types de mousses métalliques et à base de polymère.

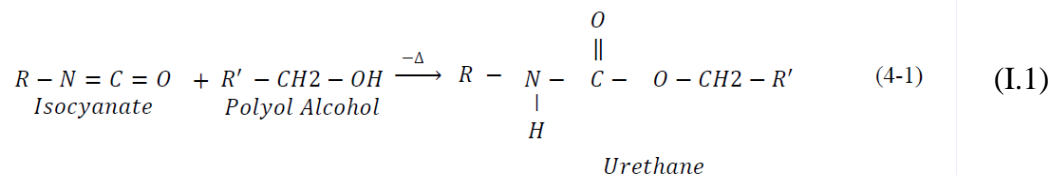
### **I.2 Polyuréthane**

Les polyuréthanes ont été utilisés dans divers domaines et sont un des groupes les plus importants de matières plastiques en raison de leur polyvalence. Le marché a déjà atteint des chiffres de consommation du monde de l'ordre de 8,5 millions de tonnes en l'an 2000

Les technologies de l'uréthane ont été amenées aux États-Unis en 1953 par Jean-Pierre Abbat et Fritz Hartmann. Les polyuréthanes peuvent être fabriqués avec une grande variété de textures et de duretés en variant les monomères utilisés et en ajoutant d'autres substances. Ils sont utilisés pour les colles, peintures, élastomères (caoutchouc), mousses, fibres. Ainsi, ces plastiques aux vastes applications sont utilisés dans un grand nombre d'industries.

### I.3 Formation des polyuréthanes

Les polyuréthanes sont formés à partir des ingrédients multiples et au moins deux réactions simultanées. La réaction se produit lorsque l'uréthane isocyanate et de polyol sont combinés comme indiqué dans l'équation (I 1):



Pour fabriquer une mousse du polyuréthane, le polymère est soufflé par la formation de dioxyde de carbone et/ou par l'utilisation de produits chimiques réactifs auxiliaires qui se vaporise lors de la réaction pour fournir des gaz supplémentaires qui souffle le polymère liquide [PAU-05].

### I.4 Principaux composés de base

#### I.4.1 Les isocyanates

Les isocyanates sont des composés chimiques contenant le groupe fonctionnel  $-N=C=O$ , où ils sont présentés à travers une source importante de divers secteurs industriels : papier, textile, adhésif, isolation (mousse polyuréthane). Selon leur structure, les isocyanates sont classés en séries aliphatiques, alicycliques et aromatiques.

#### I.4.2 Les polyols

Les composés contenant plusieurs fonctions hydroxyle par molécule sont, en plus des isocyanates, les constituants essentiels pour la formation de matériaux polyuréthane. Les polyols de forte masse les plus utilisés appartiennent généralement à deux types principaux: les polyesters et les polyéthers, que l'on trouve plus rarement, et pour des applications spécifiques d'autres polyols : polycarbonates, polybutadiènes, polyols dérivés d'acides gras [FUT-08].

## **I.5 Principes chimiques des polyuréthanes**

### **I.5.1 Polymérisation en chaîne polycondensation**

Il s'agit d'une réaction chimique conduisant selon un mécanisme radicalaire ou ionique à des macromolécules linéaires ou réticulées à partir de composés vinyliques ayant une double liaison (C=C) ou d'hétérocycles comme l'oxyde d'éthylène et le caprolactame. La masse molaire moyenne des macromolécules ainsi obtenues peut atteindre plusieurs millions de grammes par mole. Le greffage de chaînes latérales sur les chaînes déjà formées offre une multitude de possibilités, certaines plus intéressantes que d'autres.

### **I.5.2 Polycondensation**

Il s'agit d'une réaction de polymérisation mettant en œuvre des monomères au moins dysfonctionnels (diacides, diols, diamines ...) pour former des chaînes macromoléculaires, avec le dégagement de molécules de faible masse molaire (le plus souvent de l'eau).

### **I.5.3 Polyaddition**

La polymérisation par addition regroupe l'ensemble des réactions de polymérisation mettant en œuvre des monomères au moins dysfonctionnels conduisant à des macromolécules, sans dégagement de petites molécules, contrairement à la polycondensation, par exemple les polyuréthanes et polyuries par réaction de diisocyanate avec des diols ou des diamines. Les résines époxyde par réaction de pré polymères porteurs de fonctions époxy avec des durcisseurs de type diamine, rentrent aussi dans cette catégorie. Cette réaction fut découverte par Charles Adolphe Wurtz en 1849. Pour les matières plastiques et pour les élastomères, la formation de polyuréthanes à partir de diisocyanate (un isocyanate est un composé chimique contenant le groupe fonctionnel isocyanate, et d'eau avec dégagement de CO<sub>2</sub> a pris une importance toute particulière car les mousses polyuréthanes sont très utilisées au quotidien [WIKPIDIA].

## **I.6 Différents types de polyuréthane**

Les polyuréthanes peuvent être classifiés selon le type et la fonctionnalité des composés de base [PAS-10].

**Tableau I.1** Les différents types de matériaux polyuréthane [PAS-10].

	Macrodiol	Fonctionnalité de l'isocyanate	Fonctionnalité de l'allongeur de chaînes	Matériau obtenu
a	Oui	2	Pas d'allongeur de chaînes	Segment Souple (TPU de faible Tg)
b	Non	2	2	Segment Rigide (TPU de Tg élevée)
c	Oui	2	2	TPU segmenté linéaire
d	Oui	>2	2	PU segmenté réticulé en phase rigide
e		2	>2	
f	Polyol de fonctionnalité > 2	2	2	PU segmenté réticulé en phase souple
g	Non	>2	2	Réseau thermodurcissable (Tg élevée)
h		2	>2	

## I.7 Application des polyuréthanes

**Tableau I.2** Utilisations des polyuréthanes (données américaines de 2004) [TRA-04].

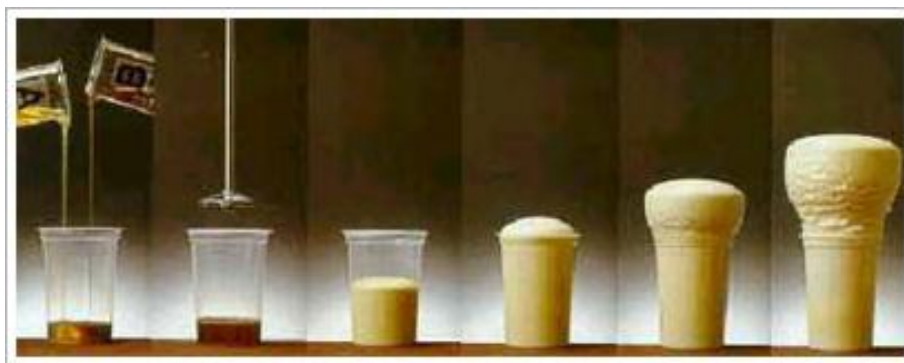
Application	Utilisation (en millions de livres)	Pourcentage du total %
<b>Bâtiment et construction</b>	1459	26,8
<b>Transports</b>	1298	23,8
<b>Meubles et literie</b>	1127	20,7
<b>Electroménager</b>	278	5,1
<b>Emballage</b>	251	4,6
<b>Textiles, fibres et vêtements</b>	181	3,3
<b>Machines &amp; Fonderie</b>	178	3,3
<b>Electronique</b>	75	1,4
<b>Chaussures</b>	39	0,7
<b>D'autres utilisations</b>	558	10,2
<b>Total</b>	5444	100,0



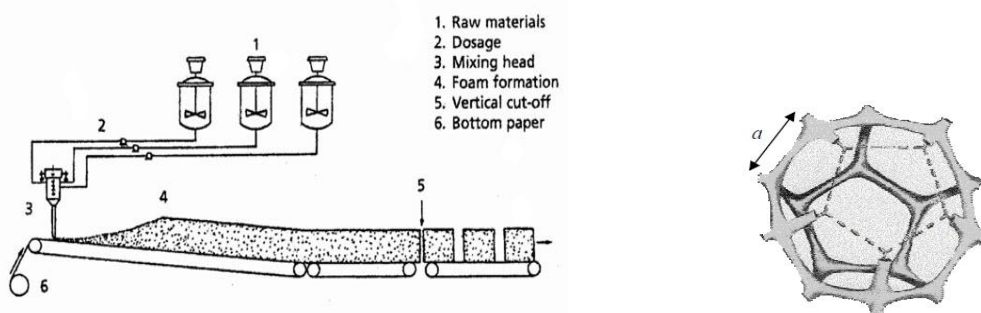
## I.8 Mousse de polyuréthane

### I.8.1 Préparation de mousse polyuréthane

La mousse polyuréthane est une formule liquide obtenue par le dosage approprié de deux composants : polyol et isocyanate. Au moment de l'application, le mélange forme une mousse rigide, constituée de millions de petites cellules comme nous indique la figure I.1 [PIC-10]. La mousse polyuréthane flexible, étant le groupe le plus important, a atteint 29% de la production totale [CAR-06].



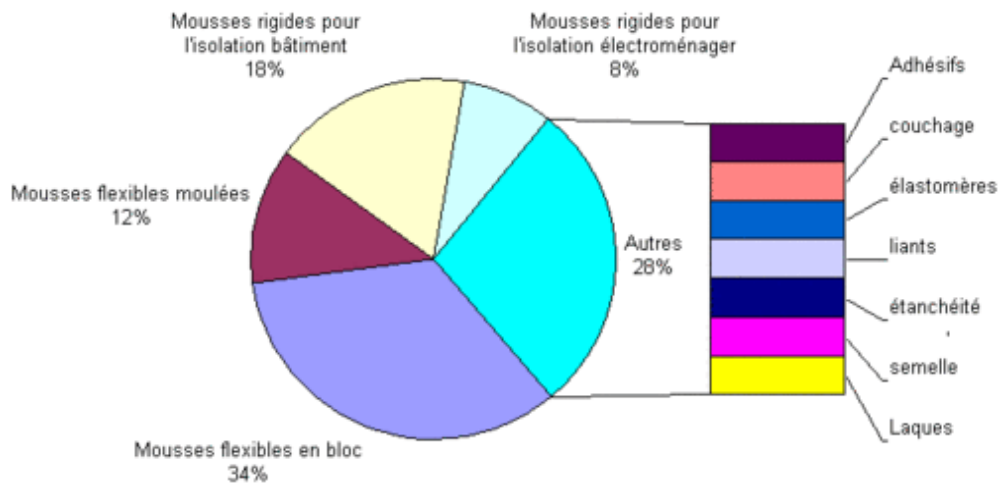
**Figure I.1.** Préparation de la mousse polyuréthane [PIC-10].



**Figure I.2** Fabrication de la mousse de polyuréthane : (a) schéma du moussage (b) géométrie théorique d'une bulle dans une mousse de polyuréthane [DIL-04].

### I.8.2 Utilisations des mousses

D'après une étude de l'Ademe (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie), l'emploi des polyuréthanes se répartit de la façon suivante :



**Figure I.3** Principaux emplois des polyuréthanes [WIKPEDIA].

Les mousses polymères sont largement utilisés dans ces applications à coussins de siège (Figure I.4), flotteurs, tasses à café, et pour les emballages. Les mousses sont utilisées pour une variété de raisons, notamment l'isolation, la perte de poids, la flottabilité, la dissipation d'énergie, et la redistribution des contraintes [BRA-04].



(a)



(b)

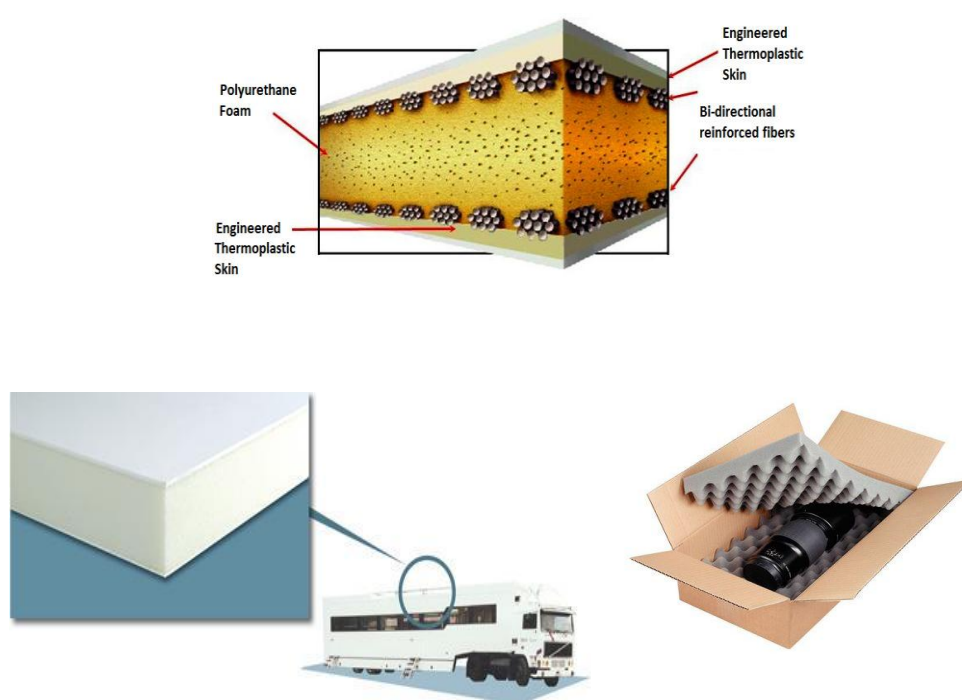
**Figure I.4** Coussin de siège (a), fauteuil (b).

Les mousses sont utilisées dans des applications allant de légers panneaux sandwichs structuraux dans les composants de l'aérospatiale et l'automobile aux structures absorbant l'énergie, filtration de l'air, l'emballage, des vêtements de protection et d'éponges.

Des modèles analytiques et des éléments finis dans lesquels la déformation de la microstructure de mousse est considérée comme due à la flexion, d'étirement et d'articulation

des parois cellulaires (côtes) qui composent la microstructure, et aussi la rotation des jonctions rigides reliant les côtes, ont été trouvés, à prévoir raisonnablement bien les propriétés élastiques de matériaux en mousse à cellules ouvertes [MCD-01].

Les mousses de polyuréthane sont destinées à un large éventail d'applications grâce à leurs propriétés sur mesure à partir des mousses élastiques, viscoélastique ou rigides. Un autre avantage de la transformation de polyuréthane est la capacité de moulage des formes complexes tridimensionnelles avec des propriétés modifiées. Un avantage des mousses thermoplastiques est leur thermo formabilité [PAU-10].



**Figure I.5** Utilité de mousses [PAU-10].

## **I.9 Isolation par mousse polyuréthane**

### **I.9.1 Isolation murale**

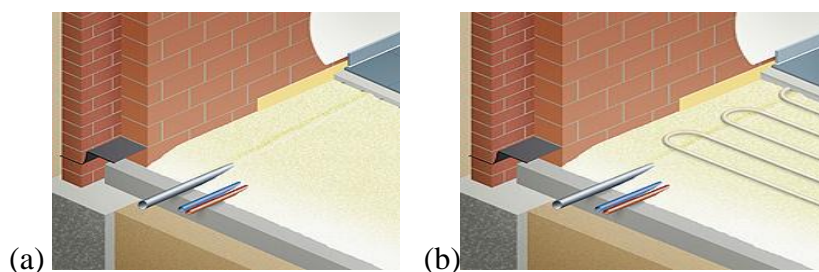
Les murs intérieurs et les parois de séparation peuvent être projetés d'une couche parfaitement égale.



**Figure I.6** Méthodes d'application de mousse pour l'isolation murale.

### I.9.2 Isolation sol

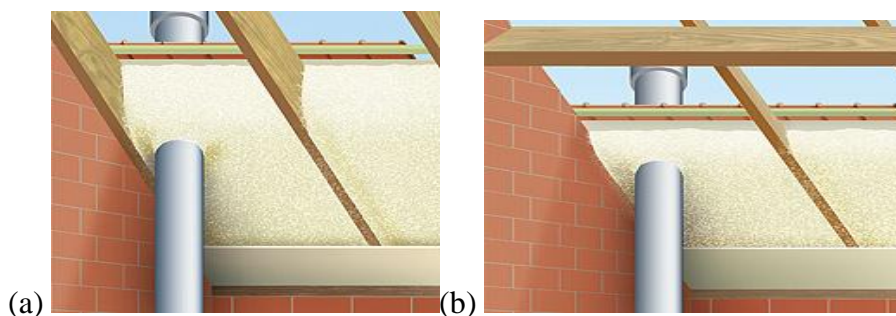
Un isolant sol parfait la mousse PU permet d'isoler rapidement et efficacement les sols ; la couche isolante peut être appliquée aussi bien par le dessus comme par les dessous. En présence de câbles ou de tuyaux au sol.



**Figure I.6** Isolation thermique (a) pour sols (b) pour sols avec plancher chauffant.

### I.9.3 Isolation toiture

La projection de mousse polyuréthane garantit une couche uniforme, de cette manière, elle évite les pertes de chaleur par le toit.



**Figure I.7** Isolation thermique de toitures (a) entre chevrons (b) entre poutres [www.toiture-isolation.com].

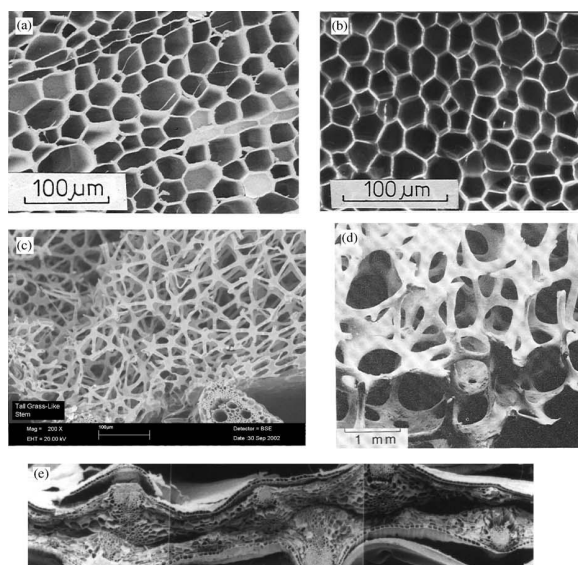
## I.10 Généralités sur les matériaux cellulaires

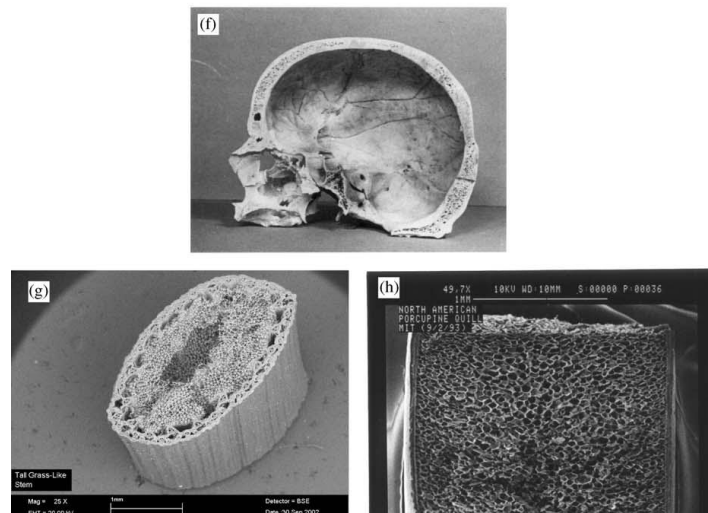
La caractéristique principale des matériaux cellulaires est leur faible densité relative :  $\rho^*/\rho$ , où  $\rho^*$  est la densité du solide cellulaire et  $\rho$  la densité du solide dont il est constitué. Une deuxième caractéristique importante est le nombre de pores par unité de longueur que l'on appelle PPI (Pores Par Inch), comme son abréviation l'indique, il correspond au nombre de pores interceptés par une longueur de 1 Inch (2,54 cm). Par conséquent, il constitue une indication de la taille des cellules.

### I.10.1 Mousses métalliques

Les mousses métalliques appartiennent à la famille des matériaux cellulaires. On entend par solides cellulaires, des matériaux dont la porosité excède 70% du volume. Leur structure résulte d'un assemblage de cellules vides, chacune étant entourée par des arêtes ou des parois solides.

On trouve communément dans la nature de nombreux matériaux de ce type : os, bois, liège (Figure I.8). A l'heure actuelle, le souci d'allègement des structures est permanent et a engendré le développement des matériaux cellulaires synthétiques. Les mousses synthétiques les plus familières sont les mousses de polymères et aujourd'hui la recherche a permis de développer des techniques de fabrication de mousses céramiques et métalliques. Depuis 1950, de nombreuses tentatives avaient été entreprises mais les techniques restaient coûteuses. Différentes approches théoriques ont été utilisées pour décrire le comportement complexe des matériaux cellulaires [WAN-97].





**Figure I.8** Des exemples de solides cellulaires dans la nature: (a) bois de balsa, (b) de liège, (c) noyau interne de la tige de la plante, (d) l'os trabéculaire, (e) feuille d'iris, (f) du crâne, (h) le porc-épic plume [LOR-05].

## I.11 La mécanique des mousses

### I.11.1 Mécanismes de déformation dans les mousses

La figure I.9 illustre schématiquement la compression des courbes contrainte-déformation pour la mousse élastomère et élastoplastique. Elle montre ainsi une élasticité linéaire aux faibles contraintes suivie d'un plateau d'effondrement long, tronquée par un régime de densification dans lequel la contrainte monte d'une manière très rapide. Le comportement en plateau est associé à l'effondrement des cellules par flambement élastique dans les mousses élastomères comme les caoutchoucs. Quand les cellules sont presque complètement effondrées, les parois cellulaires se touchent entre elles et créent alors une pression supplémentaire, comprimant le solide lui-même et conduit à la phase finale qui se caractérise par un accroissement rapide de la contrainte.

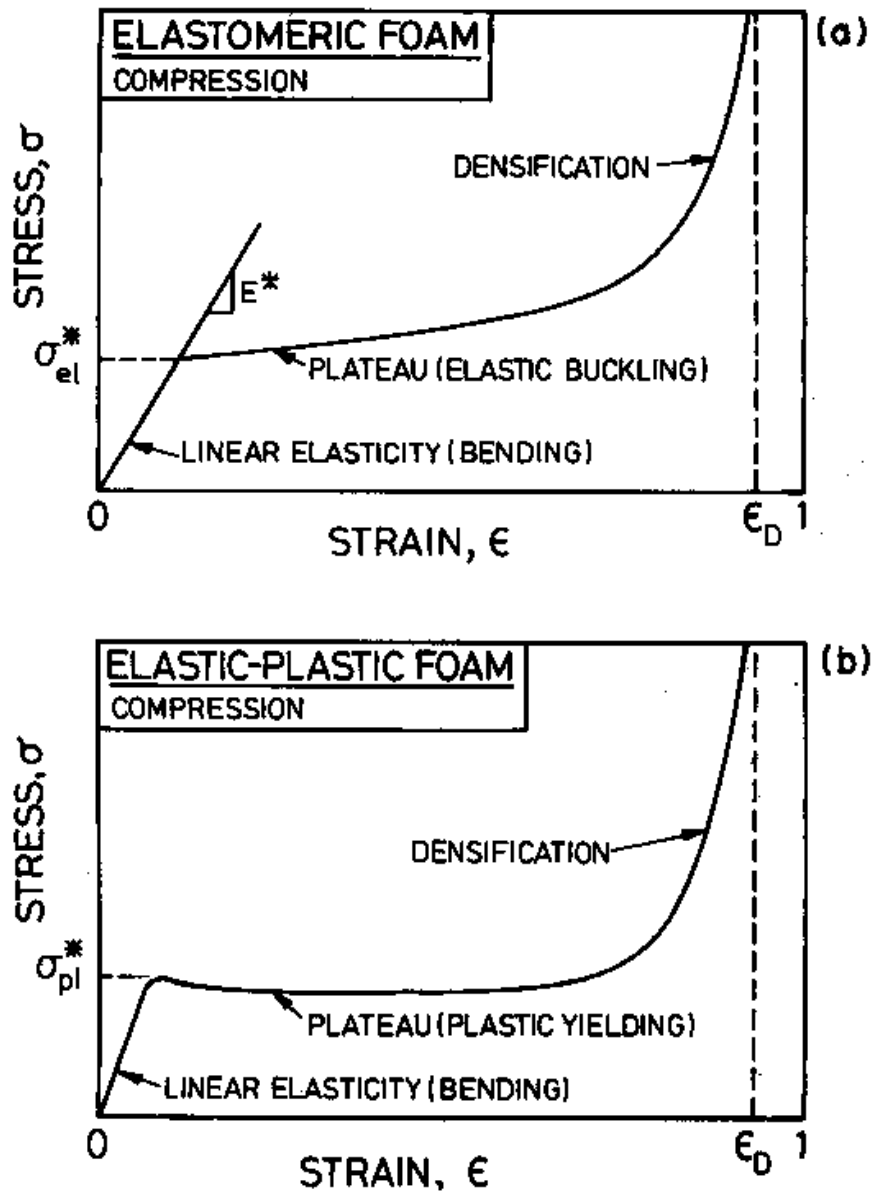
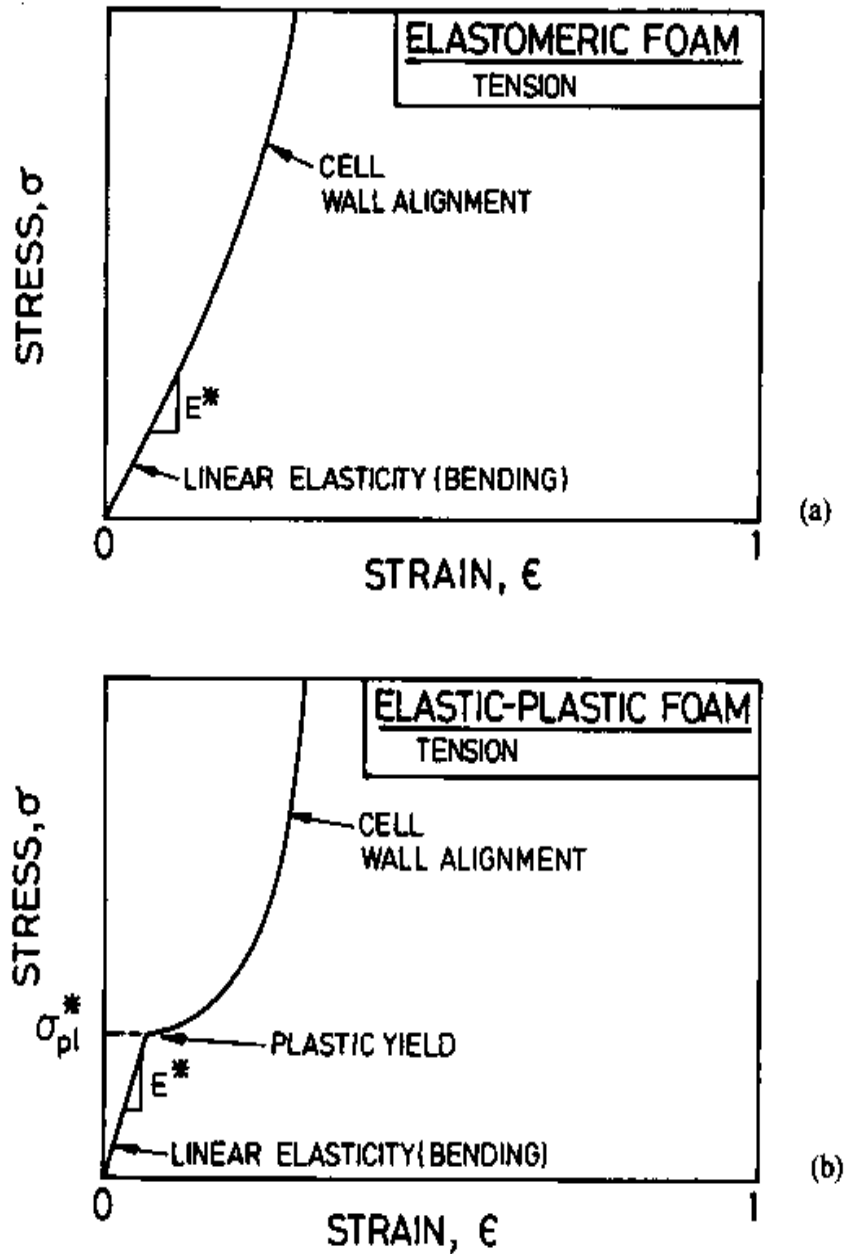


Figure I.9 Courbes contrainte-déformation des mousses sollicités en compression, (a) une mousse élastomère; (b) une mousse élastique-plastique [PAS-04].



**Figure I.10** Courbes contrainte-déformation des mousses sollicité en traction.

(a) mousse élastomère; (b) en mousse élastique-plastique [PAS-04].

## I.12 Propriétés mécaniques des mousses

### I.12.1 Compression

La plupart des applications d'ingénierie induisent une charge de compression sur les mousses.

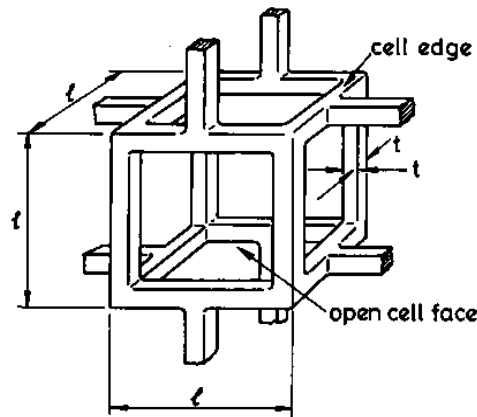


### I.12.1.1 Elasticité linéaire

Le comportement élastique linéaire d'une mousse est caractérisé par un ensemble de paramètres tels que les modules de Young ( $E$ ), de cisaillement ( $G$ ), de compressibilité ( $K$ ) ; et le coefficient de Poisson ( $\nu$ ).

Le mécanisme de l'élasticité linéaire dépend des types de cellules ouvertes ou fermées. A faibles densités relatives ( $\rho/\rho_s < 0,1$ ) les mousses à cellules ouvertes se déforment principalement par la paroi cellulaire en flexion et la contribution de l'extension ou la compression des parois de la cellule devient plus importante.

Au niveau le plus simple, une mousse à cellules ouvertes peut être modélisée comme un ensemble de cubes de longueur  $l$  et de section carrée de côté  $t$ , les cellules adjacentes sont décalées de sorte que leurs membranes se réunissent à leurs milieux (Figure I.11).



**Figure I.11** Un modèle pour un cube de mousse à cellules ouvertes montrant la longueur du bord ( $l$ ) et l'épaisseur du bord ( $t$ ).

Les formes des cellules dans les mousses sont réelles, mais si elles se déforment elles ne parviennent pas par les mêmes mécanismes [PAS-04].

La densité relative de la cellule ( $\rho/\rho_s$ ) et le moment d'inertie d'un membre ( $I$ ) sont liés à  $l$  et  $t$  par :

$$\frac{\rho}{\rho_s} \propto \left(\frac{t}{l}\right)^2 \quad (\text{I.2})$$

$$I \propto t^4 \quad (I.3)$$

Le module de Young de la mousse est calculé à partir de la déviation linéaire-élastique d'une poutre de longueur  $l$  chargée à son milieu par une force  $F$ . La théorie des poutres donne :

$$\delta \propto \frac{F \cdot l^3}{E_s \cdot I} \quad (I.4)$$

La force ( $F$ ) est liée à la contrainte de compression ( $\sigma$ ) à distance par :

$$F \propto \sigma \cdot l^2 \quad (I.5)$$

Et la déformation est liée au déplacement par :

$$\varepsilon \propto \frac{\delta}{l} \quad (I.6)$$

Il s'ensuit que le module d'Young pour la mousse est donnée par :

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = C_1 \cdot \frac{E_s \cdot I}{l^4} \quad (I.7)$$

### I.12.1.2 Élasticité non-linéaire

L'élasticité linéaire est limitée à des petites contraintes, typiquement de 5 % ou moins, les mousses élastomères peuvent être étirées ou comprimés à des contraintes beaucoup plus grande que celle-ci, la déformation est toujours récupérable (et donc élastique). La courbe contrainte-déformation en compression montre un vaste plateau à une déformation ( $\sigma_{el}$ ), ce qui permet de réduire la contrainte élastique ; celle-ci est importante dans la conception des coussins, et les systèmes d'emballage à base de mousse pour amortir les vibrations.

L'effondrement élastique dans les mousses est causé par le flambement élastique des parois cellulaires. Cet effondrement dépend de la mousse à cellules ouvertes ou fermées ; mousses à cellules ouvertes comme les mousses polyuréthanes, la compression du gaz dans

les cellules est un effondrement en charge presque constante, donne un long plateau dans les mousses à cellules fermées, comme le polyéthylène [CAD-05].

### **I.13 La fatigue**

Le phénomène de fatigue correspond à un affaiblissement progressif des propriétés d'un matériau sous des sollicitations cycliques ou répétées, d'intensités fixées ou aléatoires, aussi appelée adoucissement. Ces sollicitations, souvent inférieures à la limite d'élasticité du matériau, peuvent provoquer une rupture du matériau lorsqu'elles sont imposées pendant un certain temps en dynamique, par cumul du dommage.

Les essais peuvent être effectués sous contrainte ou déformation imposée. Dans les deux cas, outre la fréquence, un certain nombre de variables contribuent à définir plus précisément l'essai de fatigue:

Il n'existe pas de critère universel simple pour caractériser la tenue à la fatigue d'un matériau. Le critère dépend de la sollicitation (fréquence, contrainte...), de l'environnement (température...), du comportement et de la structure du matériau et surtout de l'application envisagée.

On peut choisir de déterminer la limite d'endurance est définie par la contrainte en dessous de laquelle le matériau supportera indéfiniment (ou une quantité supérieure à  $10^6$  cycles) cette sollicitation sans rompre. Il faut noter que certains polymères ne mettent pas en évidence de limite d'endurance [PIC-10].

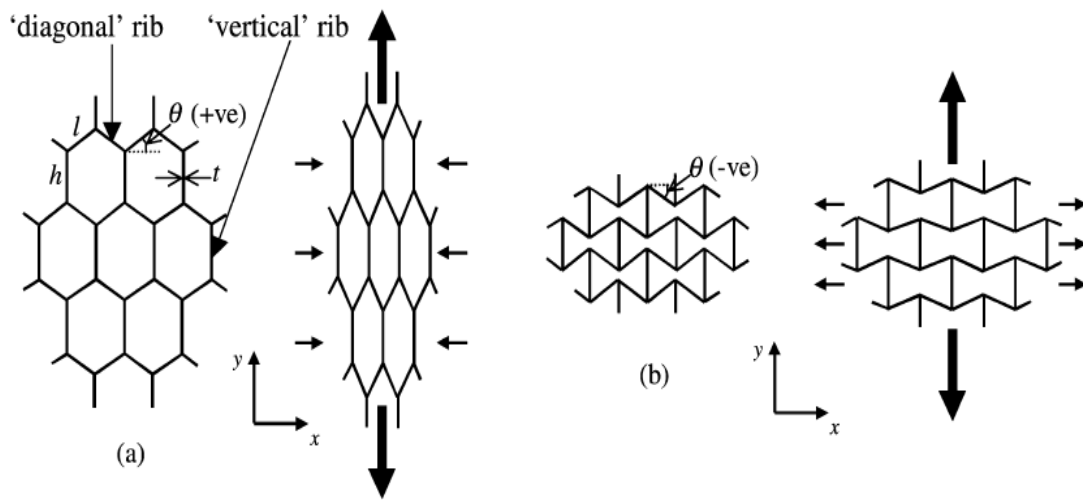
### **I.14 Matériaux auxétiques**

Un matériau auxétique est un matériau à coefficient de Poisson négatif. La théorie des matériaux isotropique autorise un coefficient de Poisson compris entre -1 et 0,5. Les matériaux auxétiques sont connus pour présenter diverses caractéristiques physiques améliorées sur leurs homologues classiques allant de la résistance à la pénétration accrue à l'amélioration des propriétés d'amortissement acoustique. Ces caractéristiques améliorées, favorise la fabrication des matériaux auxétiques ayant de meilleurs résultats dans de nombreuses applications pratiques. Une classe d'auxétique, qui a attiré une attention considérable ces dernières années est celui de mousses auxétiques [JAU-99]. Les matériaux auxétiques, c.-à-d., les matériaux qui augmentent ou se rétrécissent transversalement une fois étiré ou comprimé, maintenant sont effectués, par exemple, mousse isotrope et les barres anisotropes faites de matériaux

polymères ordinaires qui possèdent les coefficients de Poisson négatif montrant l'auxétisme [GAO-98].

### I.15 Mousses auxétiques

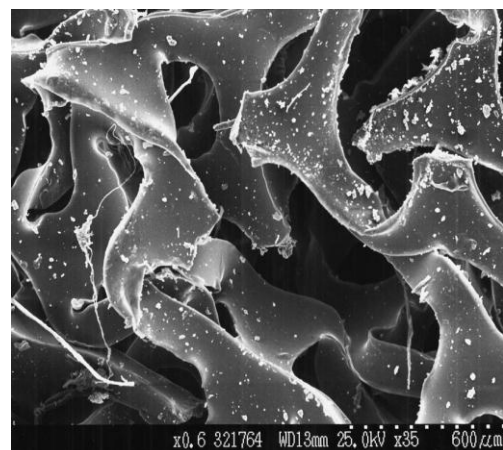
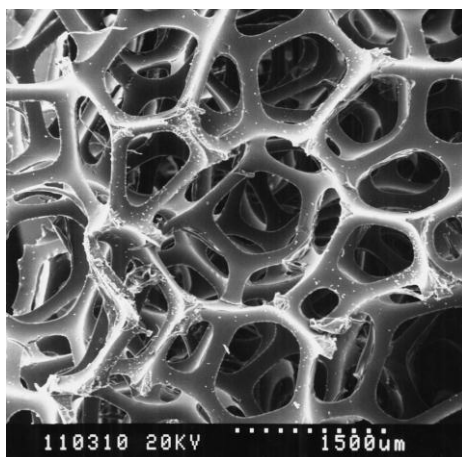
Les mousses auxétiques ou encore ayant coefficient de Poisson négatif ont d'abord été fabriqué pour la première fois en 1987 par Lakes [LAK-87] et devient rapidement un intérêt important pour la communauté scientifique.



**Figure I.12** Mécanismes de déformation bidimensionnelle

(a) matériau conventionnel (coefficient de Poisson positif)

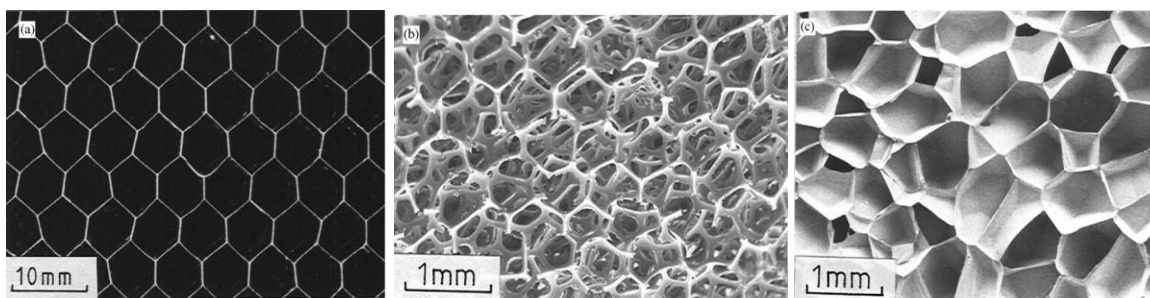
(b) matériau auxétique (coefficient de Poisson négatif [WHI-03]).



**Figure I.13** Images MEB de (a) des mousses de polyuréthane conventionnelle, et (b) la mousse de polyuréthane auxétique [SMI-00].

## I.16 Différents structures des cellules

Les différents matériaux qui peuvent posséder une structure alvéolaire sont composés par trois formes de cellules d'après la littérature et le procédé de moussage effectué sur les matériaux. On peut distinguer trois géométries principales des matériaux cellulaires (mousses cellulaires): la structure en nid d'abeilles, la mousse à cellules ouvertes, et la mousse à cellules fermées (Figure I.14).



**Figure I.14** Différentes structures cellulaires [LOR-05].

## I.17 Coefficient de Poisson

Le coefficient de Poisson ( $\nu$ ), est défini comme le rapport de la déformation transversale divisée par la déformation axiale (relation I 8). Dans les matériaux isotropes, le coefficient de Poisson peut varier entre -1 et 0,5 [BRA-06]. Le coefficient de Poisson permet de caractériser la contraction de la matière perpendiculairement à la direction de l'effort appliqué. Ce coefficient a été mis en évidence analytiquement par Denis Poisson, mathématicien Français (1781-1840), auteur de travaux sur la physique mathématique et la mécanique, qui en détermina la valeur à partir de la théorie moléculaire de la constitution de la matière.

$$\nu = \frac{(l_0 - l)/l_0}{(L - L_0)L_0} \quad (\text{I.8})$$

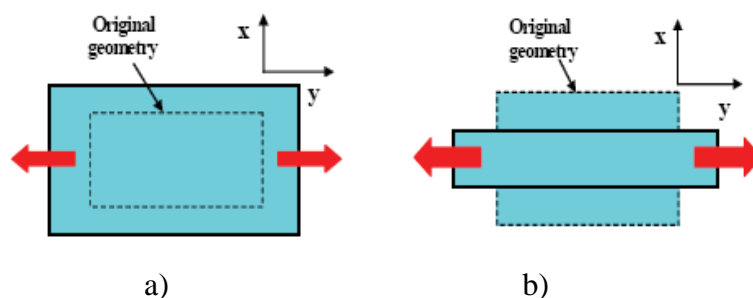
Désigné par la lettre grecque  $\nu$ , le coefficient de Poisson fait partie des constantes élastiques. Il est théoriquement égal à 0,25 pour un matériau parfaitement isotrope et est en pratique très proche de cette valeur.

Le coefficient de Poisson est toujours inférieur ou égal à 0,5 et si il est égal à 0,5, le matériau est parfaitement incompressible [FUT-08].

Aujourd'hui, toutes les résines thermodurcissables et thermoplastiques peuvent être produites sous forme de mousses. Les mousses peuvent être souples, rigides, semi-flexibles ou semi-rigides (selon la température de transition vitreuse  $T_g$ , la composition chimique, le taux de cristallinité et le degré de réticulation) [ART-95].

Les matériaux conventionnels, ayant un coefficient de Poisson positif, subissent une contraction latérale une fois étirée et une expansion axiale une fois comprimés. Alors qu'un matériau auxétique, ayant un coefficient de Poisson négatif, se gonfle une fois étiré et se rétracte une fois comprimé. Les matériaux à coefficient de Poisson négatif donnent à un matériau de nombreux avantages prouvés et postulés [GAS-00]. Traditionnellement, la portée permise du coefficient de Poisson pour un matériel élastique isotrope est  $-1,0$  à  $+0,5$  [YAN-03].

Les matériaux qui ont des coefficients de Poisson négatifs sont connus par leurs rigidités de cisaillement élevées [GAO-98]. La fabrication des matériaux synthétiques et des structures qui présente des coefficients de Poisson négatifs, par exemples les stratifiés composites, polymères microporeux, nids d'abeilles en deux dimensions et les mousses en trois dimensions [HUI-98]



**Figure I.15** Déformation du matériau avec un coefficient de Poisson  
a) négatif et b) Positif [MUL-01].

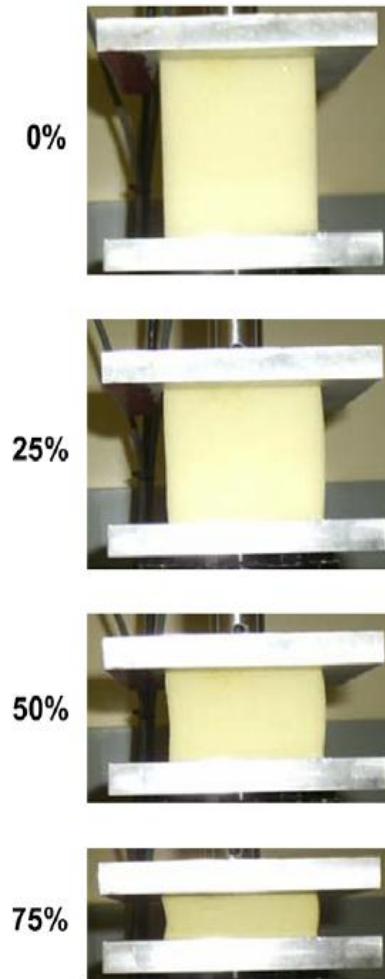
### **I.18 La mesure de coefficient de Poisson pour les mousses de polyuréthane**

Deux techniques différentes utilisées pour mesurer le coefficient de Poisson d'un échantillon type mousse polyuréthane lorsqu'il est soumis à la compression uniaxiale.

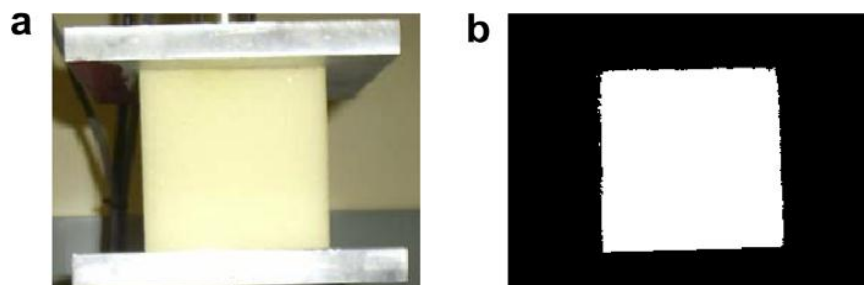
Dans la première technique, des prises des photographies de l'éprouvette à différents niveaux de compression, la région transversale est calculée par l'utilisation des outils de traitement d'images avec MATLAB. En moyenne, le coefficient de Poisson est déterminé sur la base des superficies estimée.

Les échantillons de mousse sont comprimés uniaxialement à un niveau de compression spécifiée. Les photographies sont prises à différents niveaux de compression avec un appareil photo numérique monté sur un trépied. Les photographies de mousse à 0 %, 25 %, 50 %, et la compression de 75 % sont présentées dans la figure I.16. Les images numériques sont traitées par l'utilisation de la boîte à outils de traitement d'images sur MATLAB par l'utilisation de la commande `im2bw` MATLAB, les images originales sont converties en niveaux de gris, qui est une image d'intensité. Les images en niveaux de gris étaient ensuite converties en noir et blanc (Figure I.17) des images binaires par seuillage, l'image binaire de sortie a des valeurs de 0 (noir) pour tous les pixels de l'image avec des niveaux d'intensité inférieure au seuil, et 1 (blanc) pour tous les autres pixels, basée sur une inspection visuelle des images d'origine et traitée, le niveau de seuil est choisi pour être de 0,8. La zone blanche, mesurée en pixels, est la région occupée par la mousse, est déterminée pour chaque image [WID-08].

Pour la deuxième méthode les photographies numériques sont utilisées, pas pour estimer la superficie, mais plutôt pour les déplacements relatifs des points matériels afin d'estimer l'allongement latéral et donc le coefficient de Poisson.



**Figure I.16** Photographies d'un bloc de  $300 \times 300 \times 300 \text{ cm}^3$  de mousse en compression uniaxiale dans le sens vertical en vertu de 0 %, 25 %, 50 %, et 75 % du taux de compression [WID-08].



**Figure I.17** Traitement d'images pour l'estimation de la section transversale d'un échantillon de mousse: après le traitement avec MATLAB.

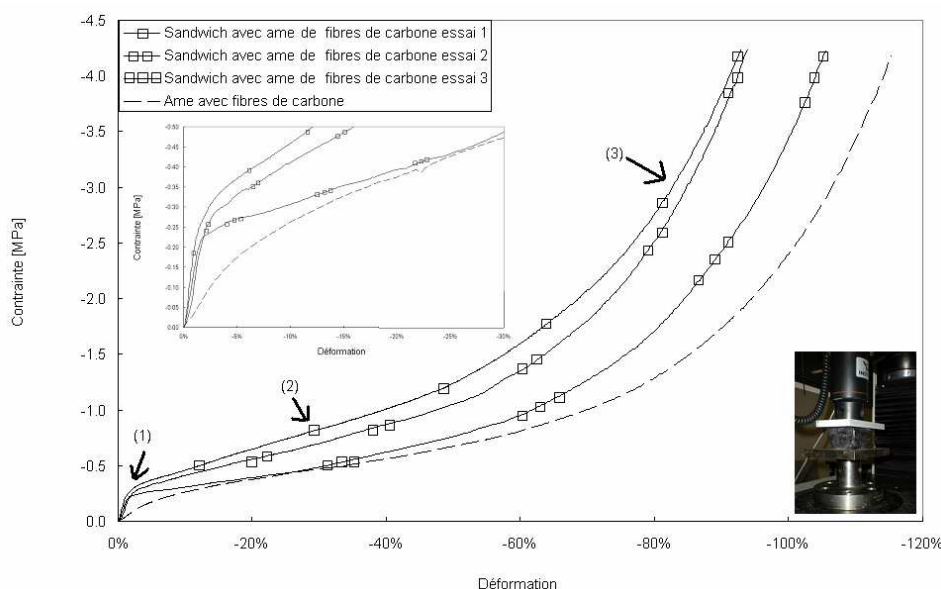


## I.19 Etat de l'art

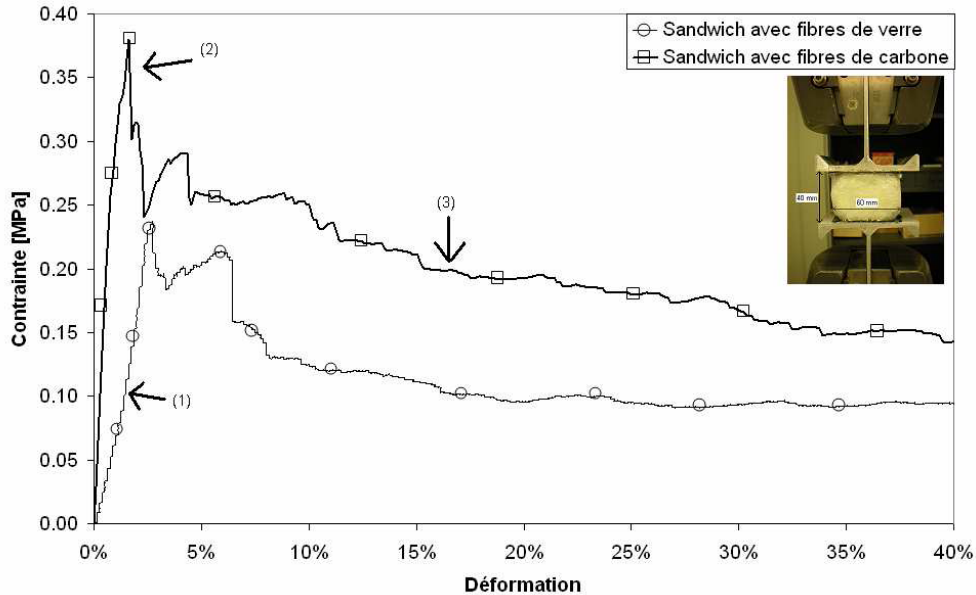
### I.19.1 Matériaux élaborés à partir de fibres enchevêtrées pour une application cœur de structure sandwich

Laurent et Christophe [LAU-09] ont élaboré des nouveaux matériaux à architecture poreuse et aléatoire à partir de fibres de verre ou de carbones enchevêtrés. Les fibres de carbone ont été choisies pour leurs bonnes propriétés mécaniques et les fibres de verre pour leur faible coût. Les comportements en compression et traction ont été étudiés sur les deux types de fibres (Figure I.18) et (Figure I.19), ils sont arrivés aux résultats suivants:

- Les sandwichs à base de fibres de carbone présentent une rigidité supérieure en traction et en compression par rapport aux sandwichs avec des fibres de verre.
- Le matériau élaboré à partir de fibres de carbone présente une meilleure reproductibilité, ceci est vraisemblablement dû au procédé d'élaboration. En effet les torons de carbone se séparent mieux que ceux en verre et permettent d'obtenir un meilleur enchevêtrement.



**Figure I.18** Courbe de compression contrainte/déformation sur des sandwichs ayant pour âme des fibres de carbone et sur l'âme seule [LAU-09].

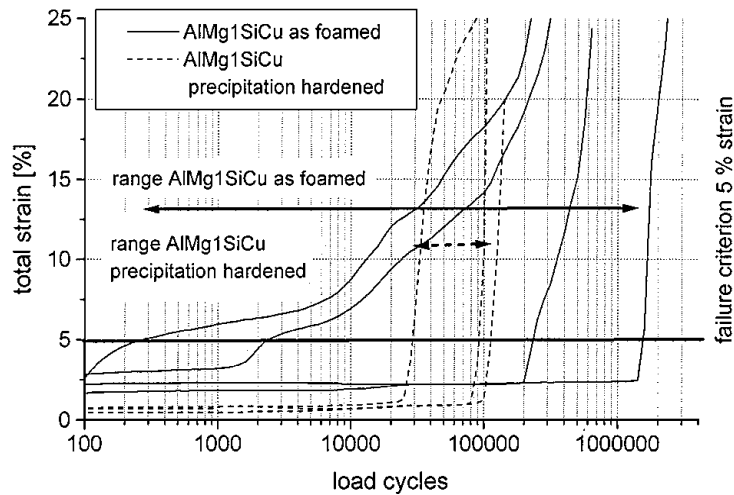


**Figure I.19** Courbe de traction contrainte/déformation sur sandwich ayant pour âme des fibres de carbone et verre [LAU-09].

### I.19.2 Influence du traitement thermique sur les mousses

Le comportement en fatigue de compression des mousses d'aluminium influencés par un traitement thermique étudié par Lehnhus *et al.* [LEH-02], tel que une partie des échantillons a été soumise à une précipitation durcissant, l'autre a été laissé dans l'état. Des essais cycliques ont été alors effectués sous des efforts de compression.

Les auteurs ont trouvés que les traitements thermiques conduisent à une croissance significative dans la résistance à la pression statique les mousses en aluminium comparé à ceux obtenues avec des matériaux non traités. Cependant cet effet positif est partiellement maintenu quand des conditions de chargement cycliques sont appliquées. On observe une baisse plus forte de force pour les alliages soumis à un traitement thermique que pour les alliages non traités. Les avantages du traitement thermique donc sont partiellement perdus (Figure I.20). La raison de cet effet est double : Premièrement, la précipitation durcissant le traitement des alliages travaillés d'AlMgSiCu et d'AlMgSi coïncide avec un changement des modes de défaillance (d'endommagement) de malléable à fragiles. Associée à ce changement est une dureté de rupture inférieure ce qui facilite l'initiation et la propagation des fissures.



**Figure I.20** Exemples de la déformation en compressive en fonction du nombre de cycle pour deux types différents d'alliage AlMg1SiCu avec et sans traitement d'augmentation de la dureté [LEH-02].

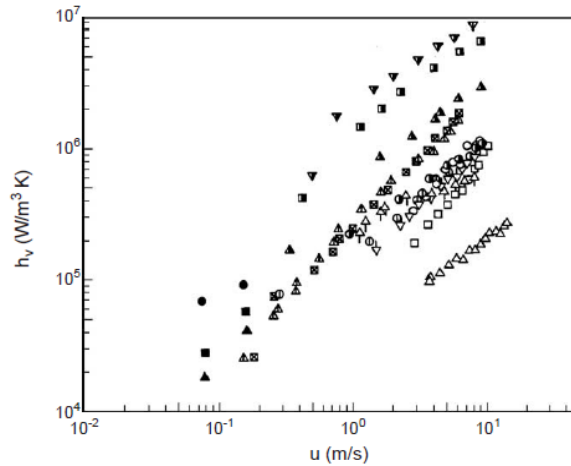
### I.19.3 Transfert de chaleur des matériaux cellulaires

Une corrélation générale pour le coefficient de transfert de chaleur volumétrique entre le flux d'air et un matériau poreux avec des cellules fermées, a été déterminée par l'utilisation des données expérimentales obtenues par plusieurs chercheurs. La corrélation peut être écrite sous forme de [KAM-05] :

$$h_v = (A / D_s^{2-n}) u^n \quad (\text{I.9})$$

Ici,  $h_v$  désigne le coefficient de transfert thermique volumétrique,  $A$  est une constante,  $n$  est l'exposant de la vitesse,  $u$  est la vitesse moyenne du fluide et  $D_s$  est le diamètre équivalent du clinquant de la cellule unitaire pour mousse à cellules ouvertes.

Les paramètres,  $A$  et  $n$ , ont été déterminées par un ajustement des moindres carrés de l'expression (I.9) à des données expérimentales (a titre indicatif  $A = 13,0$  et  $n = 0,791$ ). En outre, de la corrélation  $h_v$  ainsi déterminé [KAM-05], ce qui suit Nusselt en fonction du nombre de Reynolds de la chaleur de corrélation de transfert a été proposé:  $Nus = 0,124 (Re_s Pr)^{0,791}$ , où Nus représente le nombre de Nusselt défini par  $h_v D_s^2 / k_f$ ,  $Re_s$  désigne le nombre de Reynolds défini par  $u d_s / \nu_f$ , Pr est le nombre de Prandtl,  $k_f$  est la conductivité thermique du fluide et  $\nu_f$  est la viscosité cinétique du fluide. Il a été constaté que cette corrélation se rapproche de 78,1% des données expérimentales disponibles avec une erreur inférieure à  $\pm 40\%$ .

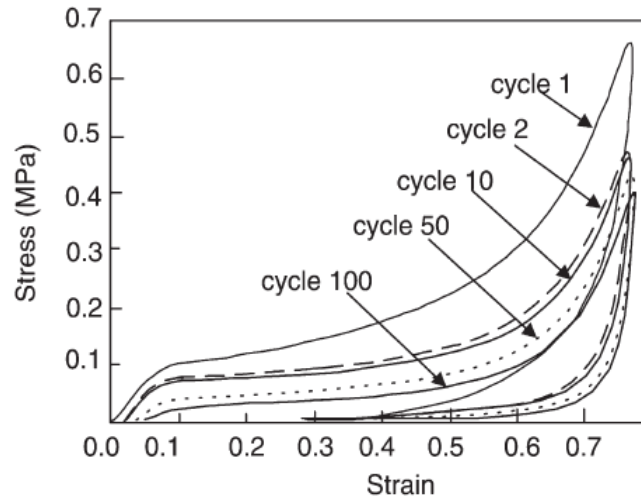


**Figure I.21** Relations entre le coefficient de transfert chaleur volumétrique  $h_v$  et la vitesse moyenne du fluide  $U$  [KAM-05].

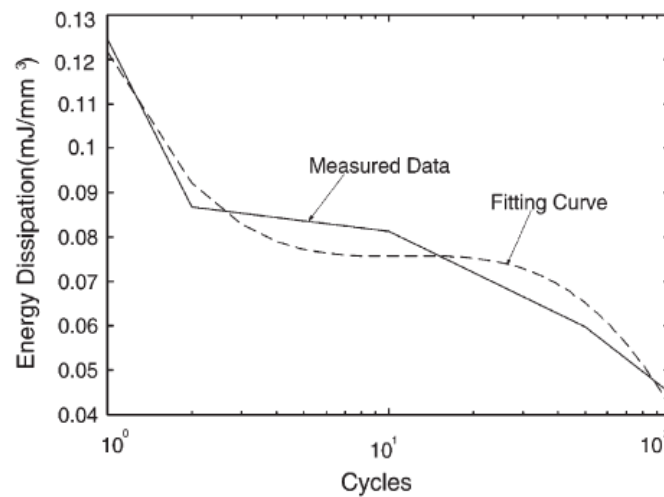
#### I.19.4 Modélisation du comportement contrainte-déformation de la mousse structurale en compression cyclique de la mousse polyuréthane

La mousse en polyuréthane, semblable à celle utilisée pour la protection à l'intérieur d'automobile a été soumise à un cycle compression continue [SHE-01]. Le chargement et le déchargement des relations contrainte-déformation pour un cycle donné peuvent être entièrement décrits par l'application du modèle modifié d'Ogden pour le caoutchouc compressible. L'énergie accumulée dissipée qui indique la capacité d'amortissement des vibrations de la matière peut être exprimée sous la forme d'une fonction mathématique simple. La notion de chemin de chargement de l'énergie dissipée avec l'utilisation de la fonction de Weibull a été appliquée pour exprimer la manière dont les dommages cycliques sont accumulés.

Pour cela Shen *et al* [SHE-01] ont montré que le modèle modifié d'Ogden peut être appliqué pour exprimer en chargement cyclique la relation contrainte-déformation pour une mousse polyuréthane. Avec ce modèle pour les matériaux compressibles, une expression peut être développée pour prédire la relation contrainte-déformation pour un cycle donné. Le concept présenté est facilement appliqué et peut être étendu au comportement cyclique des élastomères. La fonction de Weibull a été utilisée comme une fonction d'ajustement de courbe de l'énergie dissipée. En outre, le LDE a été utilisé pour décrire l'évolution des dommages cycliques.

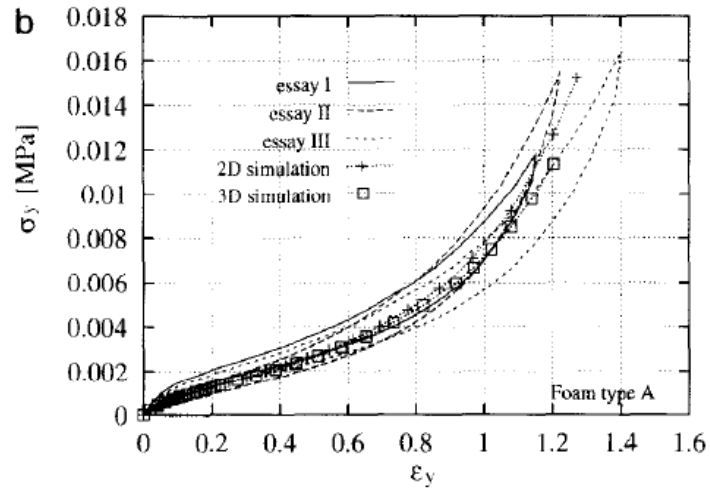


**Figure I.22** Courbes expérimentales de contrainte-déformation [SHE-01].

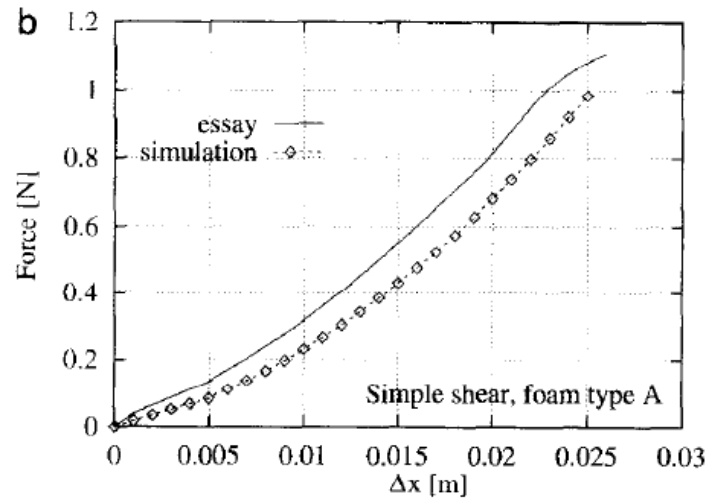


**Figure I.23** Energie dissipée en fonction du nombre de cycles [SHE-01].

Wronski [WRO-99] a présenté un modèle d'une simulation numérique, pour vérifier la validité du modèle présenté, et a comparé les résultats de simulations numériques avec les résultats de tests expérimentaux effectués à l'Université de Liège. Les mesures expérimentales ont été prises pour plusieurs échantillons de mousse, avec la vitesse de déformation de 20 mm/s et la déformation maximale jusqu'à 75% de l'état initial. Les résultats des simulations numériques présentées dans les figures I.24 et I.25 montrent la grande précision du modèle présenté, en particulier les essais de compression.



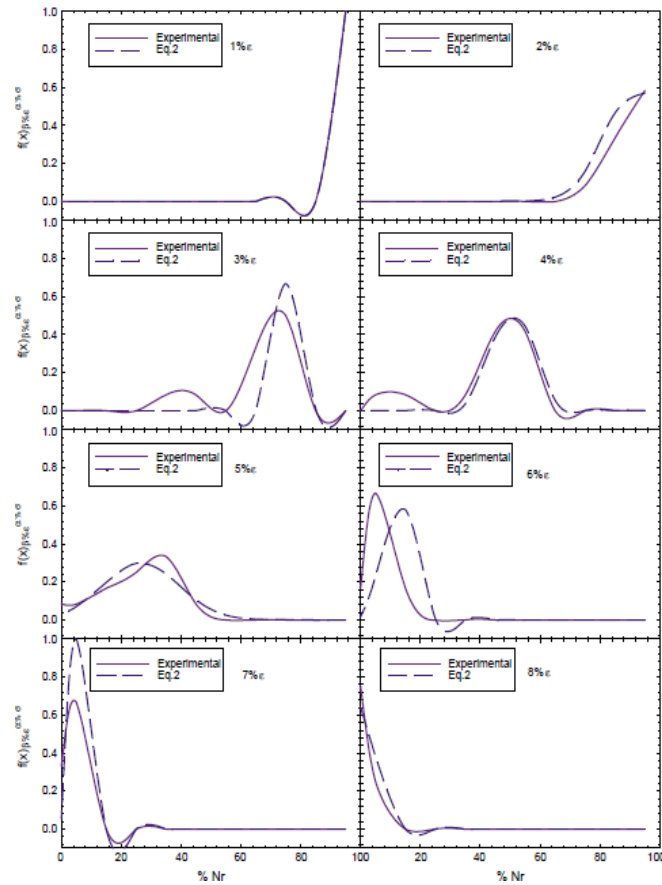
**Figure I.24** Courbes contrainte-Déformation en compression d'une mousse [WRO-99].



**Figure I.25** Courbes Force-déplacement de la mousse étudiée par Wronski [WRO-99].

### I.19.5 Fatigue des composites à âme mousse

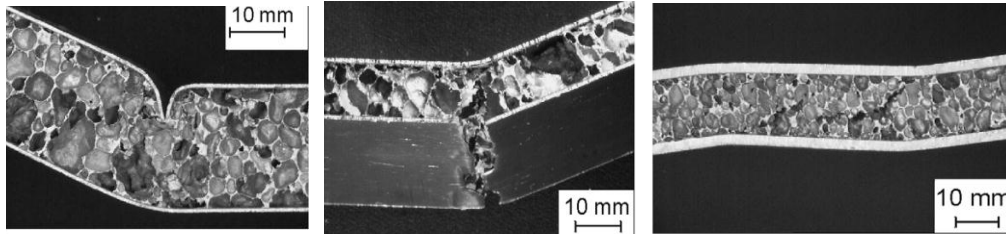
Basir [BAS-06] a analysé via l'émission acoustique (EA) l'étendue du dommage lors d'un essai de fatigue quasi-statique et à la flexion des composites à sandwich avec une âme en mousse. Plusieurs sites d'initiation des fissures ont été observés dans des conditions de chargement en fatigue au voisinage de la pointe macroscopiquement (Figure I.26).



**Figure I.26** Comparaison typique entre des résultats et autres calculées [BAS-06].

Les deux modes I et II de fissuration ont été observés dans le noyau (l'âme) et le long de l'interface entre le noyau et les peaux. L'analyse par EA a fourni des renseignements très précis sur l'étendue et la localisation des endommagements dans les différents constituants des composites sandwichs ; EA a indiqué l'échec de base ainsi que les mécanismes prédominants des dommages suivis par l'échec interfaciale, alors que, la rupture de fibres déclenche l'apparition d'une défaillance catastrophique.

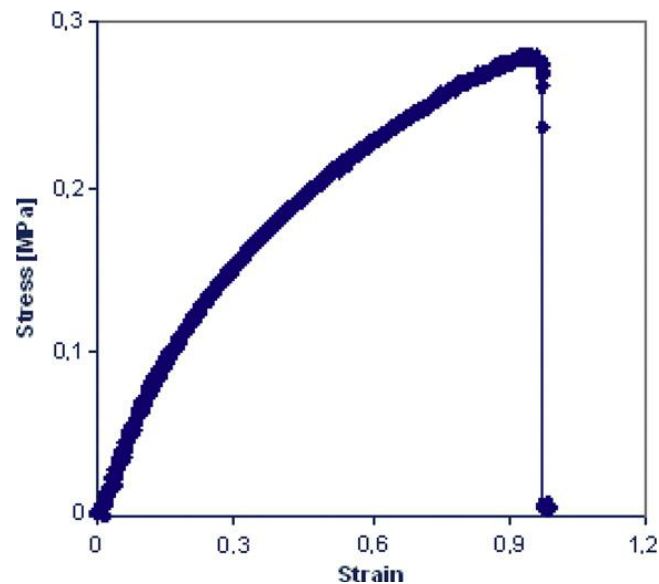
Les sandwichs avec des peaux en aluminium et un noyau en mousse d'alliages d'aluminium ont été testés et étudiés par Harte [HAR-01] sous un chargement cyclique et monotone, l'étude expérimentale et théorique a montré qu'une réduction de la résistance des poutres sandwichs existe pour le chargement cyclique par rapport à un chargement monotone.



**Figure I.27** Modes de défaillances observées en fatigue: (a) l'indentation, (b) la fatigue et la face de cisaillement de base (c) Dans le cas du noyau de cisaillement, inclinée [HAR-01].

### I.19.6 Traction des mousses PVDF (Polyvinylidene Fluoride)

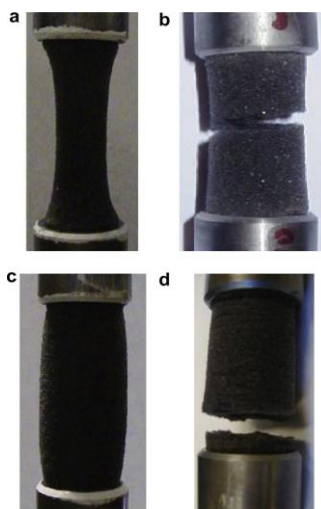
Les propriétés en traction statiques des mousses PVDF à cellules fermées sont analysées par Bezazi *et al* [BEZ-11] lors des essais de traction monotones ont montré des similitudes avec d'autres polymères à cellules fermées, comme ceux basés sur PMI, mais avec déformation à la rupture près de 50 fois plus élevé que leurs homologues polyméthacrylimide plus fragiles Figure I.28.



**Figure I.28** Courbe Contrainte-déformation en traction statique pour une mousse PVDF [BEZ-11].

Le mode de défaillance des mousses polyuréthane (PU) en traction est obtenu vers les bords d'extrémité de l'échantillon pour des mousses ayant un coefficient de Poisson négatif (Figure I.29), par contre la rupture est obtenue au milieu des éprouvettes dans le cas des mousse PU à coefficient de Poisson positif [FRI-10].





**Figure I.29** Mode de la rupture en traction des mousses polyuréthane à coefficient de Poisson positif (a et b) et négatif (c et d) [FRI-10].

## I.20 Position du problème et techniques adoptées

Les mousses polyuréthanes flexibles à cellules ouvertes sont largement utilisées pour leur qualité d'isolation thermique, leur adhérence sur tout support, leur pouvoir de flottaison, leur capacité à remplir les vides tels qu'ils soient et à permettre des emballages sur mesure, légers et solides. Leur utilisation est efficace aussi pour remplir un vide de bas de caisse de voiture et éviter que la rouille ne s'y propage en faisant barrière à l'eau de pluie. On remplit le caisson et la mousse se propage dans les interstices comblant les "perforations".

Pour cela nous avons eu le désir de caractériser et analyser deux types de mousses produites localement (société Algérienne) dédiées pour cette étude, la transformation des mousses d'un état conventionnel (coefficient de Poisson positif) à un état auxétique (coefficient de Poisson négatif) s'accrédite sur des techniques et des matériels développés ; nous avons voulu effectuer cette transformation au niveau de notre laboratoire de mécanique et structures (LMS) en utilisant le matériel disponible.

Souvent les mousses polyuréthane flexibles à cellules ouvertes sont exposées à la compression et à charge monotone à base de laquelle des testes de compression ont été choisis, traction statique et de fatigue cyclique en compression pour tirer :

- L'évolution de la charge en fonction du déplacement (détermination de la charge maximale) ;
- La contrainte et la déformation ;
- Les constantes de l'ingénieur (module de Young et le coefficient de Poisson) ;

- La perte de rigidité en fonction du nombre de cycle ;
- L'évolution de l'énergie en fonction du nombre de cycle ;
- L'effet de transformation des mousses conventionnels en mousse auxétique.

## **Chapitre II**

# **Techniques expérimentales**

## Chapitre II

# Techniques expérimentales

### II.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation de la partie expérimentale de ce mémoire de magister; où les différentes techniques expérimentales utilisées pour caractériser les propriétés mécaniques des mousses polyuréthane à cellules ouvertes sont expliquées, où ces dernières sont fabriquées par une société Algérienne (Mousse du sud) à Touggourt. Les différents matériaux d'étude utilisés sont découpés en éprouvettes qui ont été sollicitées en compression et en traction monotone. Les essais de fatigue cyclique sont effectués seulement dans le cas de sollicitation en compression. Le contenu de ce chapitre est comme suit :

- Matériau de l'étude.
- Techniques de préparation des mousses polyuréthane
- Préparation des éprouvettes
- Usinage des pièces de traction
- La transformation des échantillons d'un état conventionnel à l'état auxétique (coefficient de Poisson négatif)
- Description des conditions d'essais mécanique compression, traction statique et de compression en fatigue cyclique.

### II.2 Matériau de recherche

Les mousses qui concernent cette étude sont des mousses Polyuréthane à cellules ouvertes ayant deux densités différentes, dont le premier type est la mousse rose de  $0,016 \text{ g/cm}^3$  et le deuxième type est la mousse grise de  $0,025 \text{ g/cm}^3$ . Ces derniers sont fabriqués par une société commerciale Algérienne.

### II.3 Techniques de préparation des mousses polyuréthane

Chaque fabricant de mousse polyuréthane garde jalousement sa recette de composants principaux, dérivés du pétrole (polymères) comme le polyol et l'isocyanate (catalyseur).

Pour simplifier nous pouvons comparer le procédé de fabrication de mousses, à celui de la fabrication du pain.

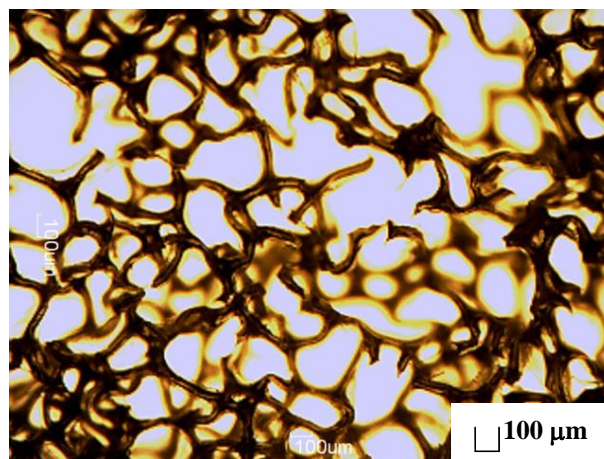
En effet, le mélange des composants polymères, du catalyseur et de l'eau, sont d'abord émulsionnés et étendus en épaisse couche sur un tapis roulant. Cette couche liquide commence immédiatement à lever comme une pâte à pain.

La réaction chimique produit du dioxyde de carbone avec un fort dégagement de chaleur qui transforme l'eau en vapeur. Cette vapeur d'eau s'élève par sa légèreté et sa pression augmente. L'effet expansif ou gonflement de la pâte qui devient ainsi de plus en plus spongieuse. Les polymères ou résines jouent le rôle de la farine, le catalyseur et l'eau celui du levain.

Il existe bien entendu plusieurs recettes et donc plusieurs types de mousse. Nous connaissons les mousses polyester et polyuréthane.

Le procédé de fabrication est le même, seules les caractéristiques souhaitées par le fabricant (Densité, élasticité, résistance) détermine le dosage de la mixture.

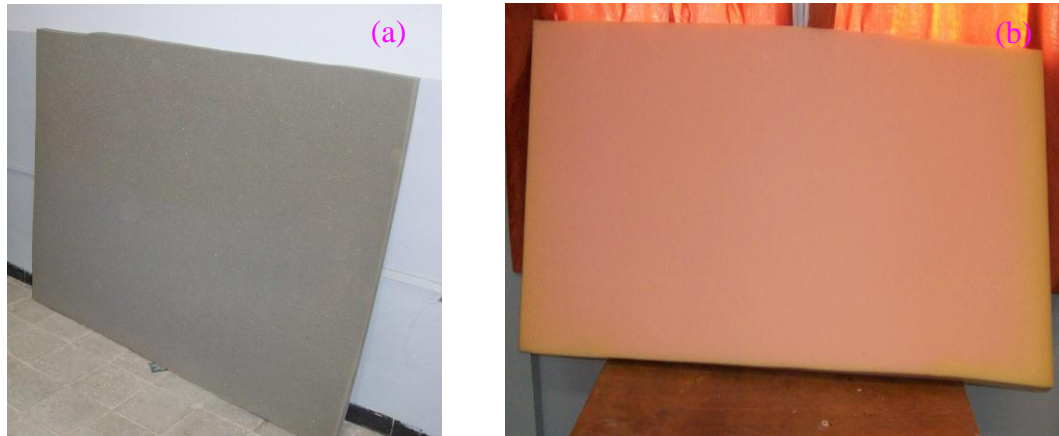
- La mousse polyester se distingue par une structure alvéolaire très fine à circulation d'air médiocre.
- La mousse polyuréthane est plus spongieuse avec des alvéoles plus grandes permettant une meilleure circulation d'air [BEZ-09].



**Figure II.1** image cellulaire de polyuréthane.

## II 4 Préparation des éprouvettes

Les éprouvettes d'essais sont découpées à partir de blocs de mousses ayant les dimensions suivantes : 190cm×140cm×5cm pour la mousse grise; et 180cm×60cm×5cm pour la mousse rose comme nous indique la figure II.2.



**Figure II.2** Blocs de mousse (a) la mousse grise (b) la mousse rose.

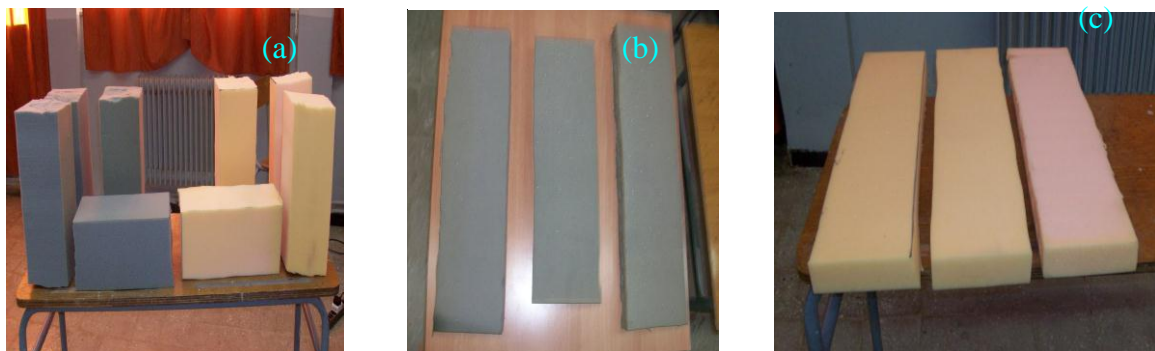
### II 4.1 Scie à ruban

L'opération de découpe des blocs en mousse polyuréthane est réalisée au Laboratoire mécanique et structures (LMS) à l'aide d'une scie à ruban équipée d'un moteur électrique de puissance 400 W, ainsi que d'une table mobile ayant une longueur de 600 mm et une largeur de 470 mm. Cette machine fonctionne avec un courant alternatif de 220 V, peut couper jusqu'à une épaisseur maximale de 240 mm et une largeur de coupe de 210 mm (Figure II.3).



**Figure II.3** Scie à ruban.

Avant d'être découpés en éprouvette les blocs de mousse polyuréthane (Figure II.2) sont découpés en petits blocs (morceaux) voir Figure II.4.



**Figure II.4** Morceaux de mousse polyuréthane.

#### II 4.2 Les coupleurs

Les éprouvettes désirées sont découpées à l'atelier d'usinage de département de Génie mécanique de l'université de 08 Mai 1945 de Guelma à l'aide de deux coupleurs (Figure II.5)

de diamètres différents (28 mm et 22 mm), conçue spécialement à l'usage des deux types de mousses de cette étude.



**Figure II.5** Les coupoirs.

### II 4.3 Machine d'usinage

La machine utilisée pour la fabrication des coupoirs et la découpe des échantillons est un tour à charioter et à fileter fabriqué par la société tchèque TOS TRENCIN modèle T05 SN40C de puissance sur la broche égale à 6.6 KW figure II.6, les nombres de tours disponibles sur la machine sont : 22,5; 31,5; 45 ; 63; 90; 125; 180; 250; 355; 500; 710; 1000; 1400; 2000 (tr/min). Nous avons choisi 710 tr/mn. Les avances disponibles sont : 0,08; 0,11; 0,12; 0,14; 0,16; 0,2; 0,24; 0,28; ... 6,4 (mm/tr).

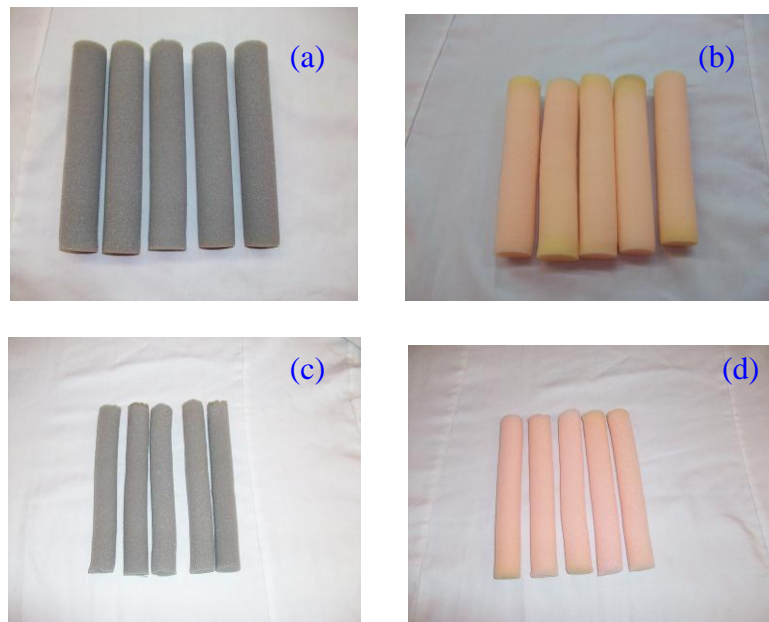


**Figure II.6** Tour de type T05 SN40C.



## II.5 Première série des éprouvettes

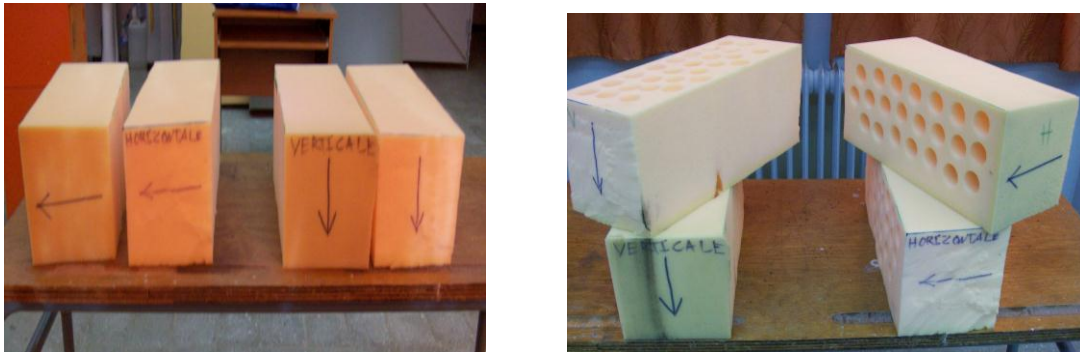
Cette série est consacrée pour les essais de traction et de compression statique dans un seul sens de coupe.



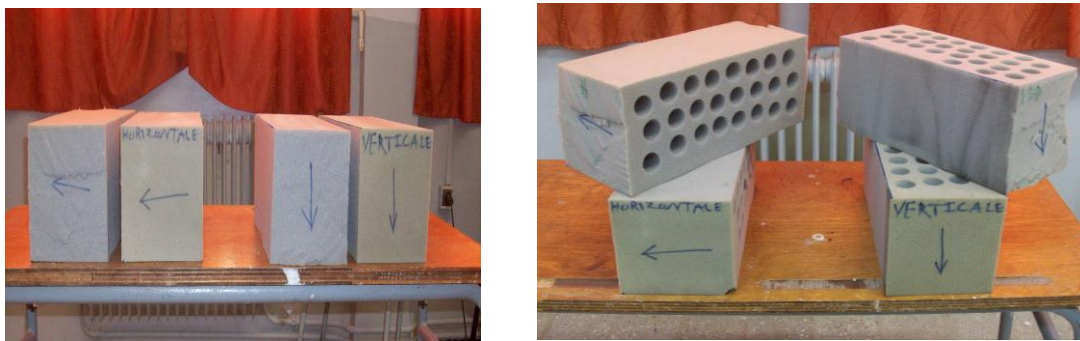
**Figure II.7** Gamme des éprouvettes fabriquée.  
(a) et (b) respectivement les mousses grise et rose de diamètre 28 mm  
(c) et (d) respectivement les mousses grise et rose de diamètre de 22 mm

## II.6 Deuxième séries des éprouvettes

Cette série d'éprouvettes est consacrée aux essais de compression dans deux différents sens de coupe, c'est-à-dire la découpe des blocs de mousses en éprouvettes est effectué dans le sens vertical et dans le sens horizontal (Figure II.8 et II.9). Ceci est effectué dans le but de mettre en évidence l'effet de la variation de la direction d'usinage sur le comportement mécanique en traction et en compression statique.



**Figure II.8** Le sens de coupe horizontal et vertical de la mousse polyuréthane rose.



**Figure II.9** Le sens de coupe horizontal et vertical de la mousse polyuréthane grise.

**Tableau II.1** Dimensions et densités des éprouvettes.

	Densité (g/cm <sup>3</sup> )	Hauteur (mm)	Diamètre (mm)
Mousse polyuréthane rose	0,016	150	28
			22
Mousse polyuréthane grise	0,025	150	28
			22

## II.7 Usinage des pièces de traction

Des pièces métalliques (Figure II.10 a) sont fabriquées à l'atelier de Génie mécanique sur une fraiseuse universelle (Figure II.10 b) pour servir à la fixation des éprouvettes en mousse lors des essais de traction.



**Figure II.10** (a) pièces usinées (b) fraiseuse.

## II 8 La transformation (en matériau auxétique)

### II 8.1 Dispositif de transformation

Les échantillons auxétiques ont été fabriqués à partir d'une mousse polyuréthane conventionnelle grise et rose à cellules ouvertes avec les densités de  $0,0255 \text{ g/cm}^3$  et  $0,0162 \text{ g/cm}^3$  respectivement en utilisant le processus décrit dans les travaux de Bezazi & Scarpa [BEZ-07, BEZ-09].

Le dispositif utilisé pour fabriquer les échantillons est en aluminium et qui est constitué par deux séries de cinq tubes et 05 pistons interchangeable et d'une semelle de dimensions  $300 \times 200 \times 5 \text{ mm}$ . Les tubes ont un diamètre de 19 mm, une longueur de 150 mm et 1 mm d'épaisseur pour la première série et ceux de la deuxième série ont respectivement un diamètre, une longueur et une épaisseur de 22 mm, 230 mm et 1 mm. Les pistons de la première et la deuxième série ayant une longueur de 20 mm ont des diamètres de 18,7 mm et 21,7 mm respectivement. Les diamètres des pistons donc sont légèrement plus faibles par rapport aux diamètres intérieurs des tubes afin de permettre un mouvement glissant et éviter toute inclinaison des échantillons dans les tubes. Une tige cylindrique de 8 mm de diamètre est fixé dans chaque piston afin de servir a sont entraînement dans le tube, une fois que le piston atteint la position désirée la tige est fixé par une vis de pression (Figure II.11).



**Figure II.11** *Dispositif de transformation.*

## II 8.2 Processus de transformation

Les mousses auxétiques sont fabriqués à partir des mousses conventionnels comprimés simultanément dans le sens axial et radial des éprouvettes, puis chauffés à une température de ramollissement pendant un temps adéquat. Dans notre cas, les mousses auxétiques sont obtenues à partir des cylindres ayant 28 mm de diamètre et 150 mm de longueur avec des taux de compression différents. Ces cylindres sont ensuite comprimés à l'intérieur du dispositif avant de les chauffer dans une étuve pour une température de 160°C, pour l'obtention d'un diamètre final nominal de 22 mm et une longueur de 20 mm. Après la décompression et la détente des échantillons, les dimensions deviennent 26 mm de diamètre et 142 mm de longueur. L'étuve utilisé est de marque **Memmert modèle 500** à une chambre de dimension de : 560 x 480 x 400 mm<sup>3</sup> équipé d'un système de chauffage jusqu'à 220 °C avec un afficheur électronique (Figure II.12). L'étuve est donc équipé d'un régulateur électronique et d'un thermostat (chauffage ou l'arrêt) permettant le réglage de la température de consigne désiré de l'appareil avec une précision d'affichage et de lecture de 0,5 °C.

Le processus de fabrication des échantillons auxétiques se déroule en quatre étapes :

- i) Compression.
- ii) chauffage.
- iii) Refroidissement.
- iv) relaxation (décompression).



**Figure II.12** *Etuve.*

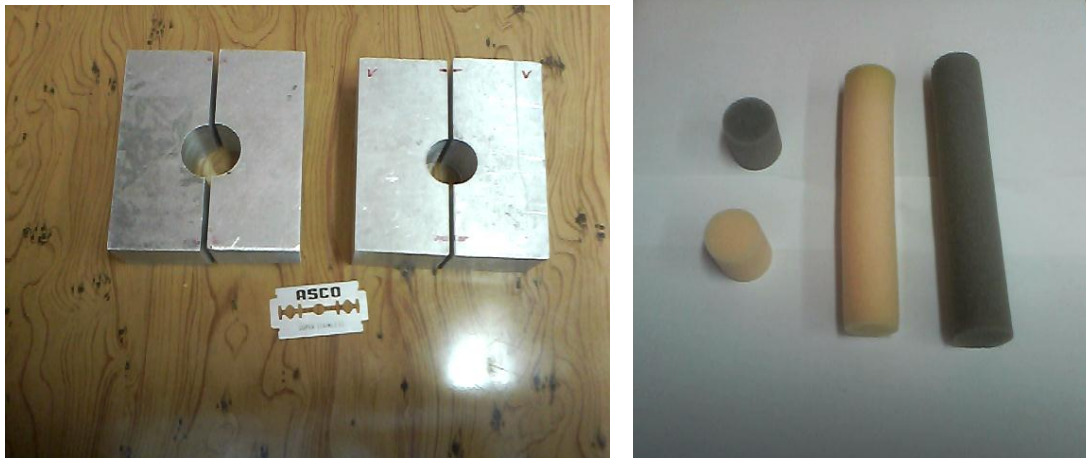


**Figure II.13** *Eprouvettes transformées.*

## II 9 Préparation des échantillons

### II 9.1 La découpe des éprouvettes

Les éprouvettes des mousses auxétiques et conventionnelles ayant des dimensions choisis selon les travaux de BEZAZI *et al* [BEZ-07], une hauteur de 30 mm et différents diamètres de 22 et 28 mm ; sont découpées par une lame de rasoir en utilisant les dispositifs présentés dans la figure II.14.



**Figure II.14** (a) *dispositif de découpe des éprouvettes* (b) *éprouvettes découpées.*

## II 10 Techniques expérimentales

### II 10.1 Machine d'essais

Les essais de compression de traction et de fatigue cyclique ont été entrepris sur une machine d'essai universel type Zwick / Roell Z005 dont la capacité de charge maximale est de 5 kN. Elle permet d'effectuer des essais dans une gamme de vitesses de déplacement comprises entre 0,001 et 500 mm/min. Cette machine est pilotée par un ordinateur autorisant le lancement des essais et l'acquisition des données par l'intermédiaire du logiciel *testXpert* qui permet la programmation de cycles complexes et le pilotage des essais avec différentes vitesses en contrôle force ou déplacement.



(a)



(b)



(c)

**Figure II.15** (a) Machine d'essai (b) dispositif de traction (c) dispositif de compression.

## II 10.2 Essais statiques

Les essais statiques effectués sur deux types de mousses sont réalisés avec une vitesse constante de 5 mm/min sur 64 éprouvettes en compression et 10 en traction.

## II 10.3 Essais de fatigue cyclique

Les essais de fatigue ont été menés en contrôle déplacement avec une forme d'onde sinusoïdale avec une fréquence de 1 Hz. Les éprouvettes utilisées dans le cas des essais de fatigue sont similaires à ceux utilisés dans le chargement statique. Les éprouvettes sont soumises à un chargement statique jusqu'à un déplacement moyen, puis à un chargement cyclique à différentes valeurs d'amplitude qui se traduit par différents niveaux de chargement soit :  $r$  (0,72; 0,75; 0,80; 0,85, 0,90). Le niveau de chargement est donné par la relation (II 1):

$$r = d_{\max} / d_{rup} \quad (\text{II } 1)$$

Où

$d_{\max}$ : déplacement maximal.

$d_{rup}$ : déplacement à 80% de compression de la longueur initial de l'éprouvette.

Les différents paramètres des essais de fatigues sont présentés dans la figure II.15.

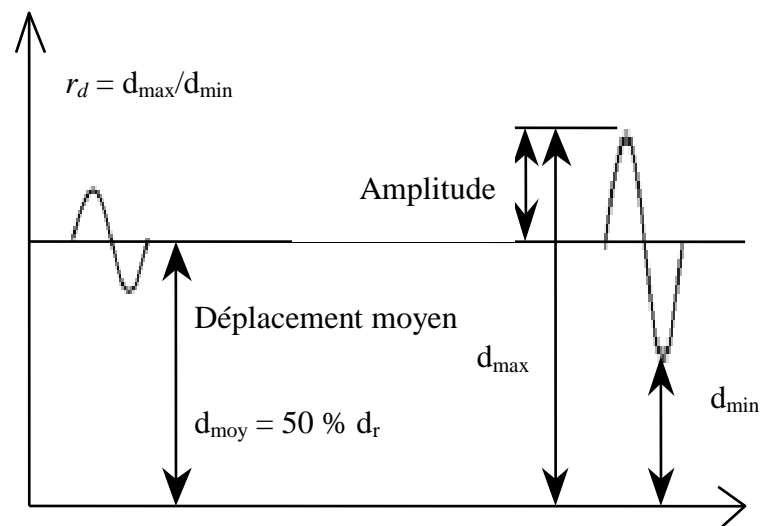


Figure II.16 Paramètres essentiels pour l'étude en fatigue.



## II 10.4 Calcul de la densité des mousses

La détermination de la densité des différentes mousses polyuréthane étudiées consiste à la pesée des échantillons par une balance électronique d'une précision de 0,01 g et au calcul du volume des éprouvettes. La densité ( $\rho$ ) peut être donc déterminée par la relation :

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{II } 2)$$

Où  $m$  et  $V$  sont respectivement la masse en gramme et le volume de l'éprouvette en  $\text{cm}^3$ .



**Figure II.17** Balance de précision électronique 0,01 g.

Les résultats moyens obtenus pour les mousses polyuréthane non transformé (original) sont présentés dans le tableau II.2.

**Tableau II.2** Dimensions et caractéristiques des mousses.

	hauteur (mm)	diamètre (mm)	densité ( $\text{g/cm}^3$ )
Mousse polyuréthane rose	30	28	0.016
Mousse polyuréthane grise	30	28	0.025

## II 10.5 Mesure de la porosité

La détermination de la porosité est effectuée à l'aide d'un microscope optique binoculaire (Figure II.17), disponible au laboratoire de mécanique et structures (LMS) du département de Génie Mécanique de l'université 08 mai 1945 Guelma.



**Figure II.18** *Microscope.*

## II 11 Conclusion

Le chapitre II décrit et explique les techniques expérimentales utilisées pour la préparation des échantillons, en plus d'une citation du matériel (machines, coupleurs, dispositif de traction et de compression, étuve, dispositif de transformation, ... etc.).

Nous avons ensuite décrit la technique de transformation des mousses conventionnelles (originales) avec un coefficient de poisson positif à une mousse auxétique (transformé) ayant un coefficient de Poisson négatif. Cette technique est basée sur la compression radiale est axiale des éprouvettes dans des tubes ayant différents diamètres, au chauffage dans l'étuve à une température de ramollissement, suivie par un refroidissement à l'air et enfin une décompression des échantillons élaborés.

Une analyse microscopique sur l'effet de la transformation de la structure des cellules des mousses est aussi effectuée via un microscope optique.

## **Chapitre III**

# **Etude expérimentale du comportement de mousse en compression et traction statique**

## Chapitre III

# Etude expérimentale du comportement des mousses en compression et traction statique

### III.1 Introduction

Ce chapitre décrit les travaux expérimentaux et les essais effectués pour déterminer les caractéristiques mécaniques en statiques (compression et traction) des mousses polyuréthane. Deux mousses polyuréthane à cellules ouvertes de couleur rose et grise ayant différentes densités sont étudiés. À partir de blocs de mousses des éprouvettes sont découpées et testés au sein du laboratoire de mécanique et structures (LMS) de l'université du 08 Mai 1945 Guelma, il s'agit donc :

- Des essais de compression statique effectuée sur les deux types de mousses, découpés à partir de bloc de 5 cm d'épaisseur, pour déduire la force, le déplacement et le coefficient de Poisson.

- Des essais de compression statique de la même manière pour les deux types de mousses mais cette fois ci ayant différent sens de coupe : selon la direction horizontale et verticale du bloc de mousse ayant 15 cm d'épaisseur, dont le but de déterminer les caractéristiques mécaniques (la force; le déplacement, ...). En outre, étudié l'effet de changement appliqué sur le sens de la coupe par rapport au comportement mécanique des deux mousses de cette étude.

- Des essais de traction statique effectuée aussi sur les deux types de mousses, découpés à partir de bloc de 5 cm, pour déterminer leurs propriétés mécanique, module de Young, la contrainte et la déformation à la rupture.

### III.2 Essais de compression statique

Les essais de compression statique ont été réalisés sur deux types de mousses ; la gamme des échantillons consacrée à ces tests se divise en deux groupes : dans le premier

groupe les éprouvettes des mousses avec leur état original sont testés, alors que dans le deuxième groupe les mousses sont transformés en mousses auxétiques (les étapes détaillées de transformations sont décrite dans le chapitre II avec différents taux de compressions avant d'être testés. Les mousses de cette étude sont fournis par une société Algérienne de fabrication des mousses pour matelas [Mousse du sud] à Tougourt. Tous les essais ont été effectués à une température ambiante, et avec une vitesse de 5 mm/min.

On a divisé les échantillons en trois séries tel que : la première été préparé d'un bloque de 180cm×60cm×5cm, la deuxième été préparé d'un bloque de 190cm×140cm×15cm, selon le sens de coupe horizontale et la troisième série été préparé d'un même bloque mais dans le sens verticale de coupe.

Le tableau III.1 ci-dessous illustre les résultats obtenus de la densité moyenne et les dimensionnements des échantillons des éprouvettes ayant une mousse rose (R) ou grise (G) original (orig) ou transformé avec les deux taux de compressions utilisés (28/22 et 28/19).

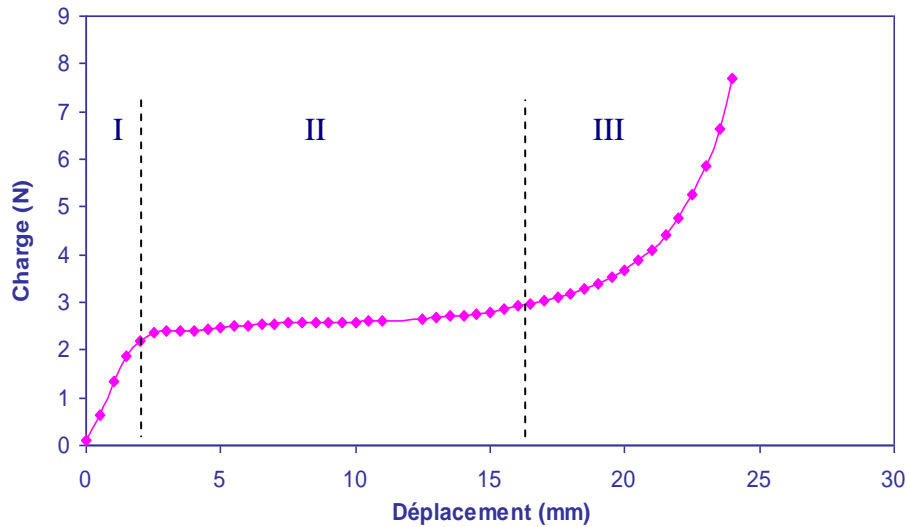
**Tableau III.1** densité moyenne et dimensionnement des échantillons.

	Type de mousse	La hauteur (mm)	Le diamètre (mm)	Densité moyenne (g/cm <sup>3</sup> )
<b>Groupe 1</b>	Mousse R 28/22	28,20	26,20	0,019
	Mousse G 28/22	28,00	27,70	0,026
	Mousse R 28/19	29,70	26,00	0,020
	Mousse G 28/19	26,40	26,40	0,032
<b>Groupe 2</b>	Mousse R 22 orig	30	22	0,016
	Mousse G 22 orig	30	22	0,025
	Mousse R 28 orig	30	28	0,016
	Mousse G 28 orig	30	28	0,025

### III.2.1 Essais de compression statique de la mousse polyuréthane conventionnel

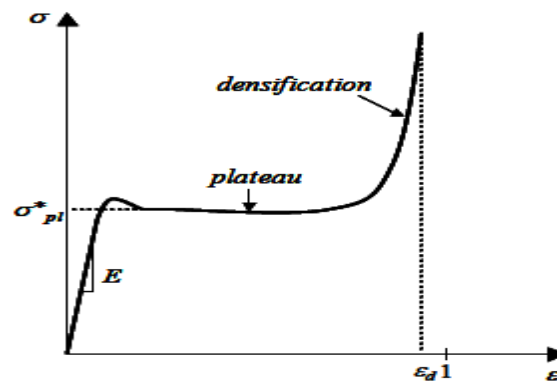
La figure III.1 représente une courbe type de l'évolution de la force en fonction du déplacement des mousses polyuréthanes à cellules ouvertes dans son état originale (non transformé). D'après la théorie classique des mousses développée par Gibson et Ashby [GIB-01], la courbe représentative de la compression des solides cellulaire, que ce soit élastomère

ou plastique, montre une phase linéaire (I) suivie d'un plateau de la charge (force) (II) et en fin une phase de densification (III) où la charge augmente considérablement avec le déplacement.



**Figure III.1** Courbe type Charge-déplacement d'une mousse conventionnelle (originale).

Ce comportement en trois stades est en bonne concordance aussi avec les travaux de Goussri [GOU-04].

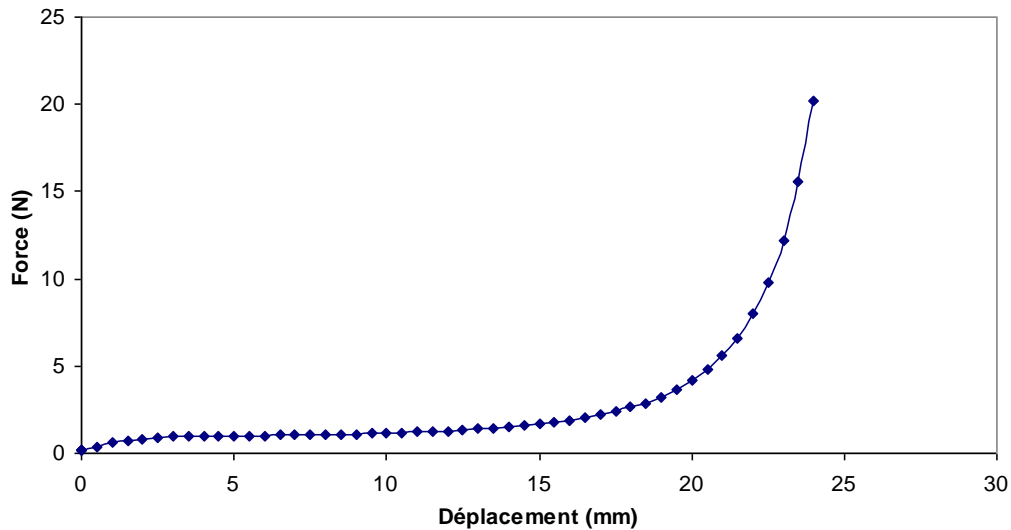


**Figure III.2** Schéma d'une courbe type de compression pour les mousses de polyuréthane [GOU-04].

### III.2.2 Comportement en compression statique de la mousse polyuréthane transformé

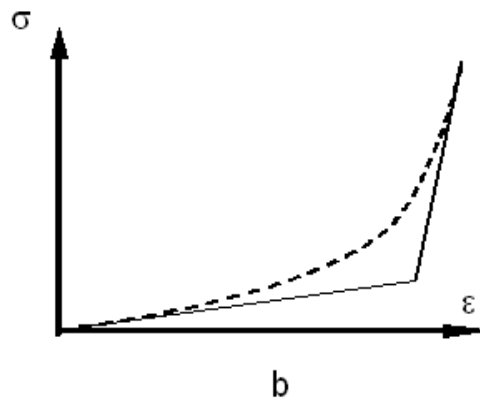
La figure III.3 représente l'évolution de la force appliquée en fonction du déplacement de la mousse polyuréthane à cellules ouvertes transformé en auxétique avec un taux de compression donnée. L'allure de la courbe force-déplacement d'une mousse transformé est en

générale en deux phase seulement est évoluée selon une loi exponentielle au lieu de trois phases dans le cas d'une mousse conventionnelle (originale). De plus pour une même valeur de déplacement (24 mm) on obtient un accroissement remarquable de la force.



**Figure III.3** Courbe type Charge-Déplacement d'une mousse auxétique.

Cependant l'évolution de comportement mécanique concernant les mousses auxétiques (coefficient de Poisson négatif) se présente par un comportement exponentiel. Dans les travaux de VAZ et al. Il a été décidé que ce comportement est modélisé par une courbe bilinéaire (Figure III.4) [VAZ-01].



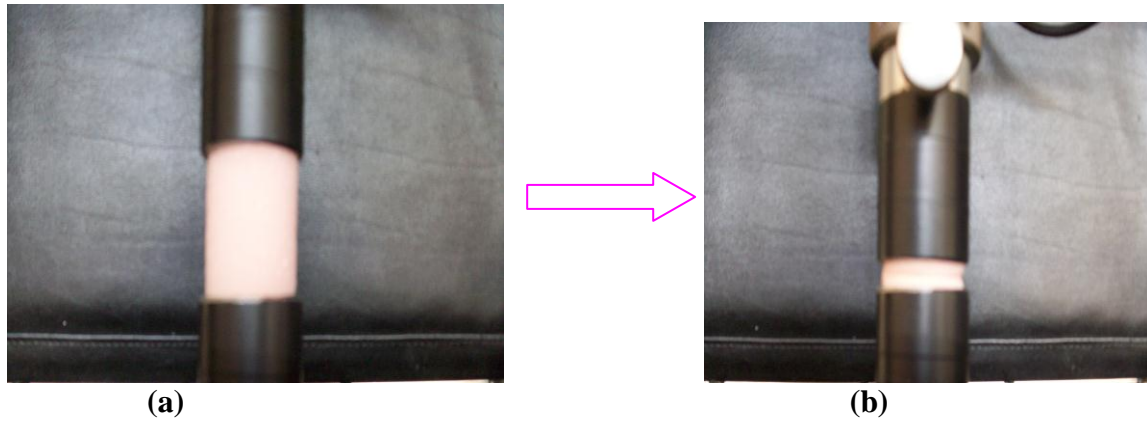
**Figure III.4** Courbe Contrainte-Déformation pour la mousse auxétique.

### III.3 Compression de la première série

#### III.3.1 Compression statique de la mousse rose

##### A) Mousse rose originale

La figure III.5 illustre un échantillon placé entre les deux plateaux montés sur la machine des essais, expliquant comment on effectue un essai de compression statique.

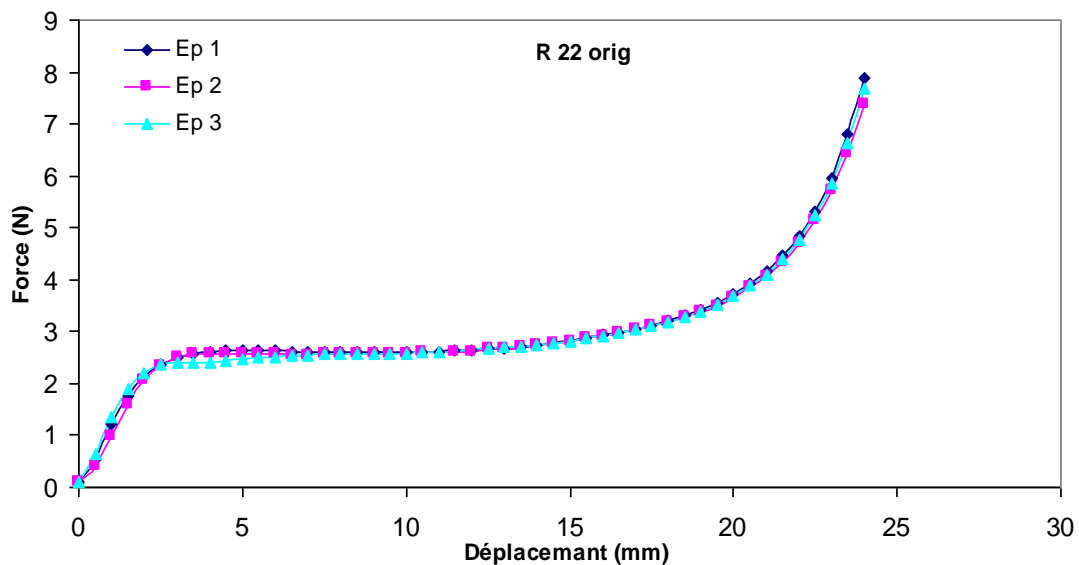


(a)

(b)

**Figure III.5** Echantillon sous compression statique.  
 (a) avant chargement (b) après compression de 80 %

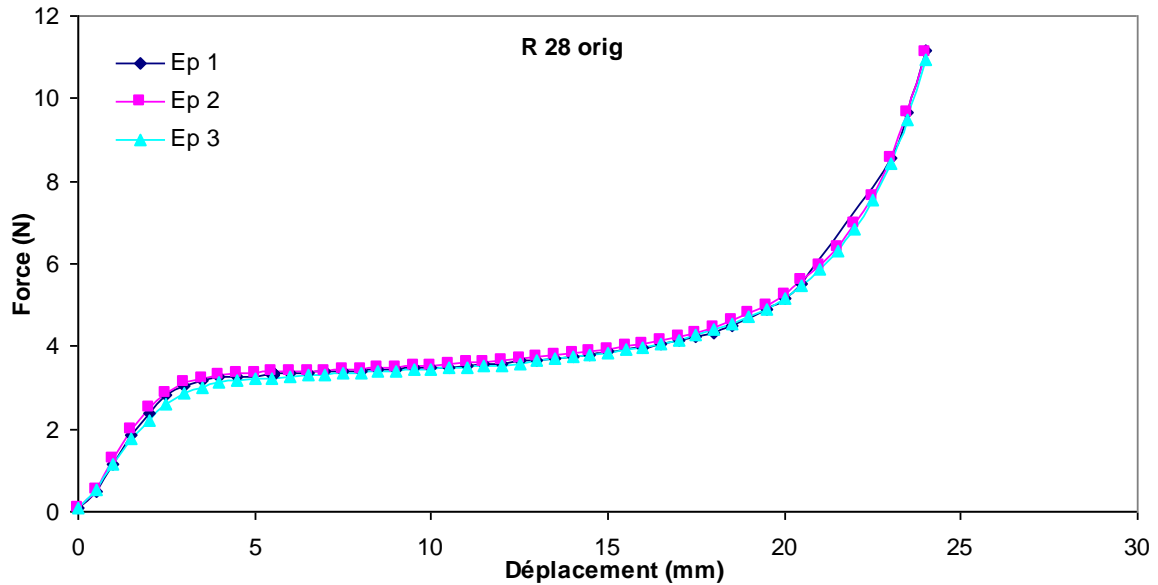
La figure III.6 représente le comportement force-déplacement de la mousse polyuréthane rose originale de diamètre 22 mm, qui se compose de trois phases. Une légère dispersion est observée entre les trois éprouvettes effectuées dans les mêmes conditions de fabrication et de tests. Ceci est en bonne concordance avec les travaux de Bezazi et Scarpa [BEZ-07] sauf que la force maximale obtenue par ces derniers est plus du double pour le même taux de chargement c'est-à-dire 80 %.



**Figure III.6** Force-déplacement de la mousse R 22 originale.

La figure III.7 montre un comportement force-déplacement de la mousse rose originale de diamètre de 28 mm, il est similaire à ce montré dans la figure III.6, mais avec une différence dans la force, où la force appliquée sur la mousse de diamètre de 28 mm est légèrement supérieure à celle de même type de mousse mais de diamètre 22 mm.



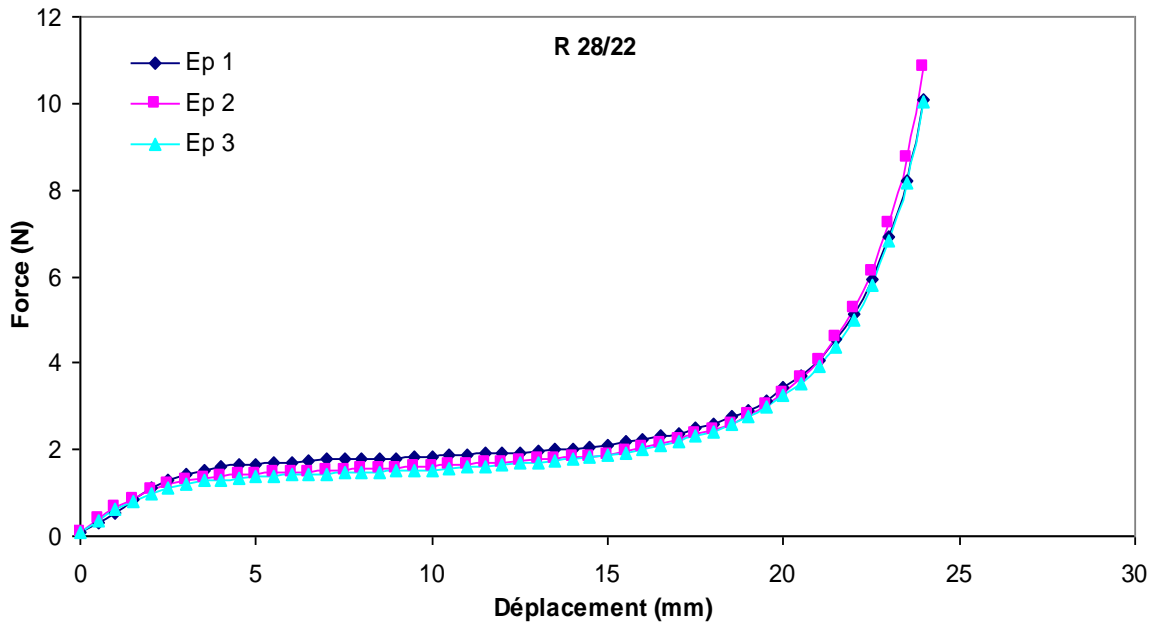


**Figure III.7** Force-déplacement de la mousse R 28 originale.

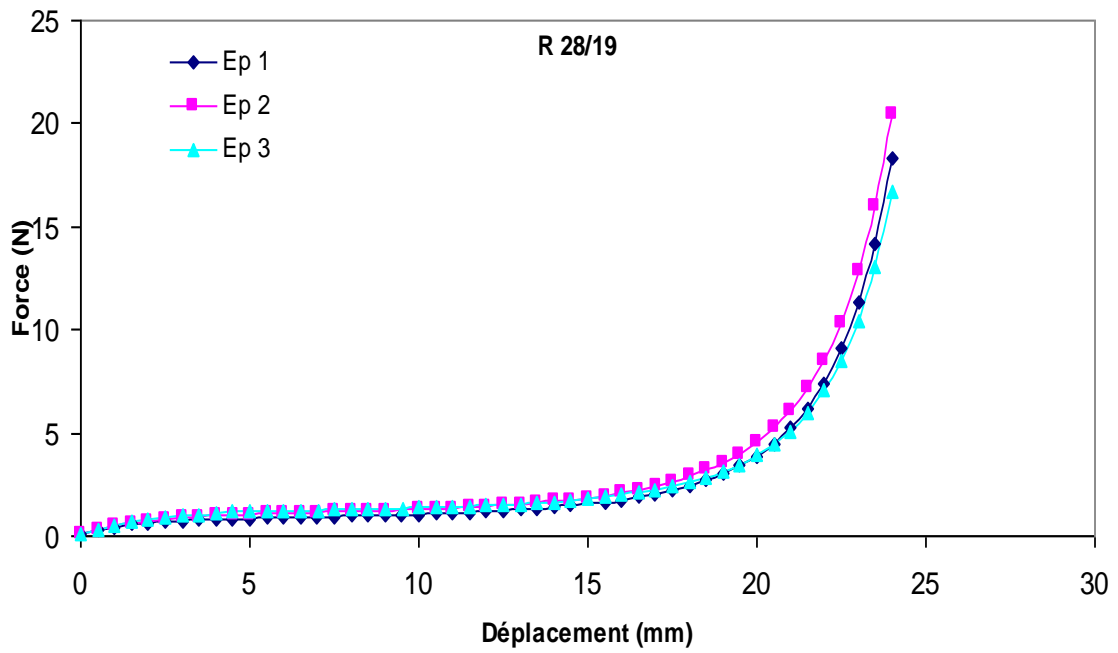
### B) Mousse rose transformée

La transformation de la mousse rose, ayant un diamètre de 28 mm, par compression radiale et axiale (appelé niveau 2) dans des tubes de diamètre 22 mm (R 28/22). Le comportement force-déplacement de R28/22 présenté dans la Figure III.8 possède un comportement en trois phases similaire à celui des mousses conventionnelles. Tandis que les mousses transformées (R28/19) dans des tubes de diamètres de 19 mm ; c'est-à-dire le niveau 3 (Figure III.9) permet de donner des courbes avec comportement exponentiel est seulement en deux phases. Ce comportement est enregistré par d'autre auteur [BEZ-07], [MAT-10] et [BIA-10] (Figure III.10).

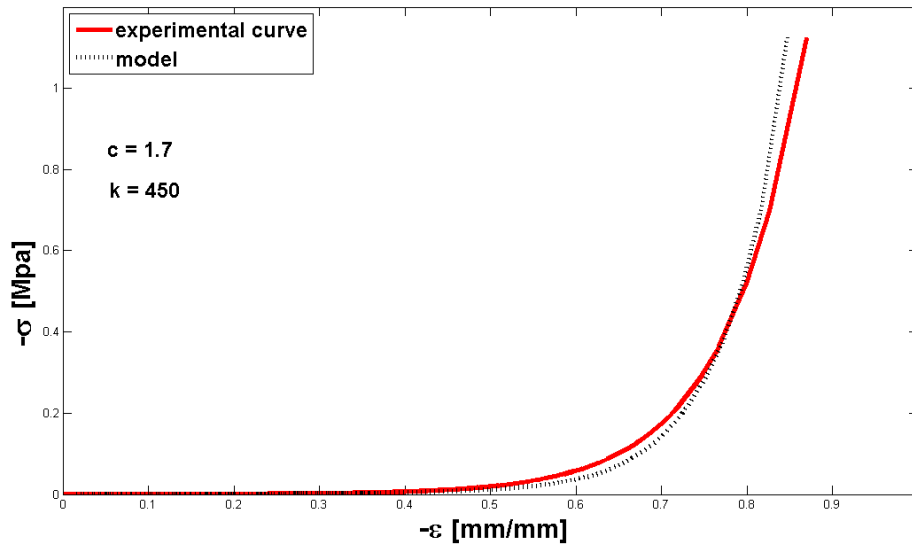
On observe une superposition des courbes force-déplacement avec une augmentation de la force appliquée de l'ordre de 11 N pour le niveau 2 par contre la force est de 22 N concernant le niveau 3, ici on peut conclure que la force augmente considérablement avec le taux de compression de transformation.



**Figure III.8** Force-déplacement de la mousse rose transformée R 28/22.

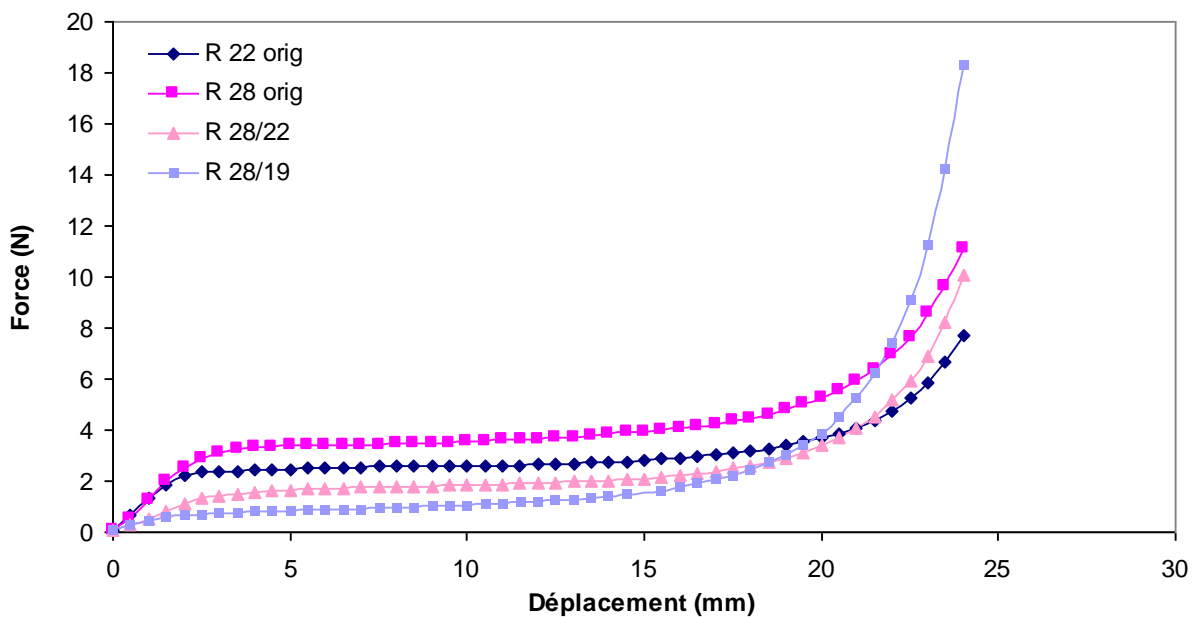


**Figure III.9** Force-déplacement de la mousse rose transformée R 28/19.



**Figure III.10** Courbe contrainte-déformation de mousse auxétique [BIA 10].

Pour plus de clarté nous avons regroupé une courbe représentative par type de mousse tel que la mousse rose à l'état conventionnel (originale) pour les deux diamètres 28 mm et 22 mm et ceux transformée par les deux niveaux de compression 2 et 3 (Figure III.11). On remarque bien que la courbe représentative force-déplacement du niveau 3 de la mousse R28/19 montre une augmentation considérable, par rapport aux autres types, de la force maximale obtenue après un chargement de 80 %.



**Figure III.11** Force-déplacement de la mousse rose originale et transformée avec différents niveaux de compression.

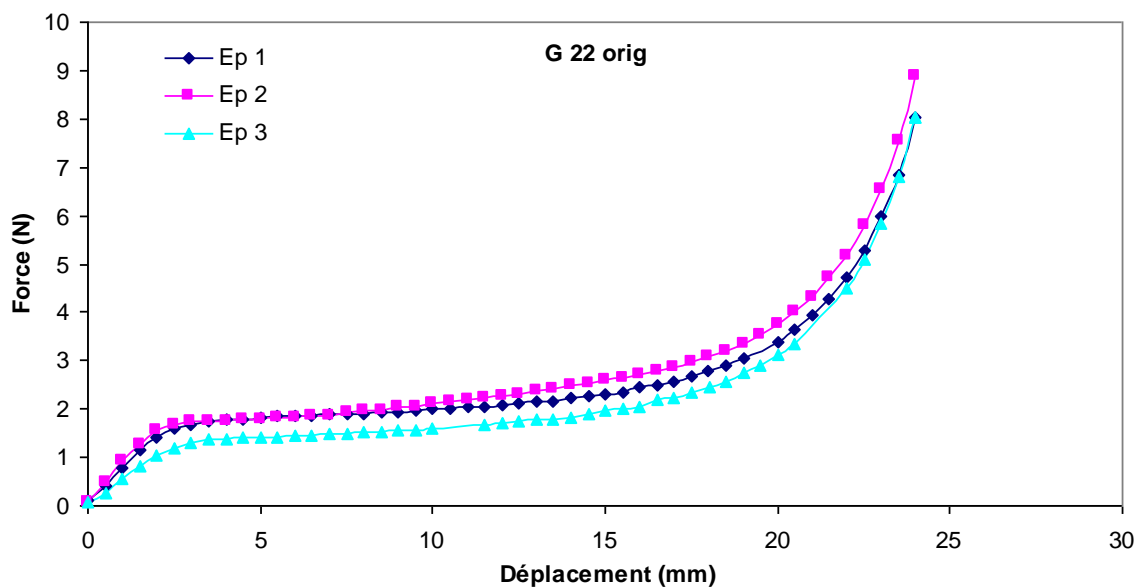
**Tableau III.2** Valeurs obtenus expérimentalement de la force de compression maximale de la mousse rose originale et transformés.

Type de mousse	Force maximale à 80% de compression
R 22 originale	$7,63 \pm 0,25$
R 28 originale	$11,04 \pm 0,08$
R 28/22 niveau 2	$10,43 \pm 0,38$
R 28/19 niveau 3	$18,57 \pm 1,85$

### III.3.1.2 Compression statique de la mousse grise

#### A) mousse grise originale

La mousse polyuréthane grise à cellules ouvertes originale, qui est 1,56 fois plus dense que la mousse rose, possède le même comportement en trois phases que cette dernière, élastique, plateau de charge et densification (Figure III.12). Le comportement force-déplacement de cette mousse grise de diamètre de 22 mm, illustre des dispersions beaucoup plus importantes que ceux enregistrer dans le cas de la même mousse mais de diamètre 28 mm (Figure III.13). En d'autres termes, la mousse grise originale de diamètre 28 mm, possède une faible dispersion donc les essais sont plus ou moins répétitifs, de plus elle possède une force égale à 13 N, ce pendant pour la mousse de diamètre 22 mm la force varie entre 7,5 et 9 N.

**Figure III.12** Force-déplacement de la mousse G 22 originale.

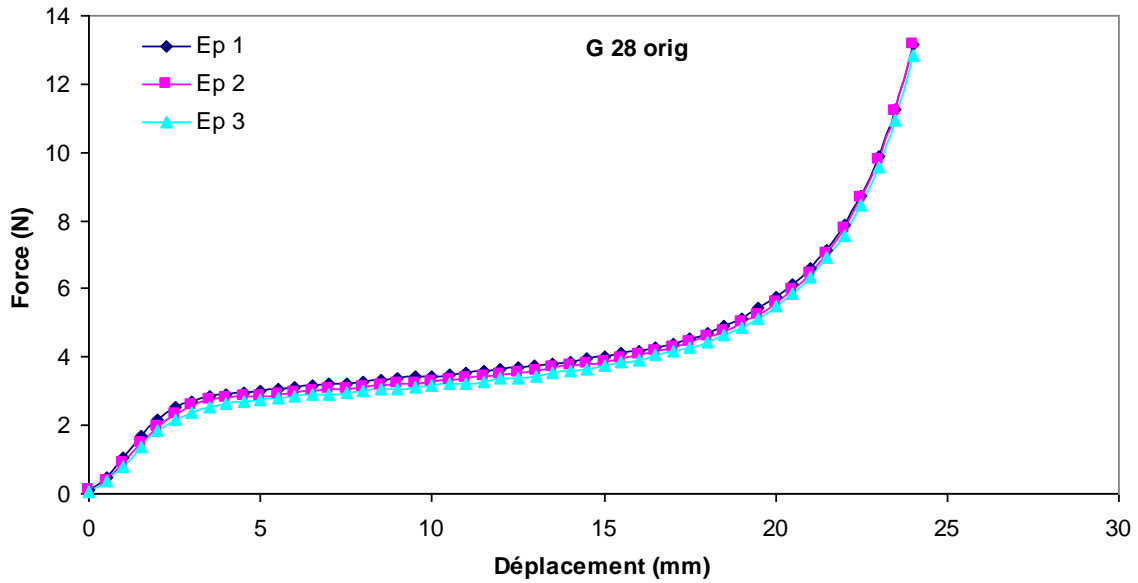


Figure III.13 Force-déplacement de la mousse G 28 originale.

### B) mousse grise transformé

La mousse polyuréthane grise à cellules ouvertes de diamètre de 28 mm est transformé par compression radiale est axiale au niveau 2 (G 28/22) et au niveau 3 (G 28/19) ; et leurs comportement force-déplacement est illustré respectivement dans les figures III.14 et III.15, on remarque que ce dernier se compose en trois phases donc similaire à celui des mousses conventionnelles et les courbes sont assez proches. Ce comportement est enregistré par d'autres auteurs [FRI-10].

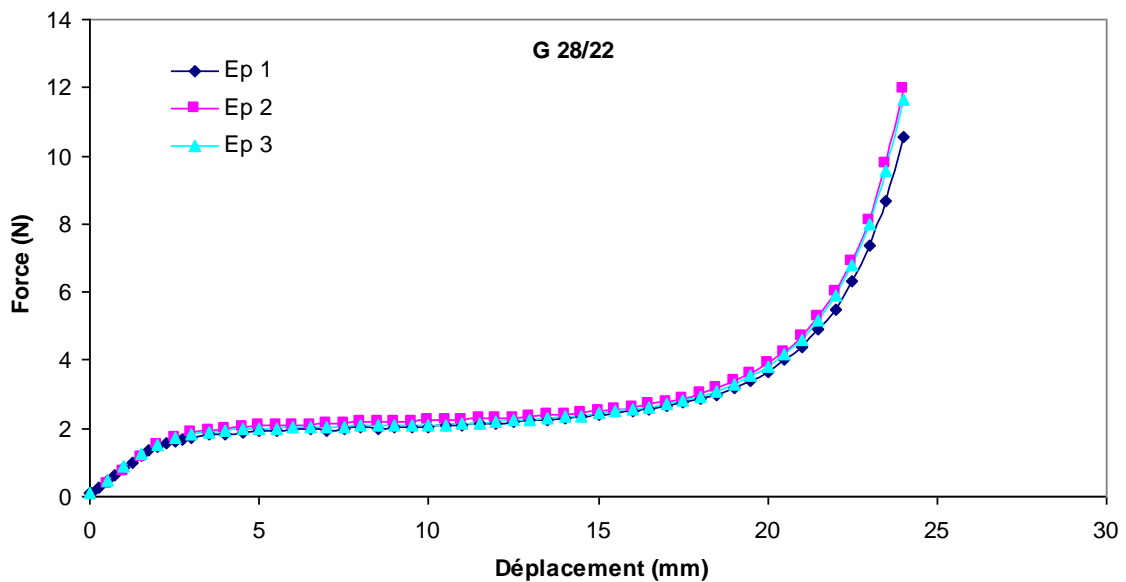
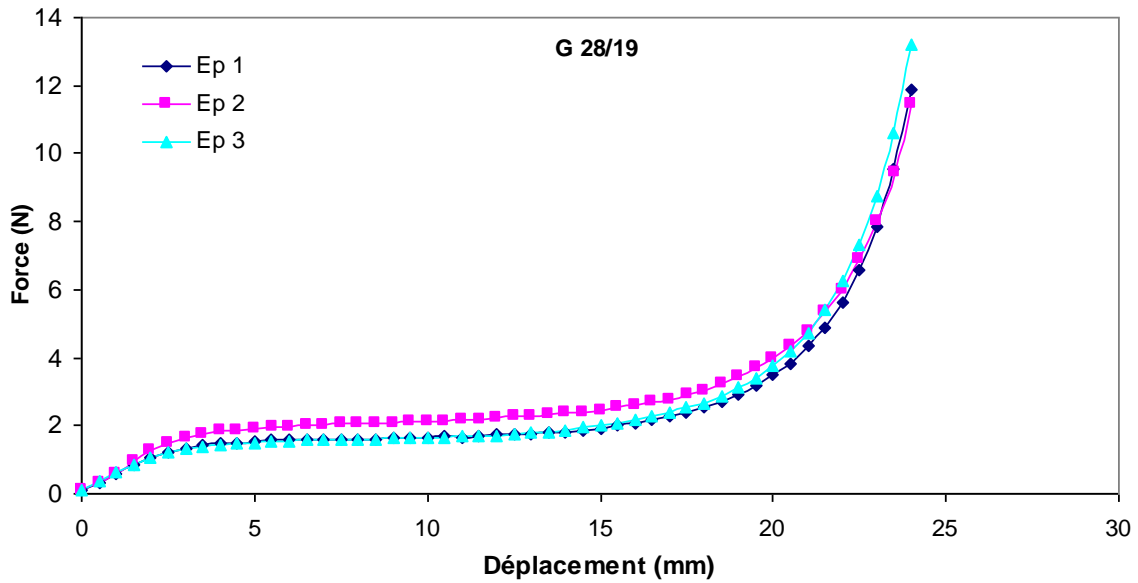
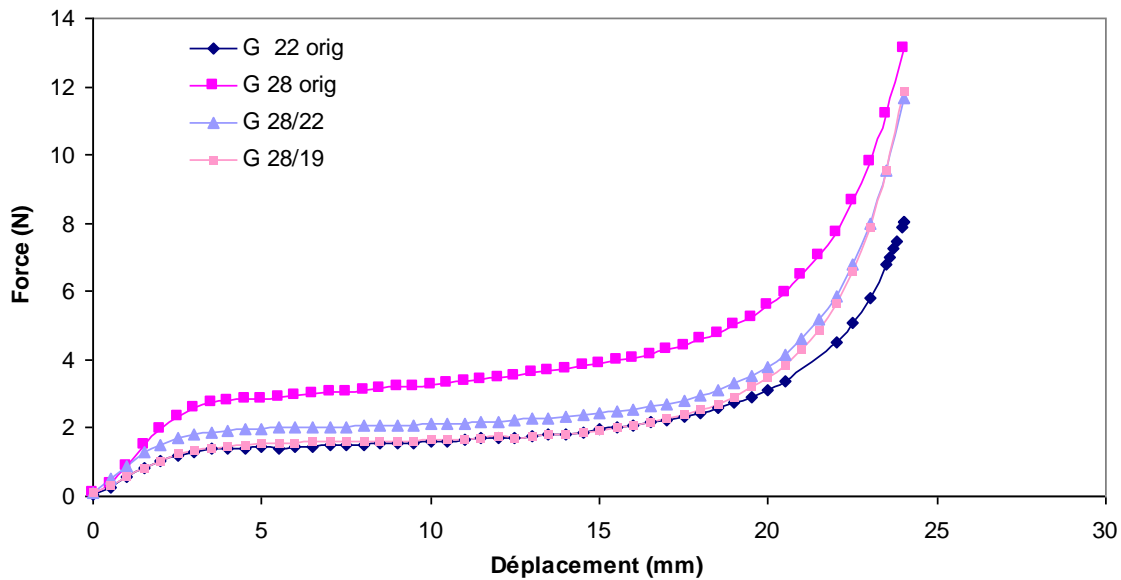


Figure III.14 Force-déplacement de la mousse grise transformée G 28/22.



**Figure III.15** Force-déplacement de la mousse grise transformée G 28/19.

Dans la figure III.16 on remarque bien que la courbe représentative de la mousse grise montre une dispersion dans la force d'un niveau à un autre



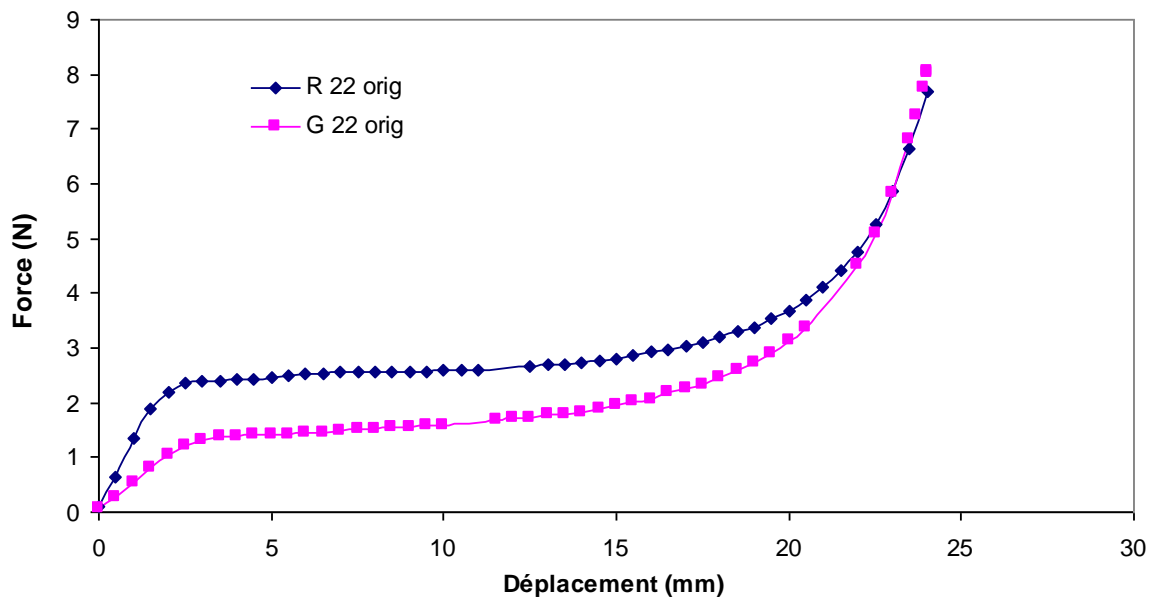
**Figure III.16** Force-déplacement de la mousse grise transformée avec différents niveaux de compression.

**Tableau III.3** Valeurs obtenus expérimentalement de la force de compression maximale de la mousse grise originale et transformés

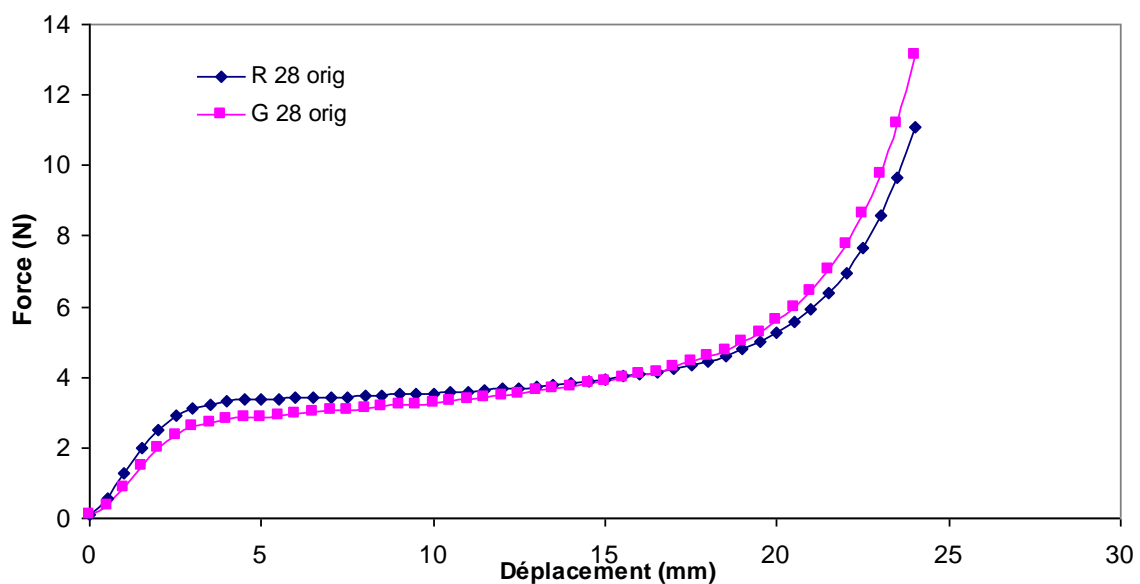
Type de mousse	Force maximale à 80%de compression
G 22 originale	$8,46 \pm 0,42$
G 28 originale	$12,97 \pm 0,14$
G 28/22 niveau 2	$11,26 \pm 0,70$
G 28/19 niveau 3	$12,32 \pm 0,87$

### III.3.1.3 Comparaison entre la compression statique de la mousse rose et la mousse grise

Pour bien expliquer le comportement mécanique de la mousse rose et la mousse grise et percevoir la différence entre elles, on a tracé des courbes force-déplacement pour quatre type c.à.d. pour les cas conventionnels diamètre de 22 et 28 mm plus les transformés par deux niveaux (2 et 3) comme il est illustré dans les figures respectivement (Figure III 17),(Figure III 18), (Figure III 19) et (Figure III 20).ce qui est observé s'est que la force enregistrée concernant la mousse grise est généralement supérieure à celle de la mousse rose.

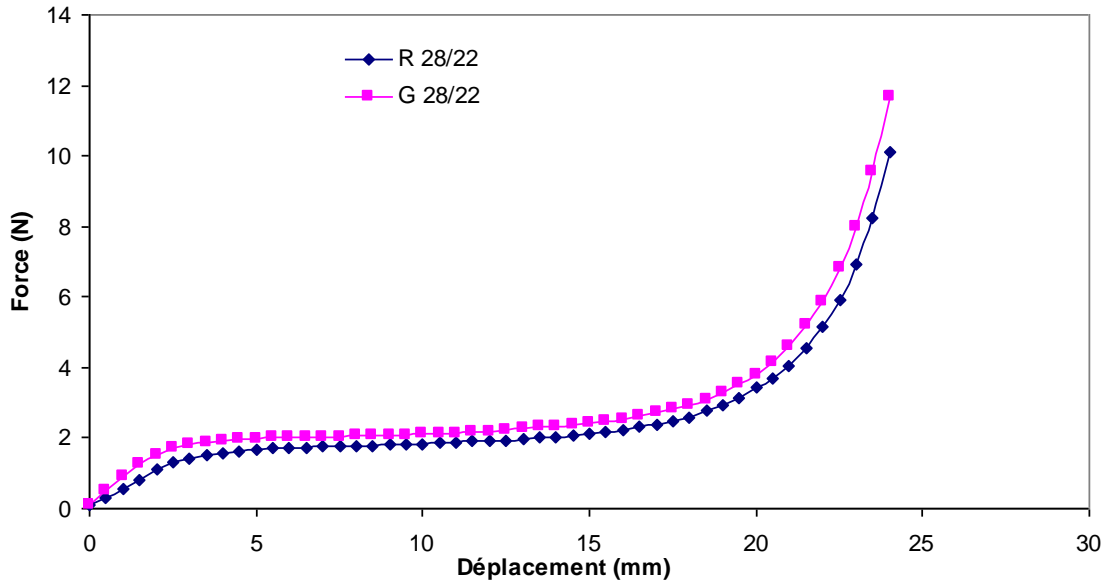


**Figure III.17** Force-déplacement des mousses rose et grise originales R 22 originales et G 22 originales.

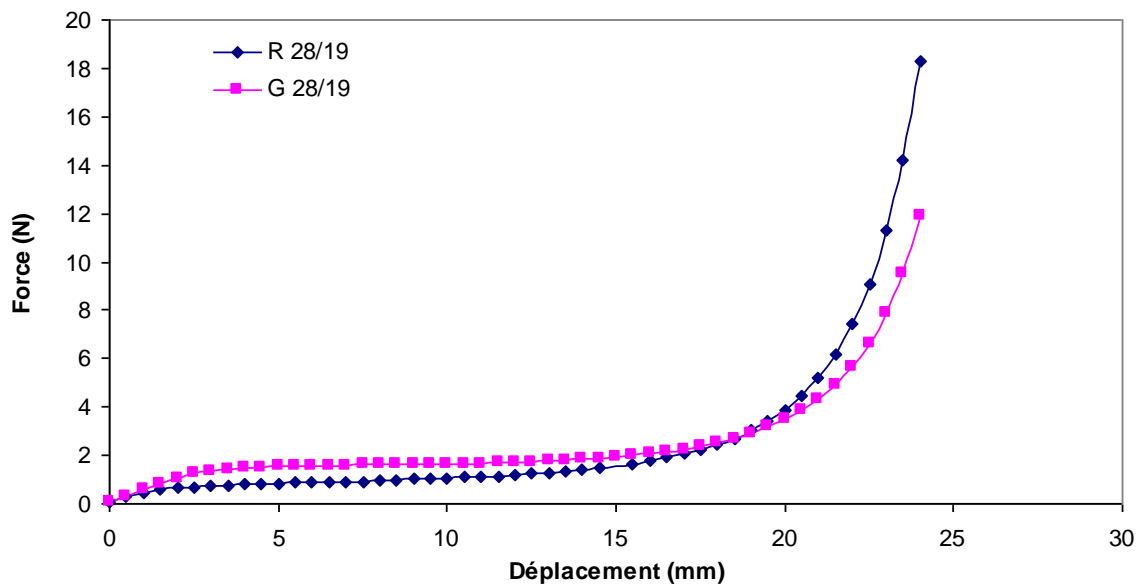


**Figure III.18** Force-déplacement des mousses rose et grise originales R 28 originales et G 28 originales.

Le comportement a subi une même allure, une différence de 2 N et noté pour la mousse grise par rapport au mousse rose dans le niveau 2 (Figures III.19). Par contre, nous avons trouvé l'inverse concernant le niveau 3 d'une variation de 7 N (Figure III 20).



**Figure III.19** Force-déplacement des mousses rose et grise transformées R 28/22 et G 28/22.



**Figure III.20** Courbe force-déplacement des mousses rose et grise transformées R 28/19 et G 28/19.

### III.3.2 Compression statique de la deuxième série (découpe dans le sens Horizontal)

Dans cette deuxième série les éprouvettes sont découpées dans le sens horizontal des blocs de mousses rose et grise.



### III.3.2.1 Compression statique de la mousse rose

La figure III.21 représente le comportement mécanique en trois phases sous chargement en compression statique des mousses polyuréthane rose à cellules ouvertes transformées par les niveaux de compression 2 et 3. Les courbes de comportement sont d'une manière générale assez proches, alors que la dispersion dans la force maximale est plus importante. Ceci est valable pour les niveaux de compression 2 et 3 représenté respectivement dans les Figures III.21 et III.22.

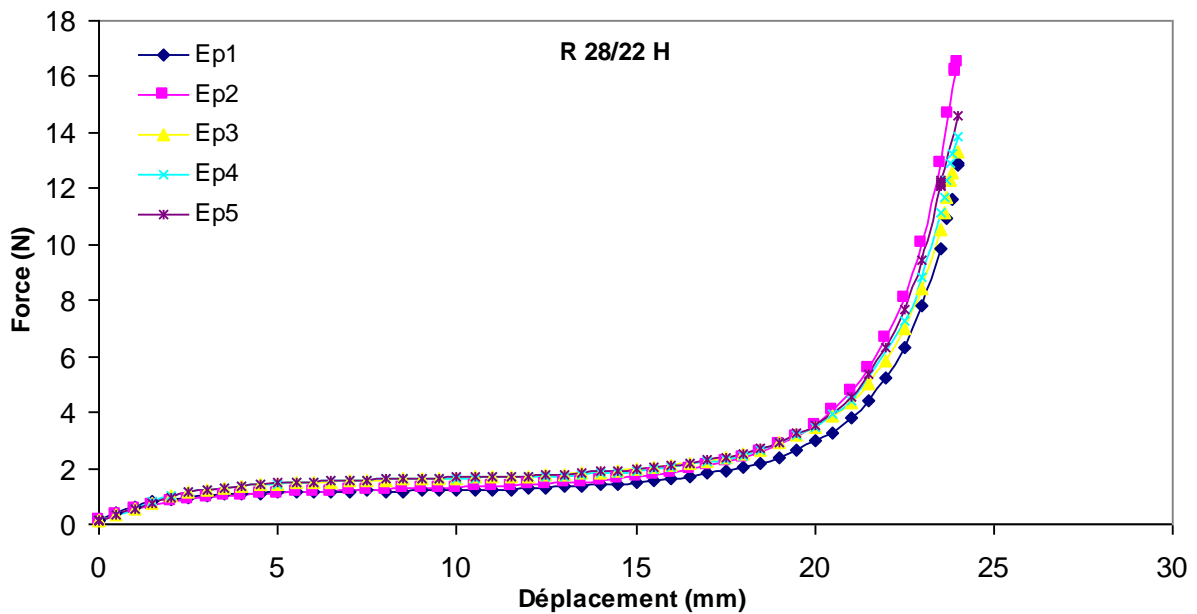


Figure III.21 Force-déplacement de la mousse rose transformée R 28/22.

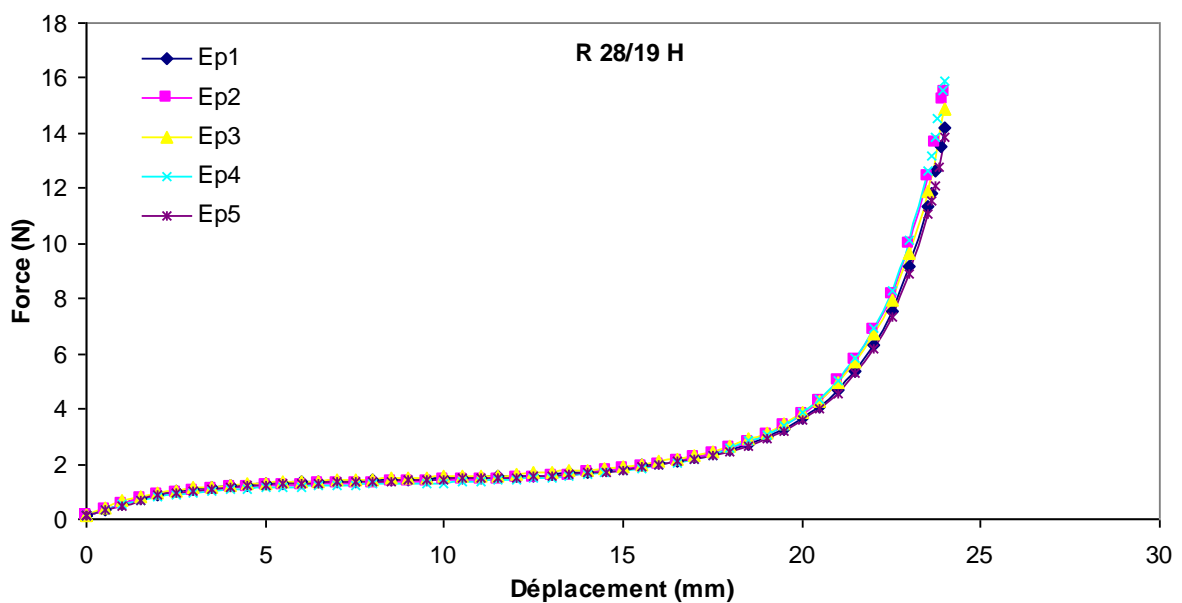
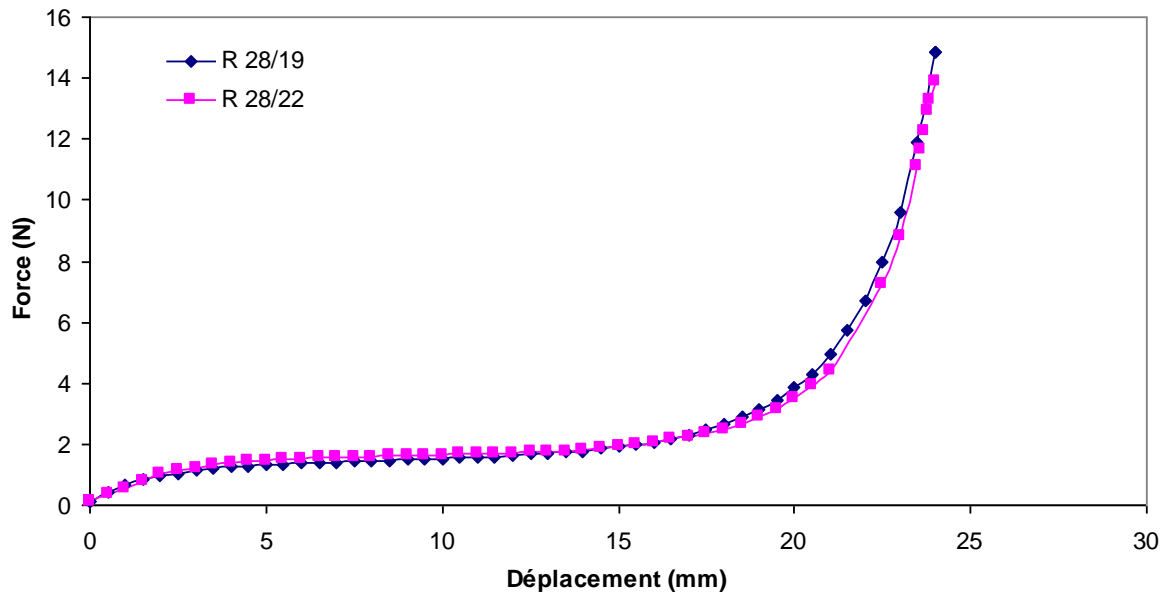


Figure III.22 Force-déplacement de la mousse rose transformée R 28/19.

La comparaison du comportement force-déplacement des deux niveaux de chargement (Figure III.23) montre une similitude avec une légère augmentation de la force maximale pour le niveau 3 (voir tableau III.4).



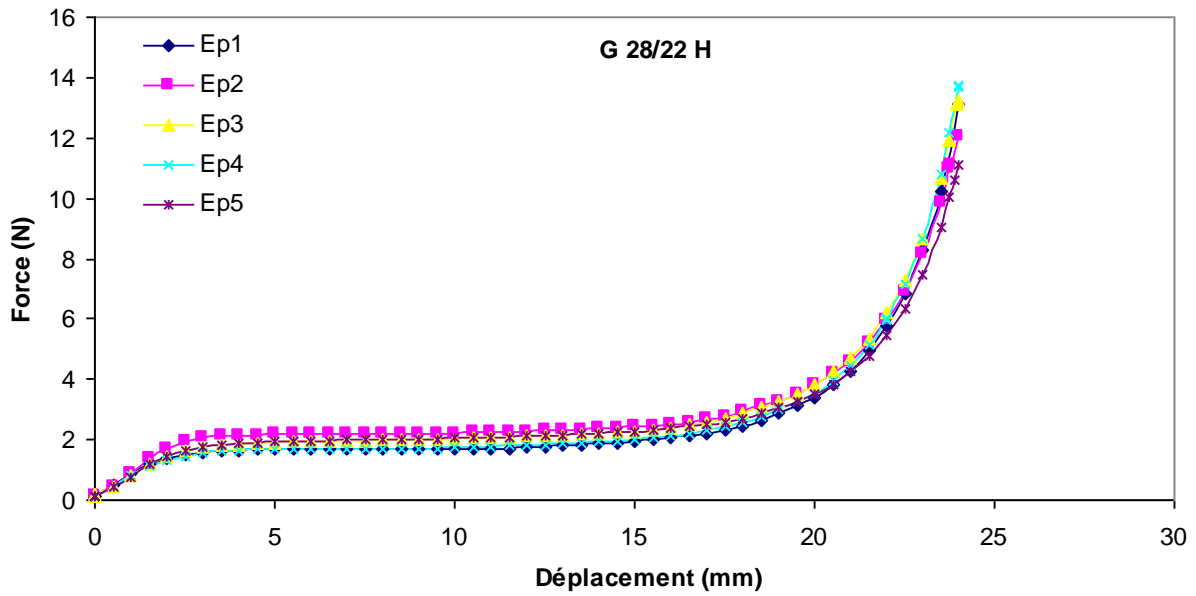
**Figure III.23** Force-déplacement de la mousse rose transformée avec différents niveaux de compression.

**Tableau III.4** Force maximale obtenue expérimentalement de la mousse R 28/22.et R 28/19.

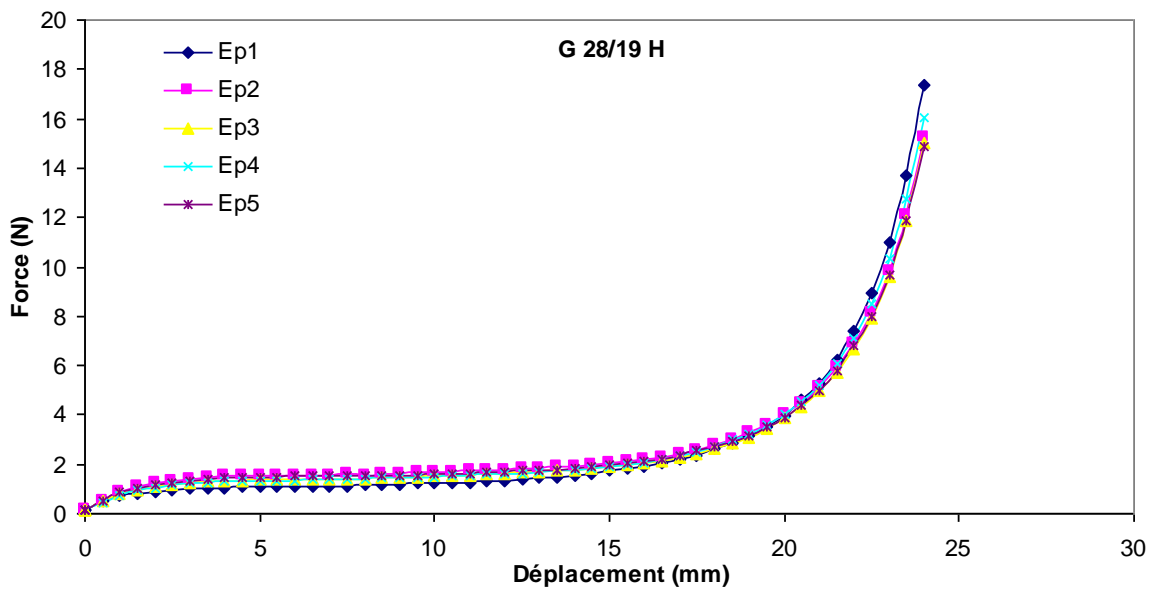
Type de mousse	Force maximale à 80% de compression
R 28/22 niveau 2	$14,7 \pm 1,8$
R 28/19 niveau 3	$15,0 \pm 0,9$

### III.3.2.2 Compression statique de la mousse grise

La figure III.24 représente le comportement force-déplacement en compression statique des mousses polyuréthane grise transformées par les deux niveaux de compression 2 et 3. Les mêmes remarques que ceux de la mousse rose sont valables pour la mousse grise, c'est-à-dire faible dispersion dans le comportement, alors qu'elle est plus importante pour la force maximale aussi bien pour le niveau 2 (Figure III.24) que pour le niveau 3 (Figure III.25).

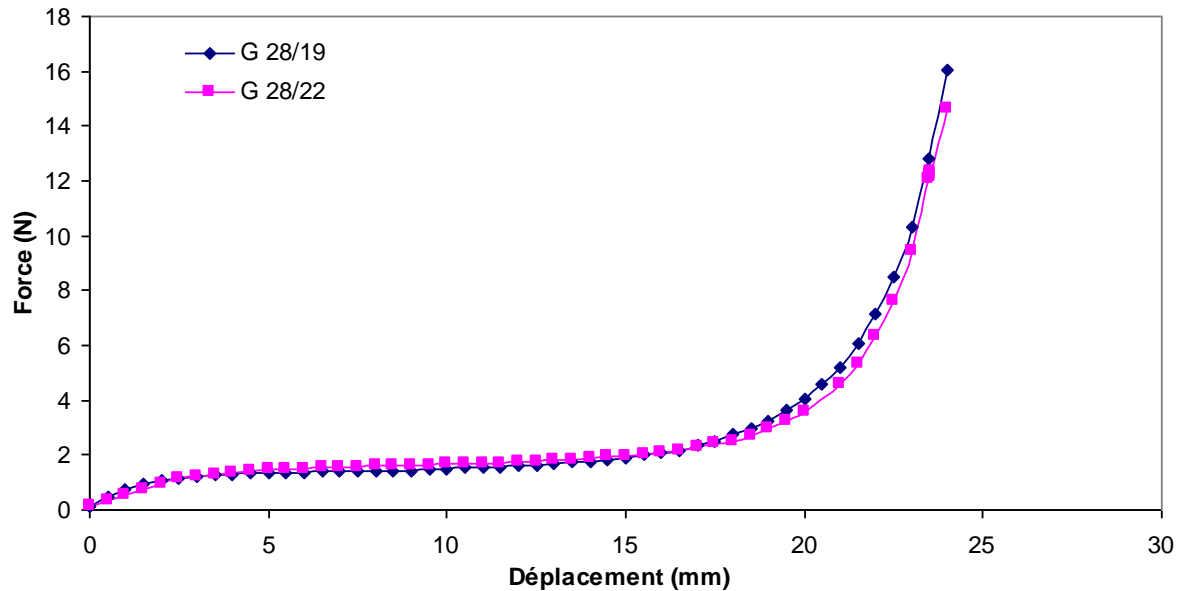


**Figure III.24** Force-déplacement de la mousse grise transformée R 28/22.



**Figure III.25** Force-déplacement de la mousse grise transformée R 28/19.

La comparaison du comportement force-déplacement du niveau 2 et 3 (Figure III.26) révèle aussi que le comportement est très similaire avec une force maximale plus importante pour le niveau 3 (Tableau III.5).



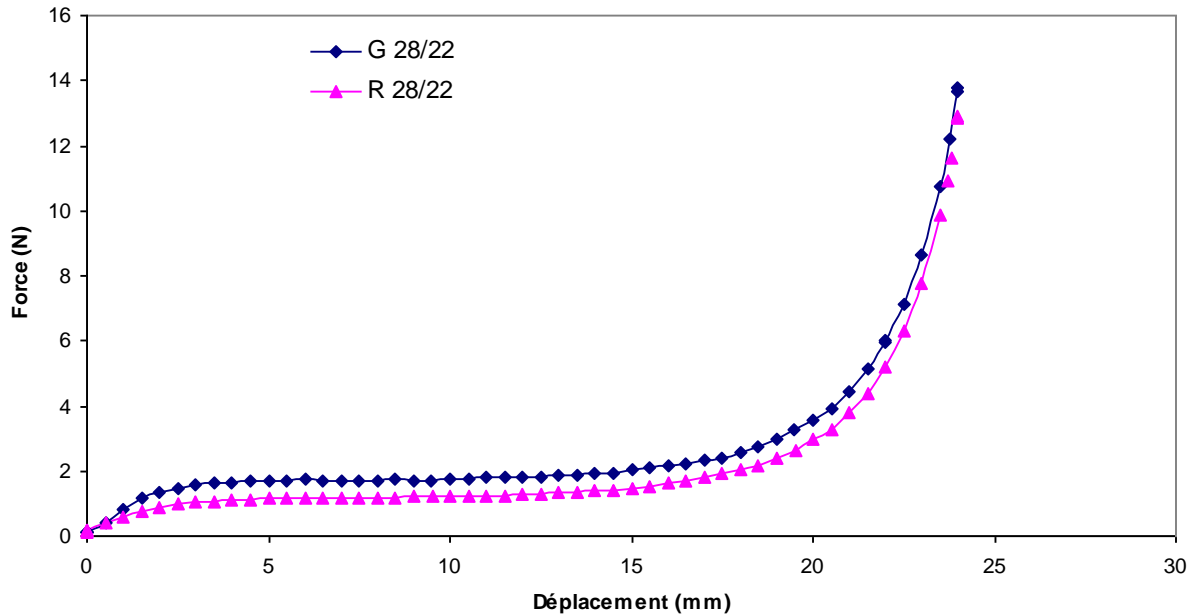
**Figure III.26** Force-déplacement de la mousse grise transformée avec différents niveaux de compression.

**Tableau III.5** mesure de la force maximale de la mousse G 28/22. et G 28/19.

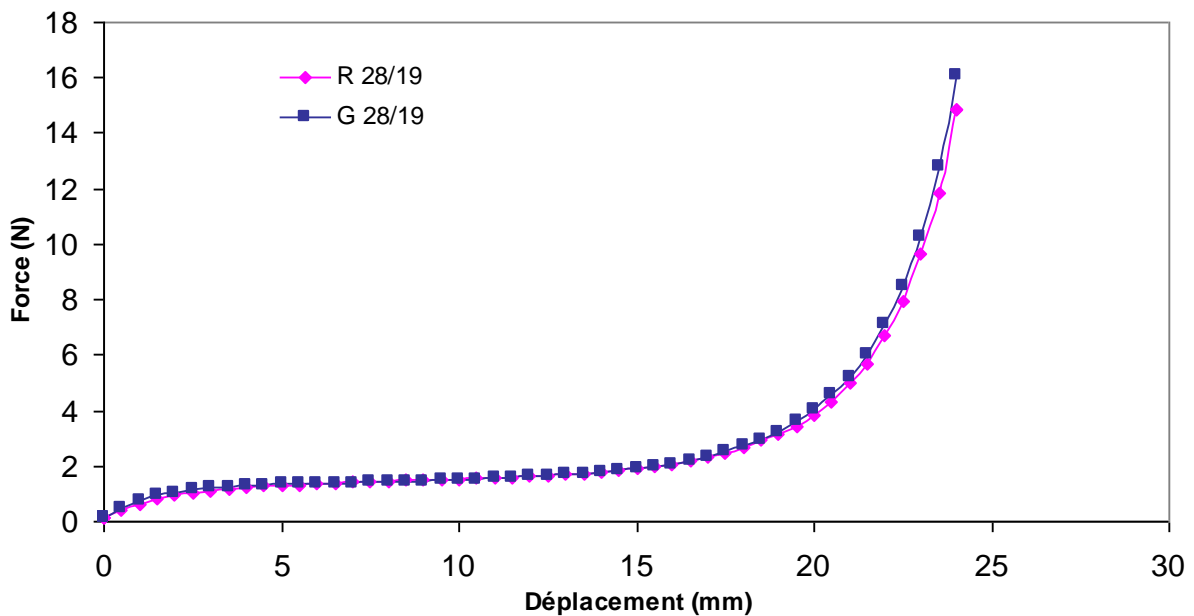
Type de mousse	Force maximale à 80%de compression
G 28/22 niveau 2	12,43 ± 1,33
G 28/19 niveau 3	16,14 ± 1,24

### III.3.2.3 Comparaison entre la compression statique de la mousse rose et la mousse grise

La comparaison du comportement charge-déplacement de la mousse grise avec la rose pour le niveau 2 et 3 sont présentés respectivement dans les figures III.27 et III.28. Ce comportement est pratiquement le même pour les deux mousses dans le cas du niveau 3, alors que la force maximale est plus importante dans le cas de la mousse grise. Tandis que, la dispersion entre la mousse grise et rose dans le comportement (force-déplacement) est plus importante dans le cas du niveau 2 et la force maximale dans ce cas est enregistrée plutôt pour la mousse rose.



**Figure III.27** Force-déplacement des mousses rose et grise transformées R 28/22 et G 28/22.



**Figure III.28** Force-déplacement des mousses rose et grise transformées R 28/19 et G 28/19.

### III.3.3 Compression statique de troisième série (découpe dans le sens Vertical)

Dans cette troisième série les éprouvettes sont découpées dans le sens vertical des blocs de mousses rose et grise.

### III.3.3.1 compression statique de la mousse rose

Les figures III.29 et III.30 représentent le comportement force-déplacement sous chargement en compression statique de la mousse rose transformée par les niveaux de compression 2 et 3 respectivement. Une faible dispersion de ce comportement est enregistrée pour la mousse transformée par le niveau 2 (R 28/22), alors que pour le niveau 3 et pour des déplacements plus important que 20 mm; elle devient plus grande. Il est important de signalé aussi que les dispersions dans la force maximale sont assez importantes pour les deux niveaux de transformation et que la force maximale est obtenue dans le cas du niveau 3 (R 28/19).

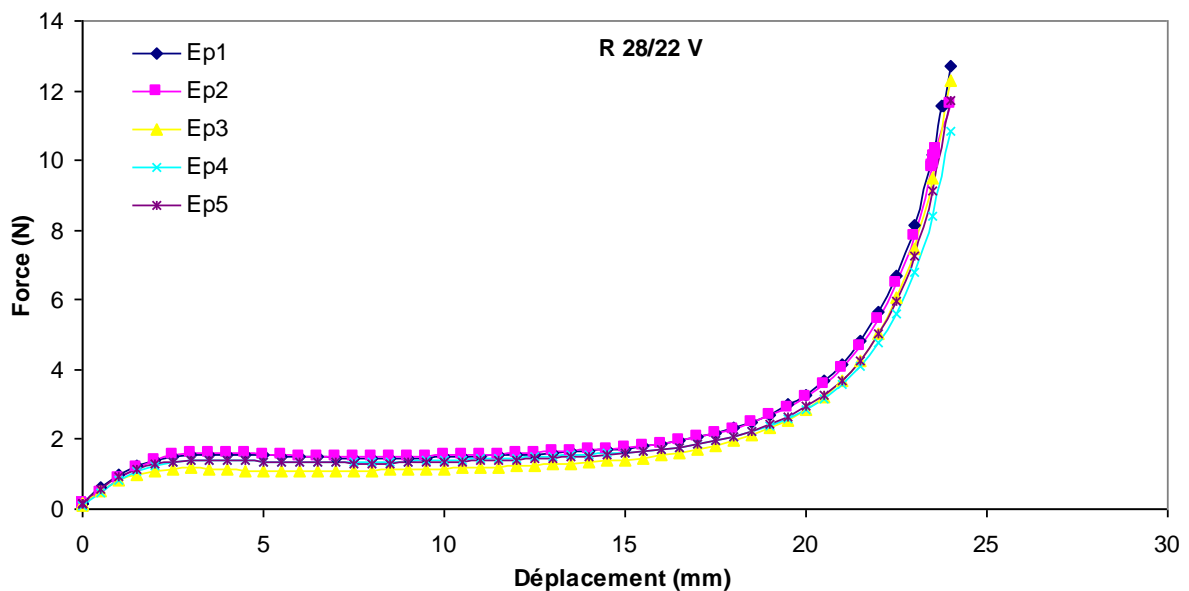


Figure III.29 Force-déplacement de la mousse rose transformée R 28/22.

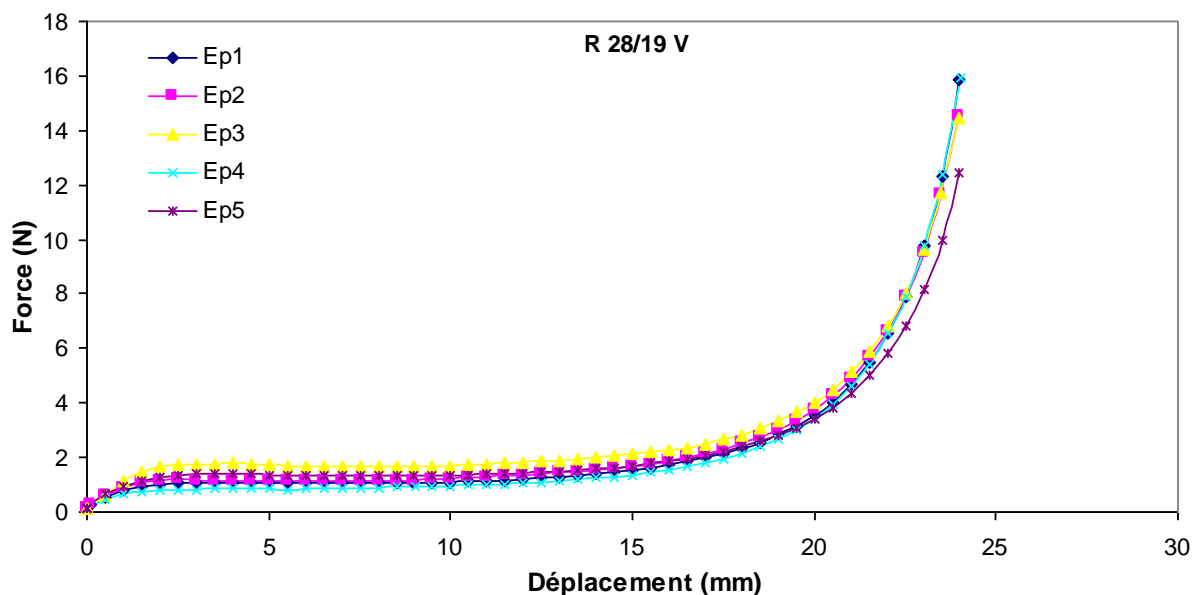
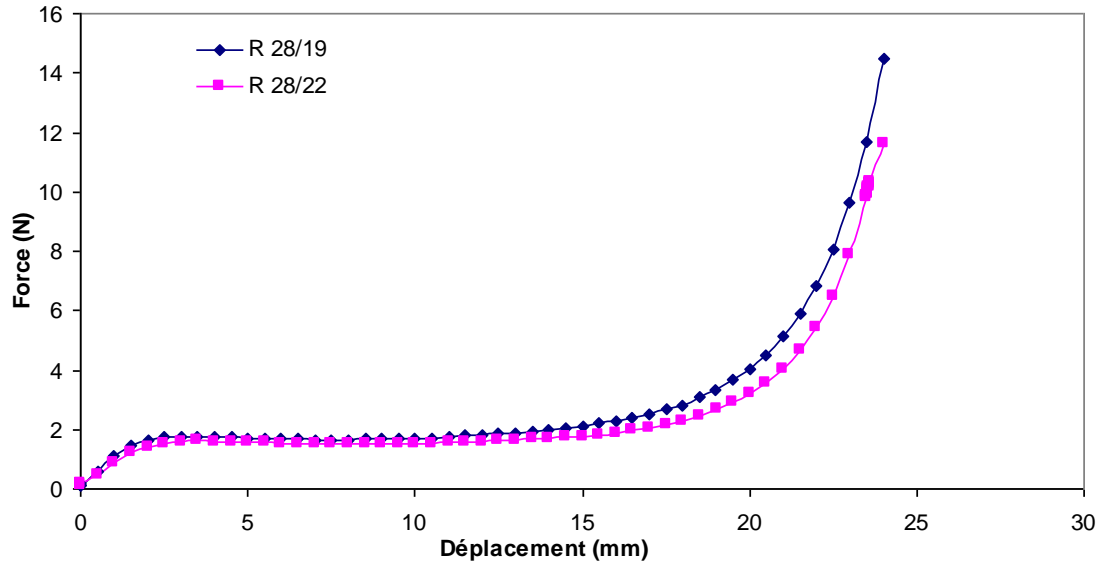


Figure III.30 Force-déplacement de la mousse rose transformée R 28/19.

La comparaison des courbes types (Figure III.31) des mousses transformés R 28/22 et R 28/19 montre une similitude dans le comportement force-déplacement jusqu'à un déplacement d'environ 12 mm correspondant à un taux de compression de 40 %. Le comportement force-déplacement de R 28/19 est meilleur et la force maximale obtenue à une compression de 80% est plus grande que celle de R 28/22 (Tableau III.6).



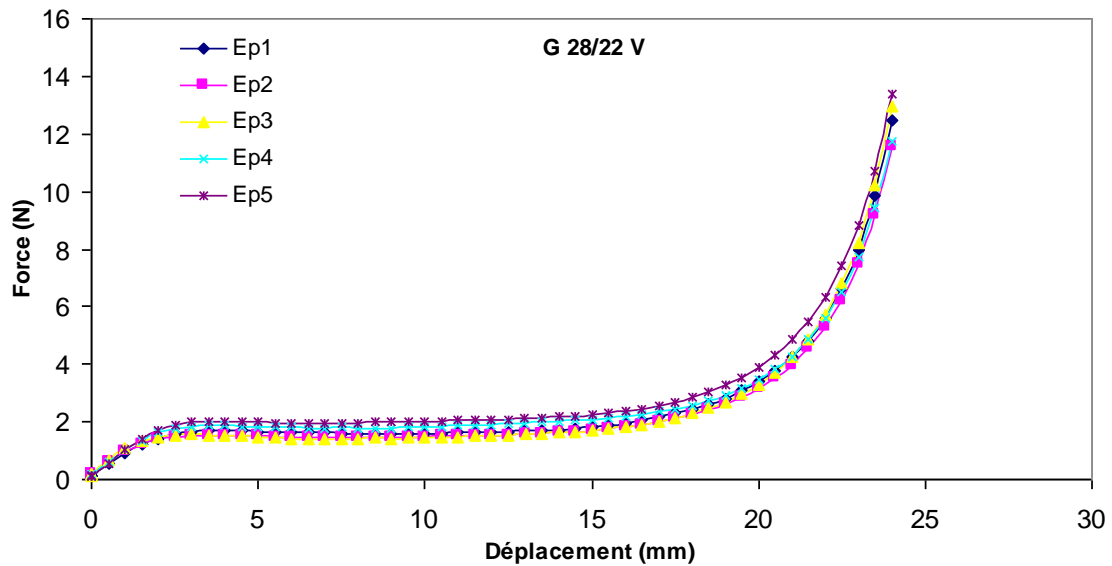
**Figure III.31** Force-déplacement de la mousse rose transformée avec différents niveaux de compression.

**Tableau III.6** Mesure de la force maximale de la mousse R 28/22.et R 28/19.

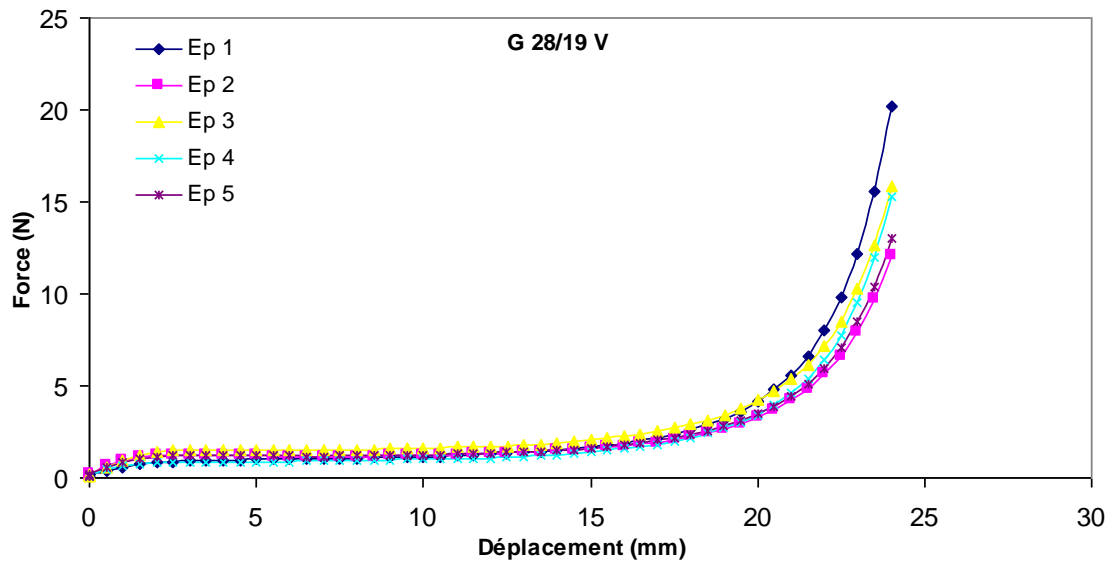
Type de mousse	Force maximale à 80% de compression
R 28/22 niveau 2	11,75 ± 0,92
R 28/19 niveau 3	14,17 ± 1,74

### III.3.3.2 Compression statique de la mousse grise

Un comportement force/déplacement en trois stades est enregistré dans le cas de la compression statique de la mousse grise transformée par les niveaux de compression 2 et 3 ; ce comportement est similaire au comportement des mousses conventionnelles. Une bonne répétitivité les essais de la mousse transformé par le deuxième niveau (R 28/22) ou la force maximale moyenne est de 14 N (Figure III.32). Par contre, dans le cas du niveau 3 (figure III 33), les dispersions sont très faible jusqu'à un déplacement de 20 mm et au-delà elles deviennent plus importantes notamment dans la force maximale enregistrée pour un déplacement de 24 mm.



**Figure III.32** Force-déplacement de la mousse grise transformée R 28/22.



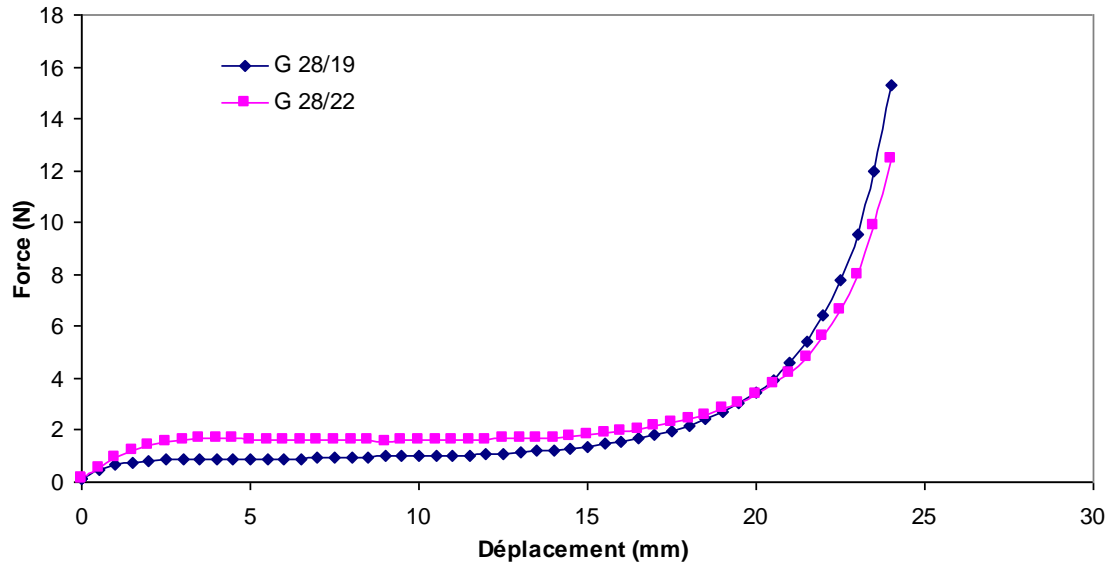
**Figure III.33** Force-déplacement de la mousse grise transformée R 28/19.

Il ressort de la comparaison du comportement force-déplacement (figure III.34) de la mousse grise transformé par les deux niveaux de compression 2 et 3 que la force de la mousse G 28/19 enregistrée est supérieur à celle enregistrée pour la mousse G 28/22. Les valeurs de la force maximale obtenue expérimentalement sont illustrées dans le tableau III.7.

**Tableau III.7** mesure de la force maximale de la mousse G 28/22.et G 28/19.

Type de mousse	Force maximale à 80% de compression
G28/22 niveau 2	$12,46 \pm 0,9$
G 28/19 niveau 3	$16,14 \pm 4,0$

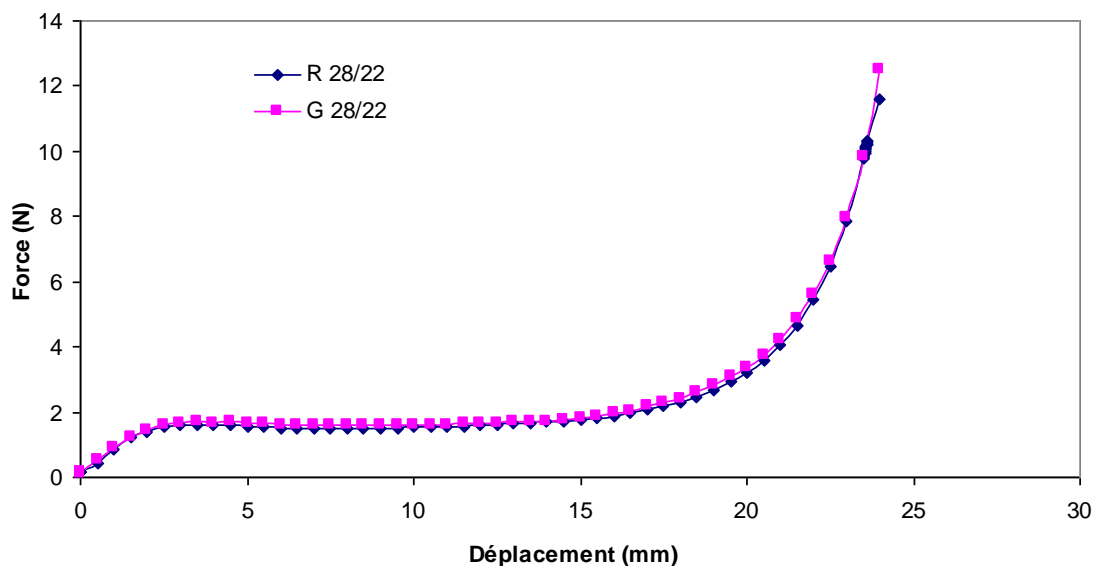




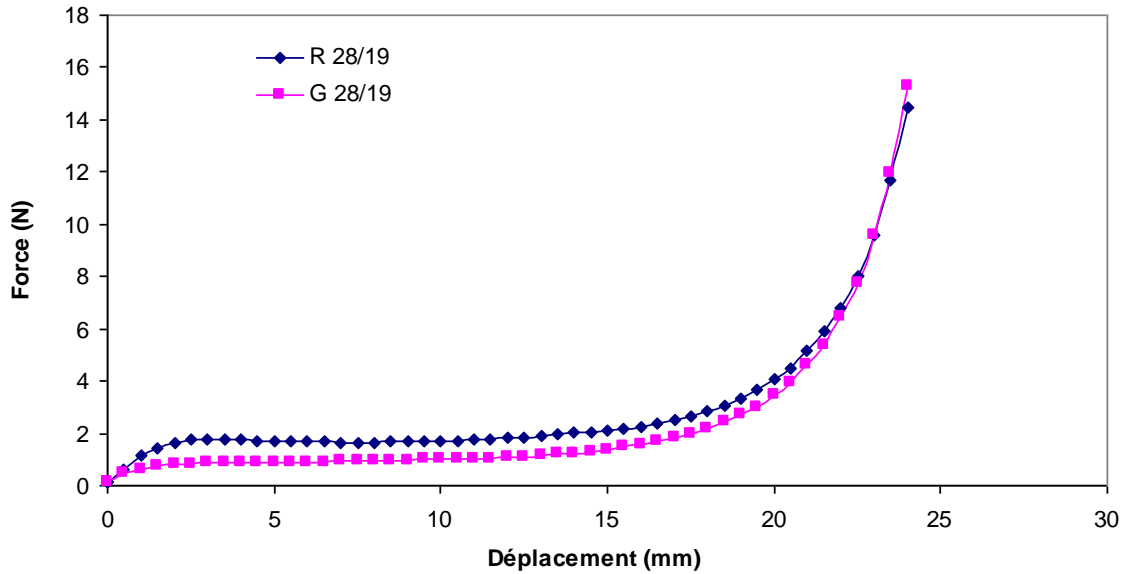
**Figure III.34** Force-déplacement de la mousse grise transformée avec différents niveaux de compression.

### III.3.3.3 Comparaison entre la compression statique de la mousse rose et la mousse grise

Les figures III.35 et III.36 présentent une comparaison entre la mousse rose et la mousse grise transformées par les deux niveaux de compression 2 et 3, le comportement est pratiquement le même (superposition des courbes) pour les mousses transformées par le deuxième niveau de compression (R 28/22 et G 28/22). Il est à noter aussi que la valeur de la force maximale de la mousse grise est légèrement supérieure à celle de la mousse rose pour les deux niveaux. Ceci peut être relié à la différence de densité de la mousse grise qui est 1,56 fois plus grande que celui de la mousse rose.



**Figure III.35** Force-déplacement des mousses rose et grise transformées R 28/22 et G28/22.



**Figure III.36** Force-déplacement des mousses rose et grise transformées R 28/19 et G28/19.

### III.3. Comparaison entre les trois séries

Une comparaison entre les trois séries est faite cette fois ci, où nous avons tracé les courbes force-déplacement de chaque niveau en rassemblons les trois séries dans un même repère pour la mousse rose et la mousse grise (Figures III.37, III.38, III.39, III.40). A partir de ces figures on peut essayer de montré dans quel sens il est préférable de découpé et transformé les échantillons afin d'avoir une force maximale pour un déplacement de 24 mm.

Le comportement force déplacement est assez proche pour les différentes combinaisons jusqu'à un déplacement de 20 mm, au-delà le comportement est plus important. A titre d'exemple, la série II possède le meilleur comportement dans le cas de la mousse rose (Figure III.37) ; en d'autres termes, la force est maximale dans le cas d'un déplacement de 24 mm.

La comparaison entre les deux mousses de même nature mais de densité différente est très importante d'un point de vue économique.

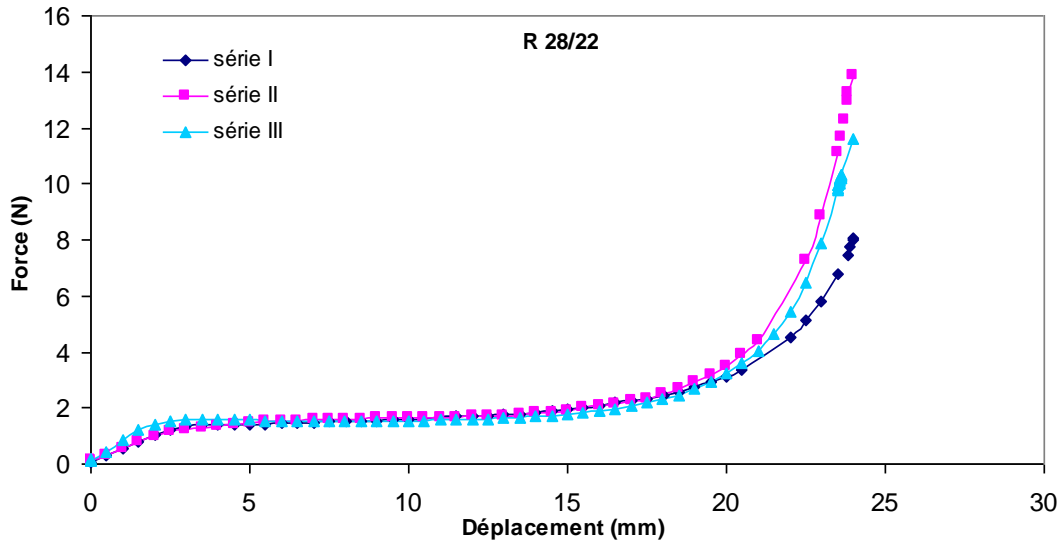


Figure III.37 Force-déplacement de mousse rose transformée R 28/22 pour les trois séries.

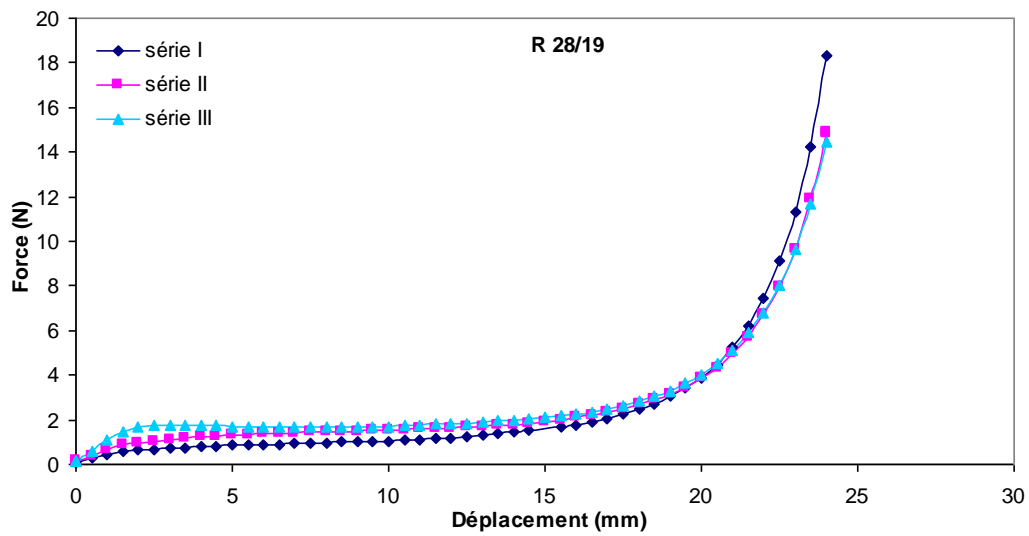


Figure III.38 Force-déplacement de mousse rose transformée R 28/19 pour les trois séries.

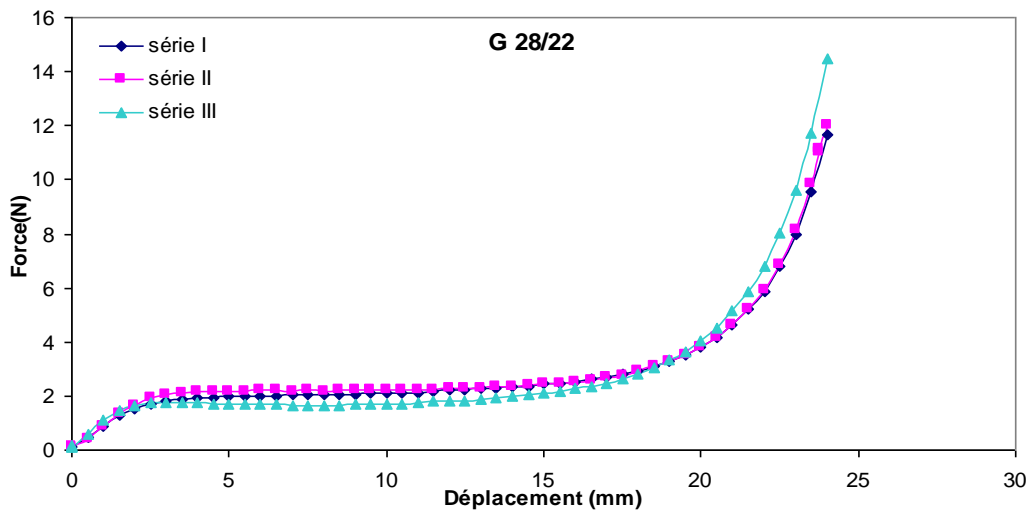
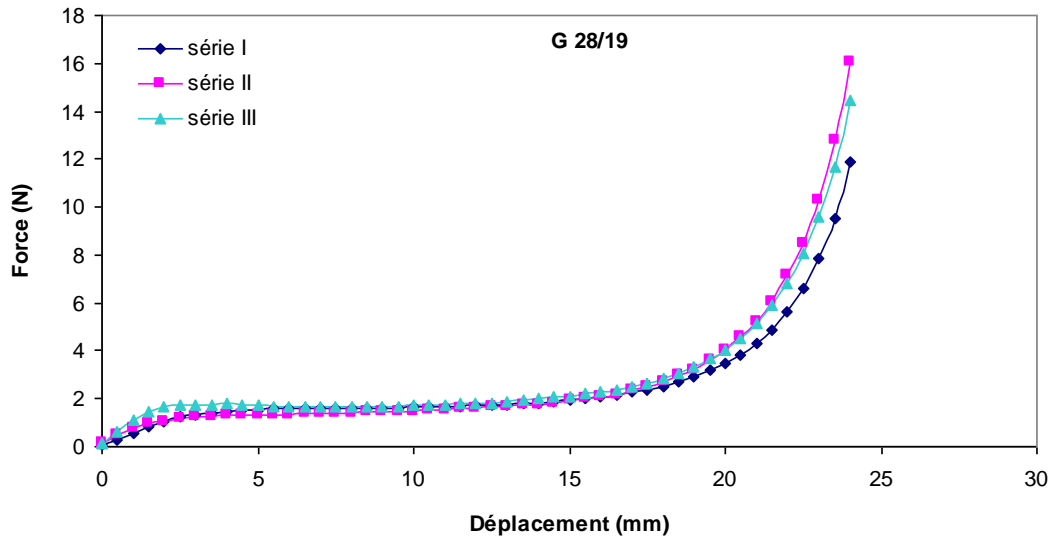


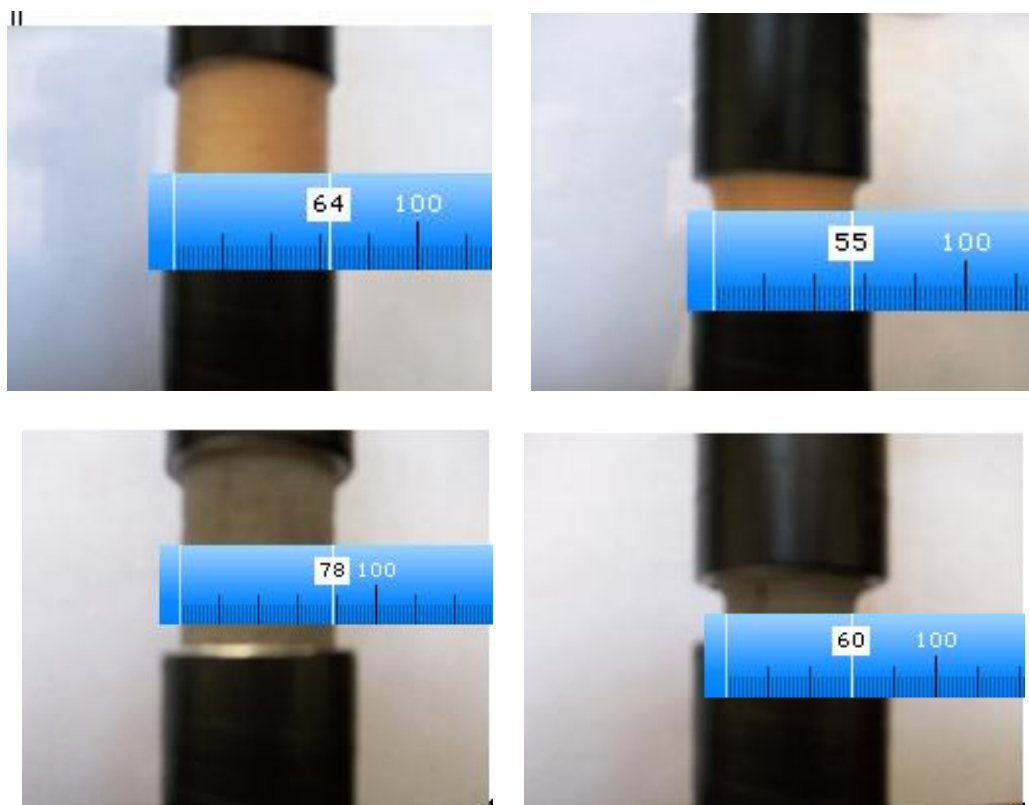
Figure III.39 Force-déplacement de mousse grise transformée G 28/22 pour les trois séries.



**Figure III.40** Force-déplacement de mousse grise transformée G 28/19 pour les trois séries.

### III.4 Détermination du coefficient de Poisson ( $\nu$ )

La détermination du coefficient de Poisson pour les différents échantillons est effectuée en utilisant une technique d'imagerie qui consiste à prendre des photos à des taux de compressions déterminés puis de mesurer les largeurs de ces échantillons (Figure III.41), ce qui permet de calculer le coefficient de Poisson.



**Figure III.41** Mesure des diamètres des éprouvettes (unité en pixel) en fonction du taux de compression pour les différentes mousses étudiées.

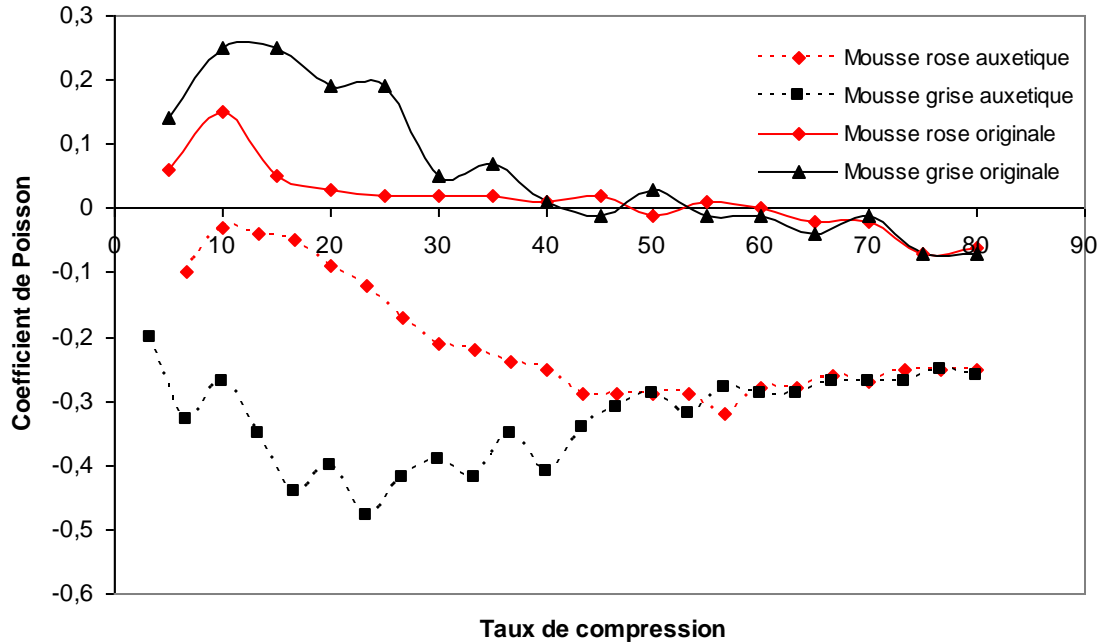
La figure III.42 montre la variation du coefficient de Poisson ( $\nu$ ) en fonction du taux de compression des mousses étudiés : rose et grise auxétique et originale.

Les mousses originales rose et grise ont des coefficients de Poisson maximal positifs de 0,15 et 0,25 respectivement pour un taux de compression de 10% et 6,67%, après ils commencent à diminuer avec l'augmentation du taux de compression jusqu'à 80 % pour atteindre une valeur de l'ordre de -0,07 % pratiquement pour les deux mousses.

Les mousses rose et grise transformées possèdent toutes les deux des coefficients de Poisson négatif (Auxétique), sous forme d'un palier, très proches de l'ordre de -0,26 à -0,30 pour un taux de compression compris entre 45 et 80 %. L'obtention de coefficient de Poisson négatif est due aux transformations effectuées ce qui conduit à une forme angulaire des nervures des cellules étirée ou comprimée.

La mousse grise se caractérise par un degré d'auxéticité beaucoup plus important ayant un coefficient de Poisson de -0,48 obtenue pour un taux de compression de 23%, alors que pour la mousse rose ce coefficient n'est que -0,30 pour un taux de compression de 50 %.

Le coefficient de Poisson d'une structure peut devenir négatif même si le coefficient de Poisson du matériel intrinsèque est positif [YAN-03]. Les mousses auxétiques montrant un comportement de coefficient de Poisson négatif, Brandel et Lakes [BRA-01] ont trouvé un coefficient de poisson de -0,5 pour les mousses polyéthylène ce qui est très proche de la mousse grise de cette étude.



**Figure III.42** Variation du coefficient de Poisson ( $\nu$ ) en fonction du taux de compression des différentes mousses étudiées.

### III.5 Essais de traction statique

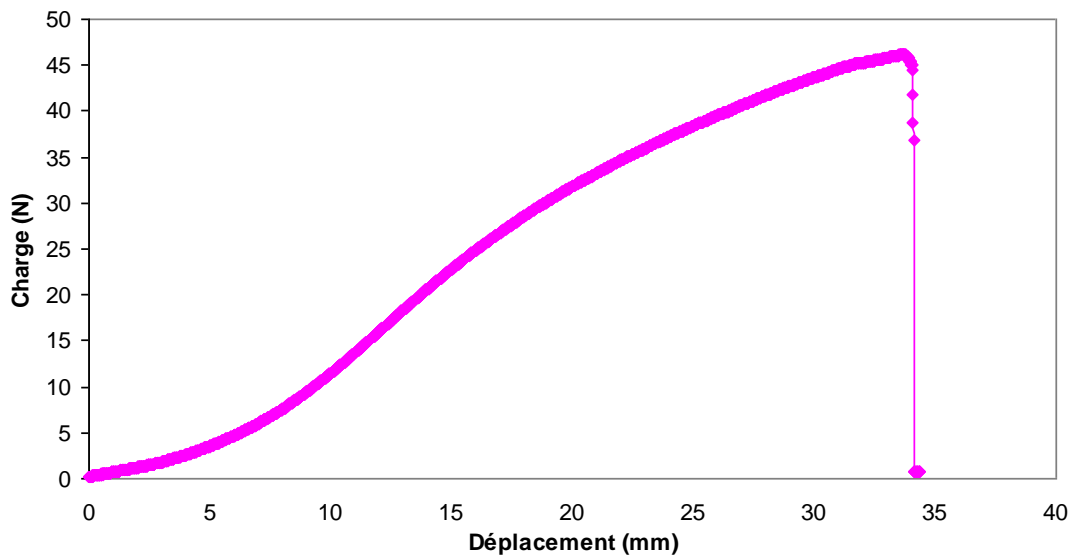
Les essais de traction statique ont été réalisés sur deux types de mousse polyuréthane à cellules ouvertes, la mousse rose et la mousse grise transformé par le deuxième niveau de compression. Le tableau III.7 ci-dessous illustre la densité et les dimensions des échantillons. Tous les essais ont été effectués à une température ambiante avec une vitesse de déplacement de 5 mm/min. Les essais de traction sur les mousses sont très difficile à réaliser du fait qu'il faut bien les collés sur des étalons métallique, seule cinq échantillons parmi les dix testés en été validé car on obtient des ruptures prématuré à cause de la mauvaise adhérence.

**Tableau III.7** Densité et dimensions des échantillons.

Type de mousse	La hauteur (mm)	Le diamètre (mm)	Densité ( $\text{g/cm}^3$ )
Mousse R 28/22	30	27,8	0,019
Mousse G 28/22	30	28,7	0,026

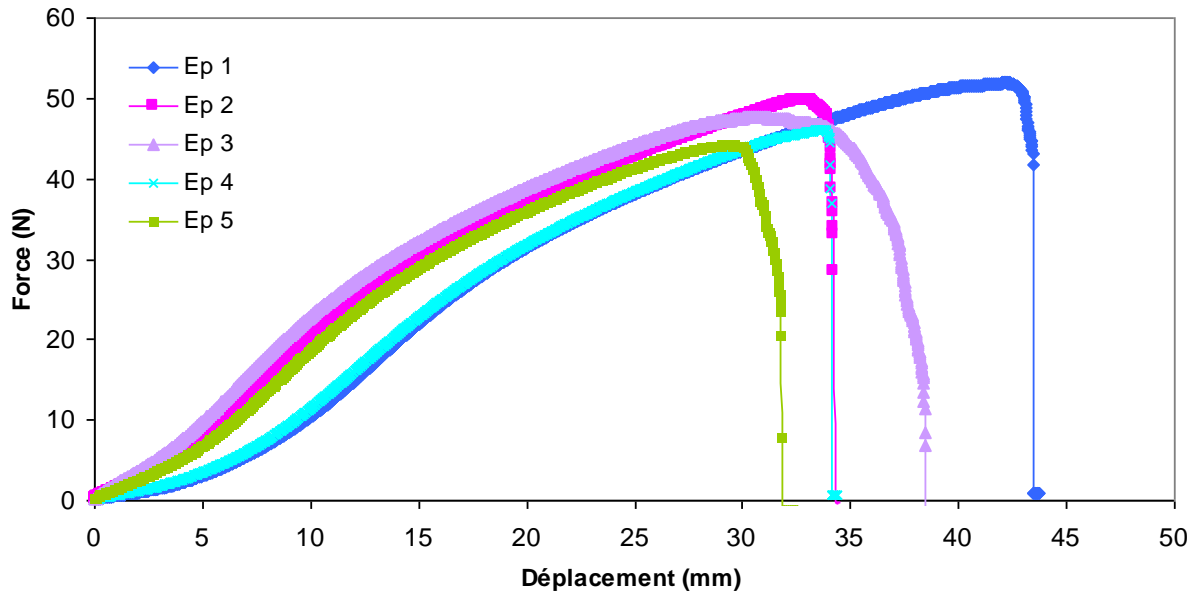
### III.5.1 Mousses rose

Le comportement type force déplacement des mousses transformés (Figure III.43) se déroule en deux phases non linéaire : la première jusqu'à un déplacement de 10 mm (environ 30 % du déplacement à la rupture) suivie par une phase où l'augmentation de la force s'accélère jusqu'à la rupture brutale des échantillons. Ceci est en bonne concordance avec les travaux de Bezazi et Scarpa [BEZ-09]



**Figure III.43** Courbe type force-déplacement d'une mousse polyuréthane transformé en traction statique.

La figure III.44 représente les courbes force-déplacement de la mousse rose transformé (R 28/22) en traction statique qui se déroule en deux phases non linéaire jusqu'une valeur de force maximale, suivi par une chute brutale présentant la rupture des échantillons. Il est a signalé une dispersion assez importante dans les essais, ceci est due d'une part aux variations des dimensions (diamètre et longueur) des éprouvettes transformé et d'autre part au problème de collage des échantillons sur les étalons métallique.



**Figure III.44** Force-déplacement de la mousse rose transformé en traction statique.

Pour s'affranchir du problème de dimensions les courbes force déplacement peuvent être retracé en contrainte déformation en utilisant les formules suivantes :

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (\text{III.1})$$

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (\text{III.2})$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (\text{III.3})$$

Où

$F$  : la force appliquée.

$S$  : la section droite de l'éprouvette.

$l_0, l$  : respectivement la longueur initiale et final de l'échantillon.

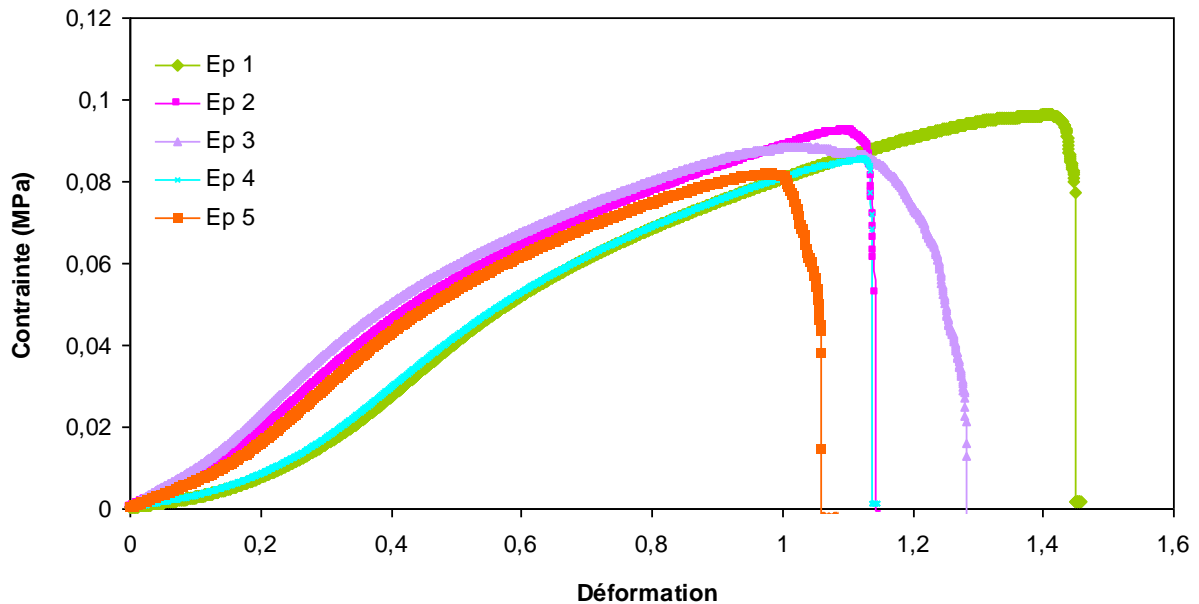
$E$  : le module de Young.

$\sigma, \varepsilon$  : respectivement la contrainte et la déformation.

L'évolution de la contrainte en fonction de la déformation (Figure III.45), de la mousse polyuréthane rose à cellules ouvertes montre le même comportement que celui de la force-déplacement (Figure III.44). Il est à signalé que pour des petites déformations (réponse

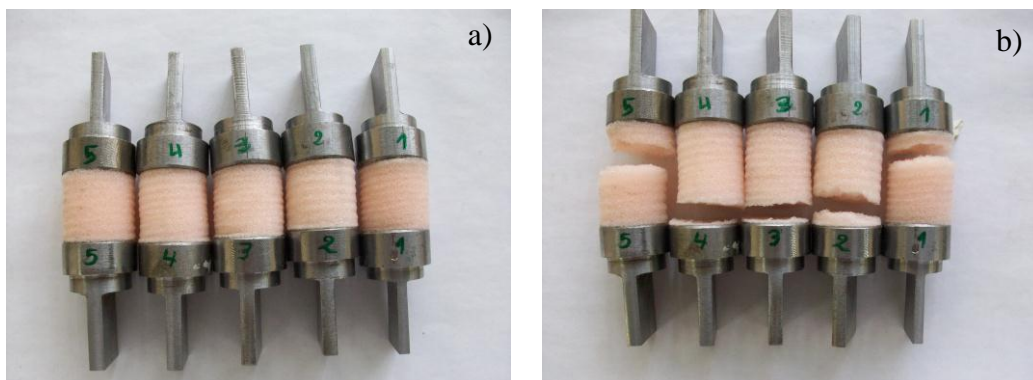


élastique, la zone élastique proportionnellement est faible. Le module de Young a été calculé dans la partie élastique à 10% de la courbe contrainte-déformation, selon la loi de Hooke (équation III.3), nous avons trouvé une valeur moyenne de 0,058 MPa. La contrainte moyenne est de 0,088 MPa obtenue pour une déformation de 113 % ceci est très loin des résultats obtenu par Bezazi et Scarpa [BEZ-09] qui on trouvé une contrainte maximale de 0,32 MPa pour une déformation de 154 %.



**Figure III.45** Contrainte-déformation de la mousse rose transformé (R 28/22) en traction statique.

Les faciès de ruptures des mousses rose transformé montre la rupture est généralement obtenue au voisinage des bouts des étalons métallique, ceci est en bonne concordance avec [BEZ-09].



**Figure III.46.** Echantillons des essais a) avant test, b) testés.

Le tableau III.7 regroupe les propriétés mécaniques de la mousse polyuréthane rose à cellules ouvertes transformé en traction statique jusqu'à la rupture.

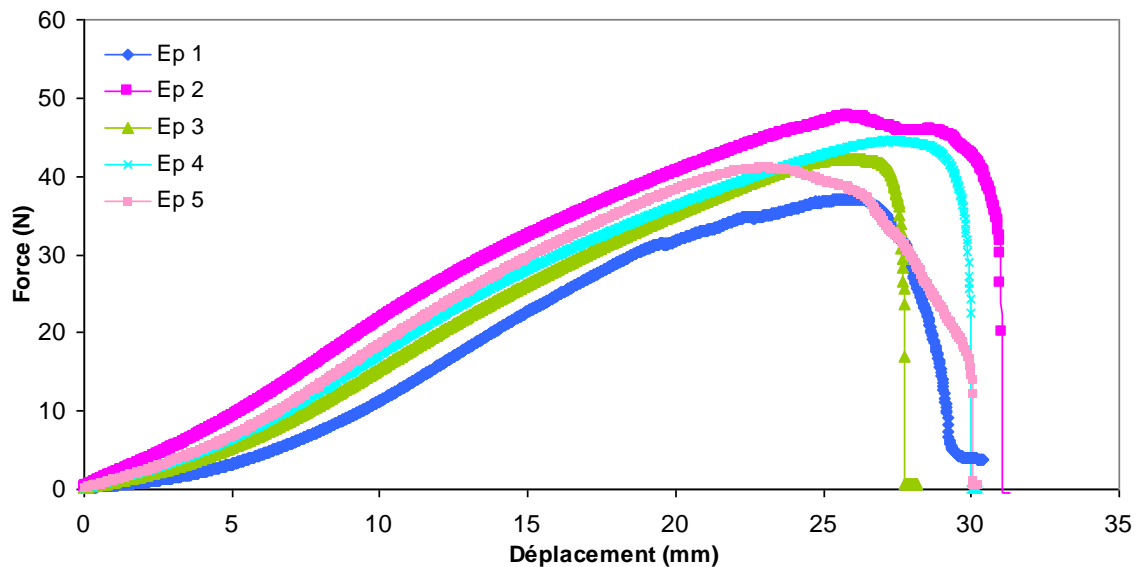
**Tableau III.7** Propriétés mécaniques de la mousse rose transformée en traction.

Eprouvette	$\sigma_{rup}$ (MPa)	$\varepsilon_{rup}$ %	E (MPa)
1	0,096	1,41	0,027
2	0,092	1,09	0,081
3	0,088	1,05	0,10
4	0,085	1,12	0,03
5	0,082	0,98	0,06
<b>Moyenne</b>	<b>0,088</b>	<b>1,13</b>	<b>0,058</b>

Où :  $\sigma_{rup}$ ,  $\varepsilon_{rup}$  et E sont respectivement la contrainte, la déformation et la module de Young en traction statique.

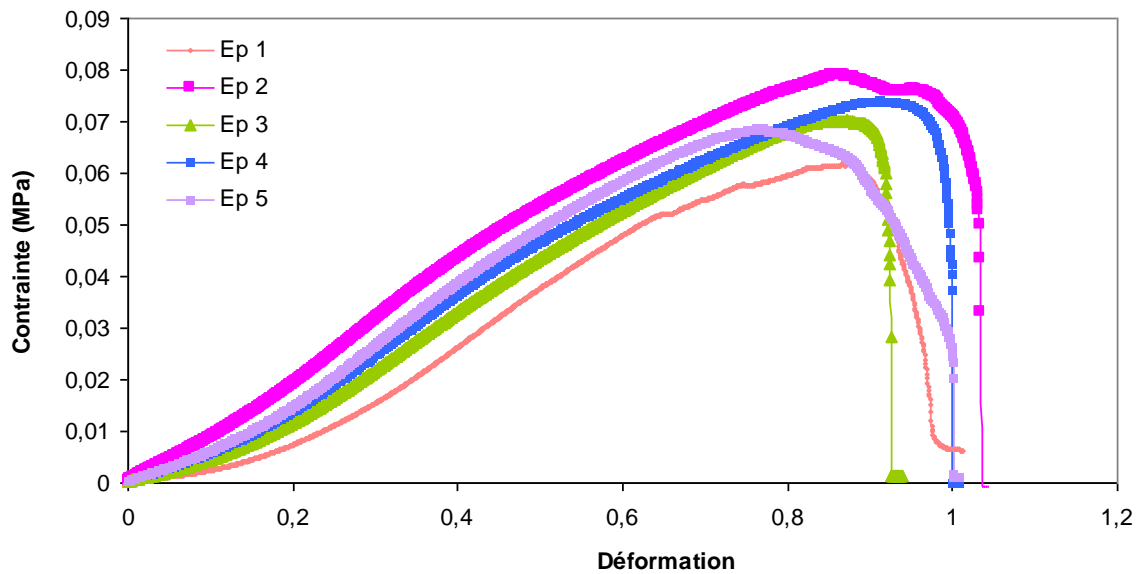
### III.5.2 Mousses grise

La figure III.47 présente la courbe force-déplacement de la mousse grise transformée ; est testée en traction statique, le comportement se déroule en une phase non linéaire. Ce comportement est analogue à celui déjà obtenue pour la mousse rose.



**Figure III.47** Force-déplacement de la mousse grise transformé en traction statique.

D'une manière analogue, les courbes force déplacement sont tracer en contrainte déformation est présenté dans la figure III.48. Ce comportement est semblable à celui trouvé pour la mousse rose. Nous avons enregistré une valeur moyenne de module de Young de 0,052 MPa et une contrainte maximale à la rupture de 0,078 MPa pour une déformation à la rupture de 86 %.



**Figure III.48** Contrainte-déformation de la mousse grise transformé en traction statique.

Malgré que les éprouvettes sont découpé d'un même bloc, fabriqué dans le même moule, des dispersions sont enregistré dans les deux courbes III.47 et III.48, cela est due à la morphologie des mousses et au variabilité des structures aléatoire au niveau des tailles des cellules en plus les défauts de fabrication. Le comportement mécanique des mousses est fortement influencé par leur structure cellulaire [MAC-95]. Ceci est aussi en bonne concordance avec les travaux de Bezazi et al [BEZ-09 et BEZ-11] et Dillart et al [DIL-04] qui ont aussi enregistré des dispersions respectivement pour des mousses polyuréthane, PVDF et mousses de nickel à cellules ouvertes.

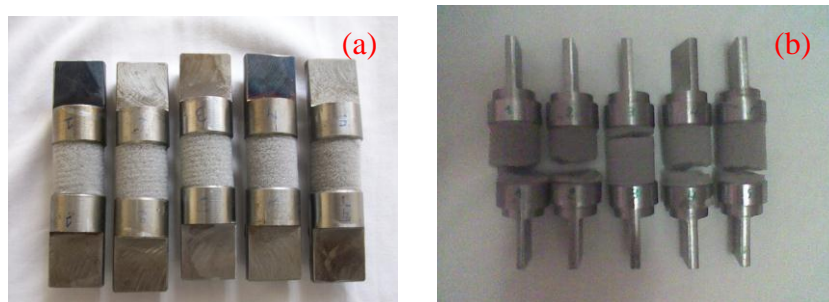
Le tableau III.8 regroupe les propriétés mécaniques de la mousse grise transformé en traction statique jusqu'à la rupture.

**Tableau III.8** Propriétés mécaniques de la mousse grise transformée en traction.

Eprouvette	$\sigma_{rup}$ (MPa)	$\epsilon_{rup}$ %	E (MPa)
1	0,061	0,88	0,02
2	0,078	0,86	0,08

3	0,070	0,87	0,04
4	0,073	0,92	0,06
5	0,068	0,77	0,06
<b>Moyenne</b>	0,07	0,86	0,052

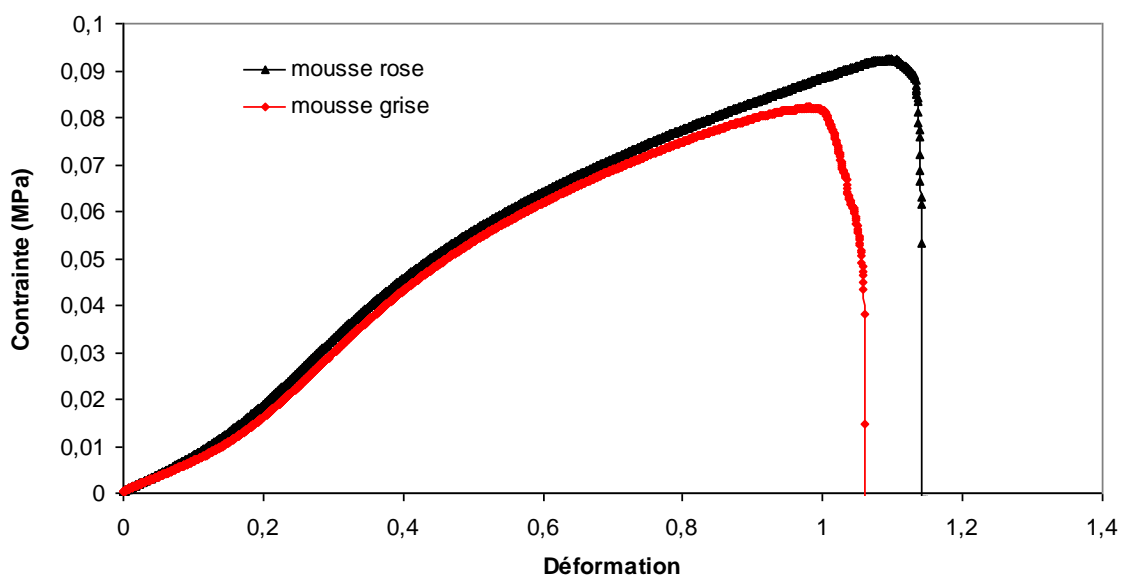
La figure III.49 représente les échantillons de la mousse grise non testé et rompe après traction statique ou la majorité des échantillons se rompe au voisinage de la parti supérieur ou inférieur des étalons métalliques.



**Figure III.49** Echantillons des essais a) avant test, b) testées.

### III.5.3 Comparaison entre la traction de la mousse rose et la mousse grise

La comparaison des courbes contrainte déformation représentative des mousses grise et rose permet d'enregistrer un meilleur comportement pour la mousse rose, en d'autres termes sa contrainte et sa déformation maximale sont plus grandes avec un module de Young pratiquement équivalent (Figure III.50).



**Figure III.50** Courbe contrainte-déformation de la mousse rose et grise transformés sollicité en traction statique.

### III.6 Conclusion

Dans ce chapitre deux types de mousses sont testés en compression et en traction sous chargement statique, où la gamme des échantillons est divisée en trois séries pour les essais de compression. La réalisation de ces essais permet de tirer les conclusions suivantes :

- Le comportement mécanique (force-déplacement) en compression statique des mousses polyuréthane rose et grise (originale et transformée) se déroule en trois phases, une phase linéaire suivie d'un plateau et en fin une phase de densification où la force augmente rapidement avec l'augmentation du déplacement. La phase linéaire des mousses transformées est faible par rapport à celle des mousses originales.

- L'effet du taux de transformation influe sur le comportement des mousses

- La force maximale de compression de la mousse grise est supérieure à celle de la mousse rose, par contre on a un effet contraire dans le cas de la traction.

- Les mousses originales rose et grise ont des coefficients de Poisson maximaux positifs de 0,15 et 0,25 respectivement pour des taux de compression respectifs de 10% et 6,67%.

- Les mousses rose et grise transformées possèdent toutes les deux des coefficients de Poisson négatifs (Auxétique), sous forme d'un palier, très proches de l'ordre de -0,26 à -0,30 pour un taux de compression compris entre 45 et 80 %

- Le comportement mécanique en traction statique des mousses rose et grise transformées par le deuxième niveau de compression (28/22) se caractérise par deux phases non linéaires jusqu'à une valeur de force maximale, suivie par une chute brutale.

- Les dispersions enregistrées dans les résultats sont principalement dues à la morphologie des mousses et à la variabilité des structures aléatoires au niveau des tailles des cellules et aussi aux défauts de fabrication.

Les échantillons des mousses rose et grise testés en traction statique se rompent au voisinage des parties supérieures ou inférieures des étalons métalliques.

## **Chapitre IV**

# **Etude expérimentale en fatigue cyclique**

## **Etude expérimentale en fatigue cyclique**

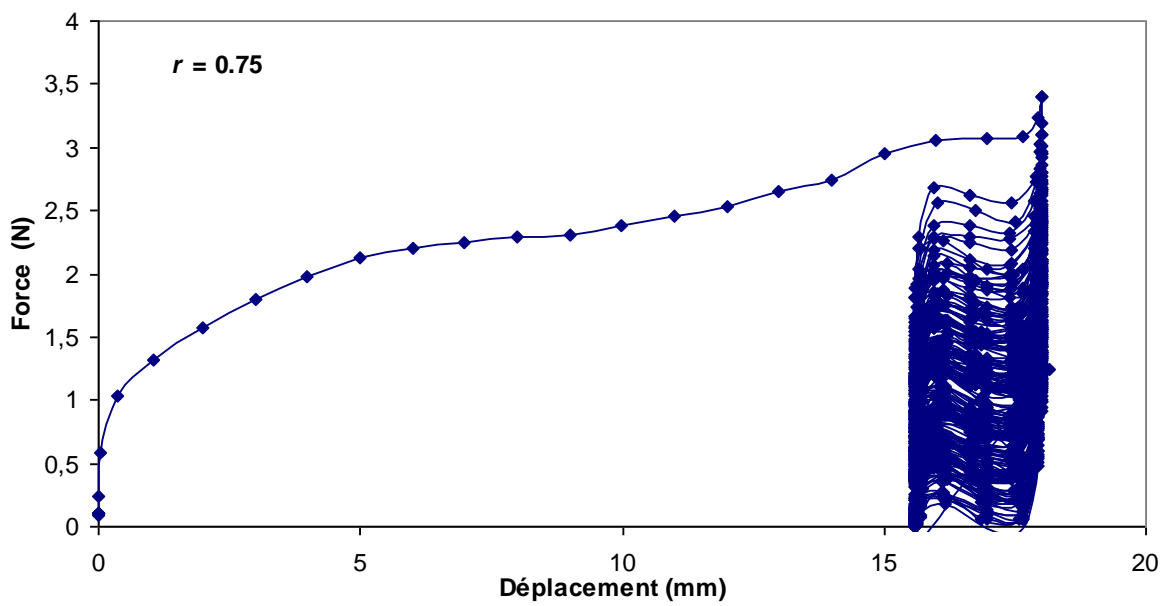
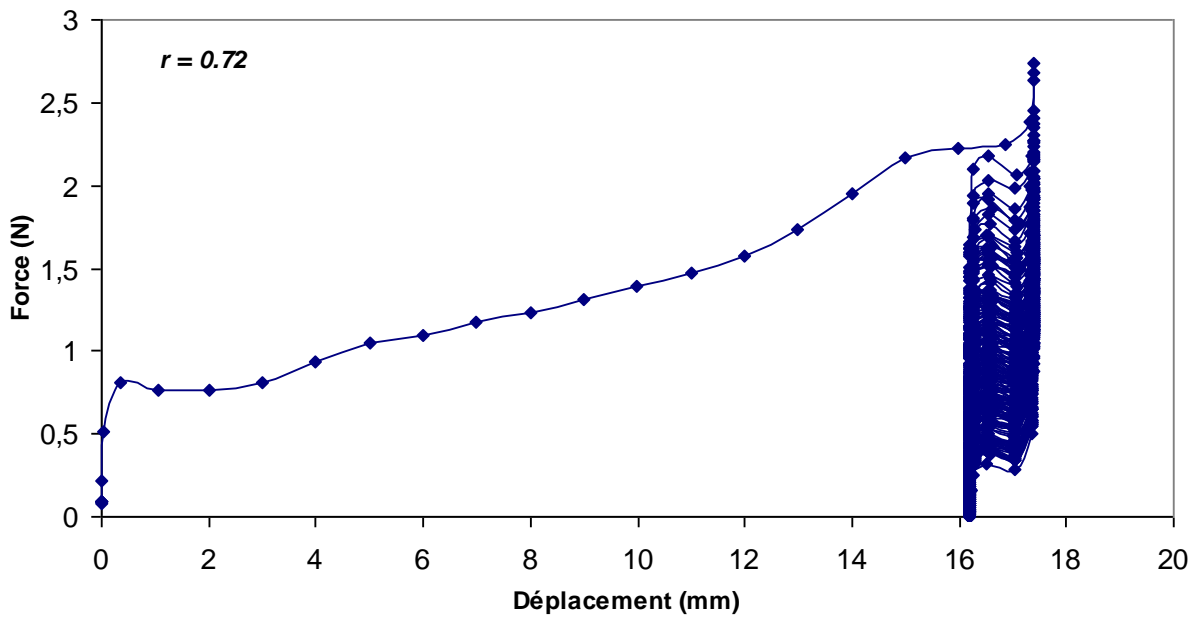
### **IV.1 Introduction**

L'étude de la fatigue des matériaux cellulaires est importante puisque ces structures sont soumises à un chargement mécanique cyclique ou thermique. Sous un niveau de chargement important, les panneaux sandwichs par exemple, à âme en nid d'abeille ou de la mousse se rompent habituellement après quelques cycles de chargement en raison de la propagation des microfissures préexistante critique dans les matériaux cellulaires.

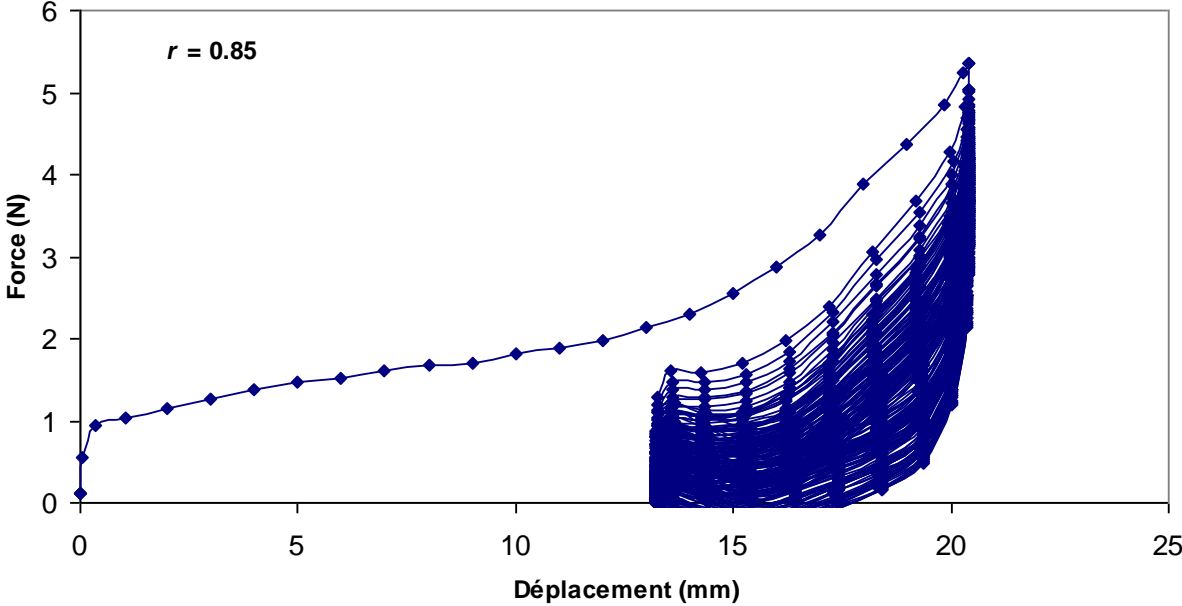
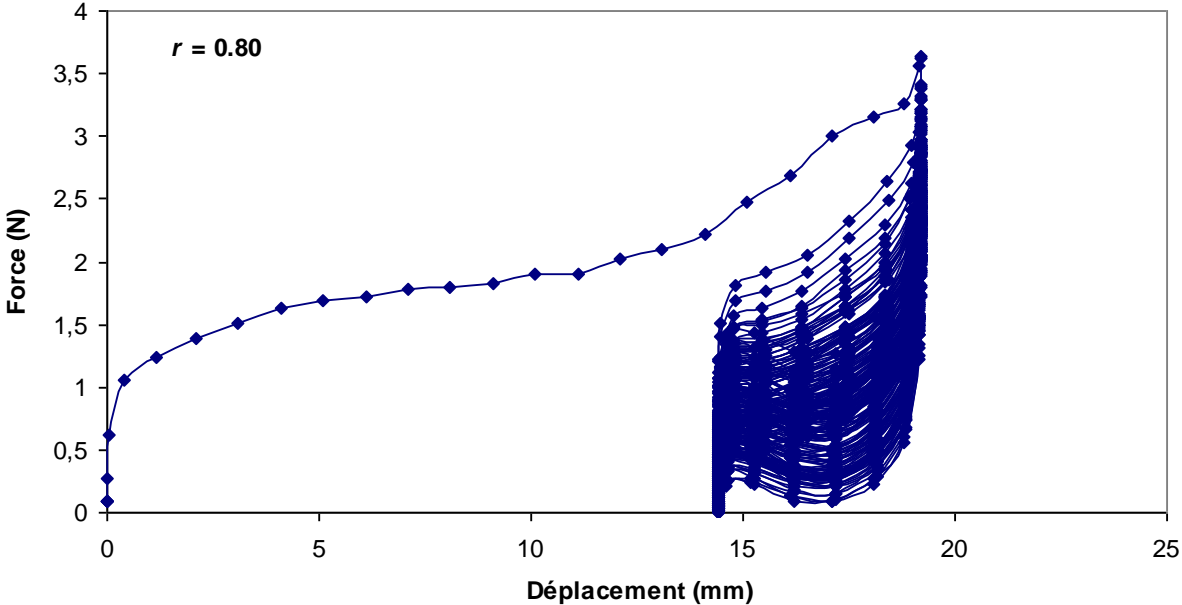
Dans ce chapitre une étude sur les propriétés en fatigue cyclique en compression est effectuée sur les mousses polyuréthanes grises à cellules ouvertes transformées par le troisième niveau de compression. Le but est d'extraire des données sur le comportement en fatigue cyclique en compression.

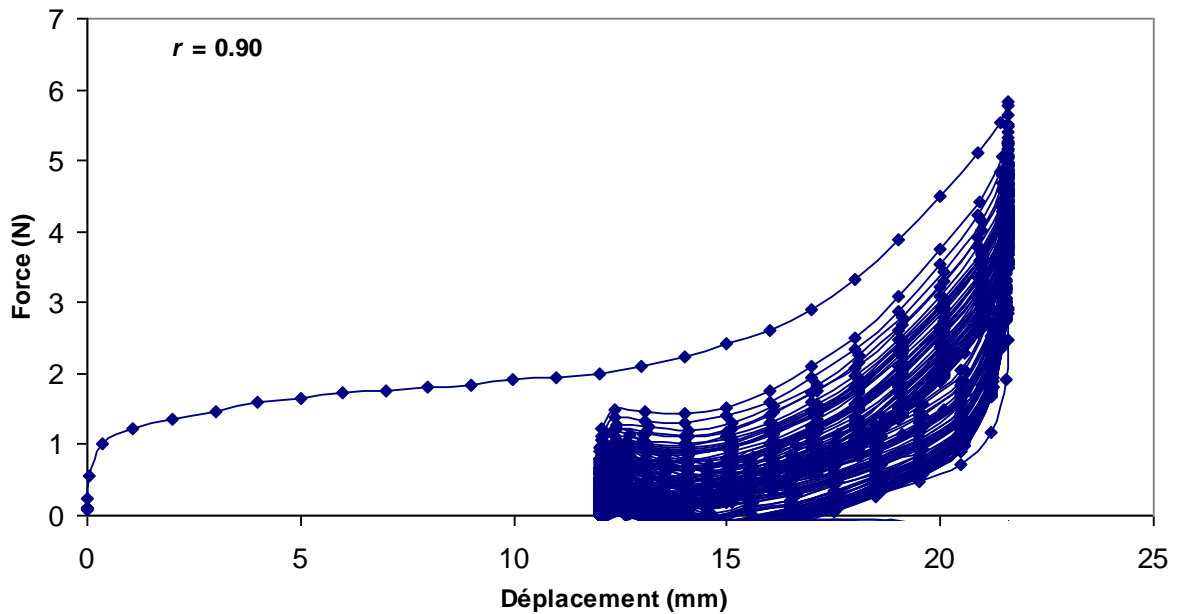
### **IV.2 Essais de fatigue cyclique en compression**

La figure IV 1 représente les courbes force-déplacement des boucles d'hystérésis pour différents niveaux de chargement ( $r$ ). On remarque que dans chaque niveau de chargement la charge commence par une valeur maximale, puis elle a tendance à diminuer avec l'augmentation du nombre de cycle, par contre le déplacement reste constant puisque il est fixé pour chaque niveau (essais effectués en contrôle déplacement).







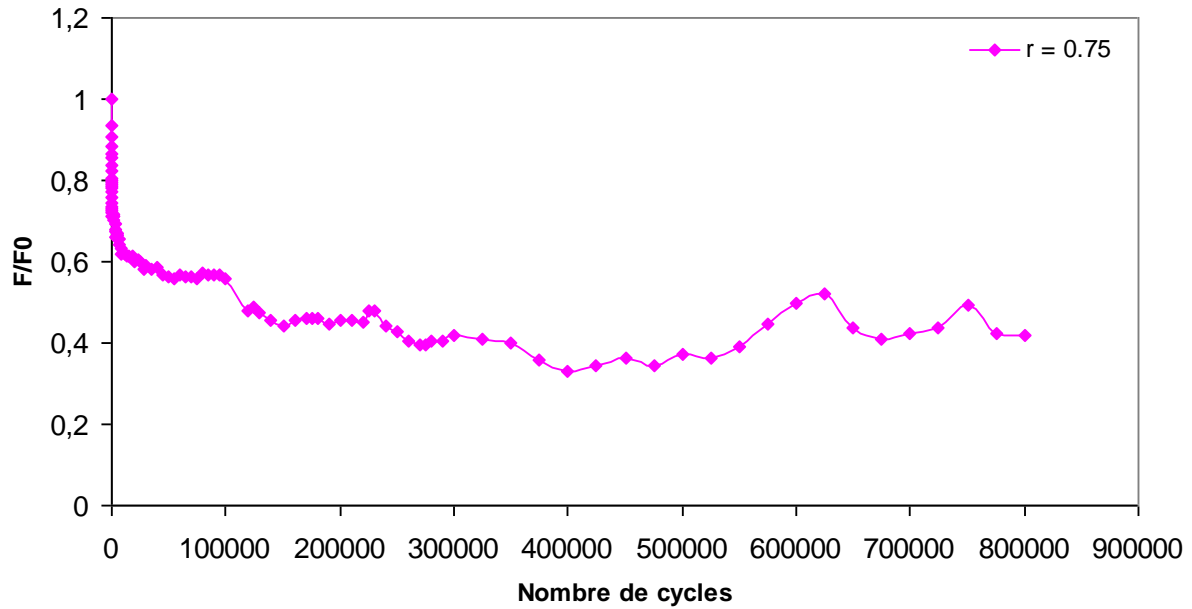


**Figure IV.1** Courbes d'hystérésis pour différents niveaux de chargement  $r$ .

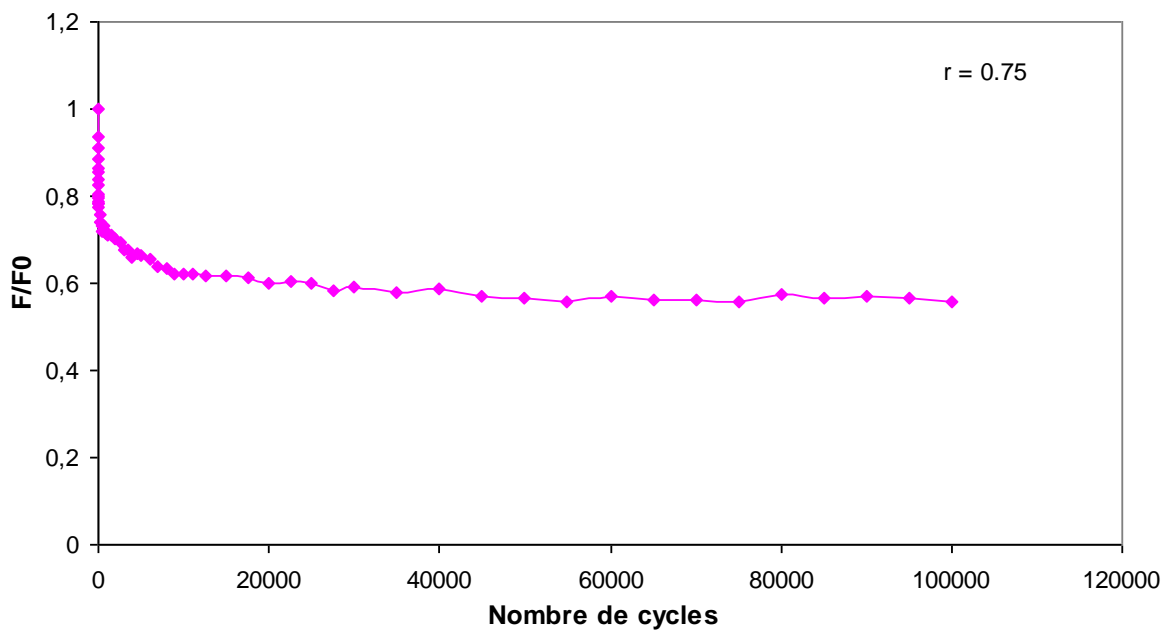
#### IV.2.1 Perte de charge

Le suivi de la perte de rigidité ( $F/F_0$ ) constitue une des méthodes les plus utilisées pour suivre la progression de l'endommagement des mousses en chargement cyclique, au cours des essais de fatigue nous avons enregistré l'évolution de la charge maximale  $F$  en fonction du nombre de cycle. La charge maximale  $F$  est rapportée à celle obtenue lors du premier cycle  $F_0$ .

La perte de rigidité en compression dans le cas des mousses est effectué en deux phases (Figure IV.2) ; une diminution très importante est enregistré dès les premier cycles dans le cas de la première phase suivi par une stabilisation (pseudo plateau) dans ce cas de la deuxième phase pour un million de nombre de cycle.



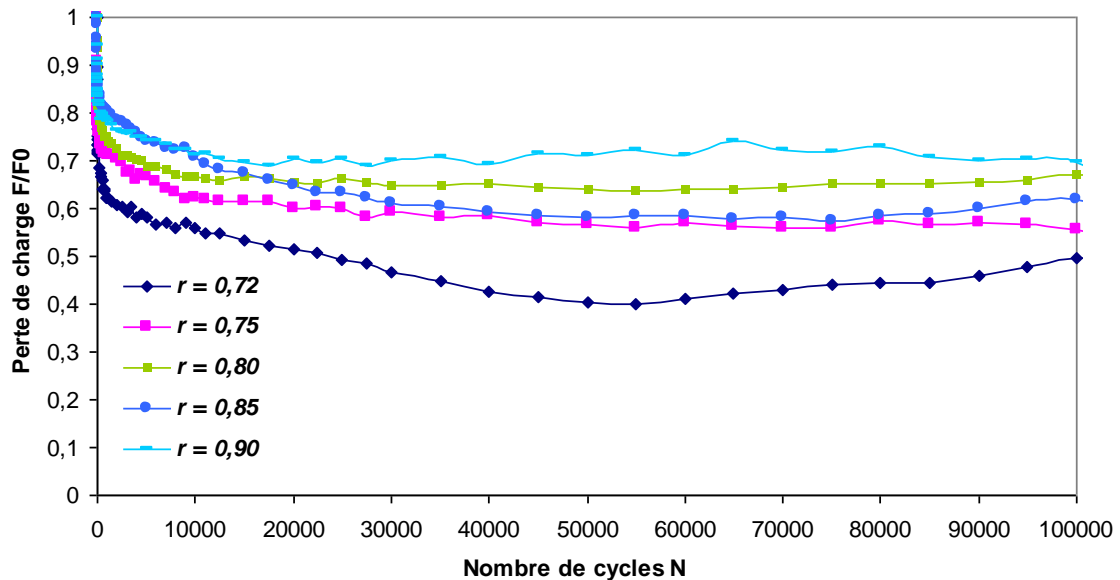
**Figure IV.2** Courbe type de perte de charge  $F/F_0$  en fonction du nombre de cycle (cas d'une mousse polyuréthane pour un niveau de chargement  $r = 0,75$ ).



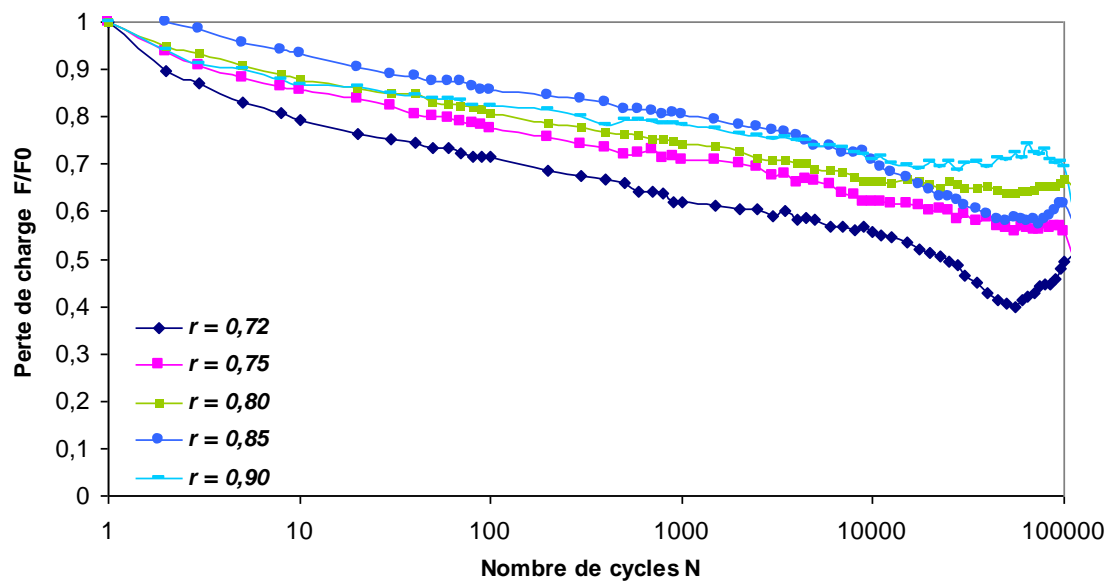
**Figure IV.3** Courbe type de perte de charge  $F/F_0$  en fonction du nombre de cycle  $N=100\ 000$  (cas d'une mousse polyuréthane pour un niveau de chargement  $r = 0,75$ ).

La charge maximale ( $F$ ) rapportée à celle obtenue lors du premier cycle ( $F_0$ ), en fonction du nombre de cycle ( $N$ ) pour les différents niveaux de chargement étudiés sont illustrés en échelle linéaire (Figure IV.4), et en échelle semi logarithmique (Figure IV.5).

La dégradation de la rigidité ( $F/F_0$ ) des échantillons jusqu'à 100 000 cycles peut être divisée en deux étapes. La première est caractérisée par une forte réduction de la perte de rigidité  $F/F_0$  durant les premiers cycles, alors que pendant la deuxième étape la dégradation est plus progressive est lente et atteint un comportement quasi plateau. Ceci est en bonne concordance avec les travaux de Bezazi & Scarpa [BEZ-07] dans le cas d'une mousse polyuréthane et aussi dans le cas des mousses PVDF [FRI-09].

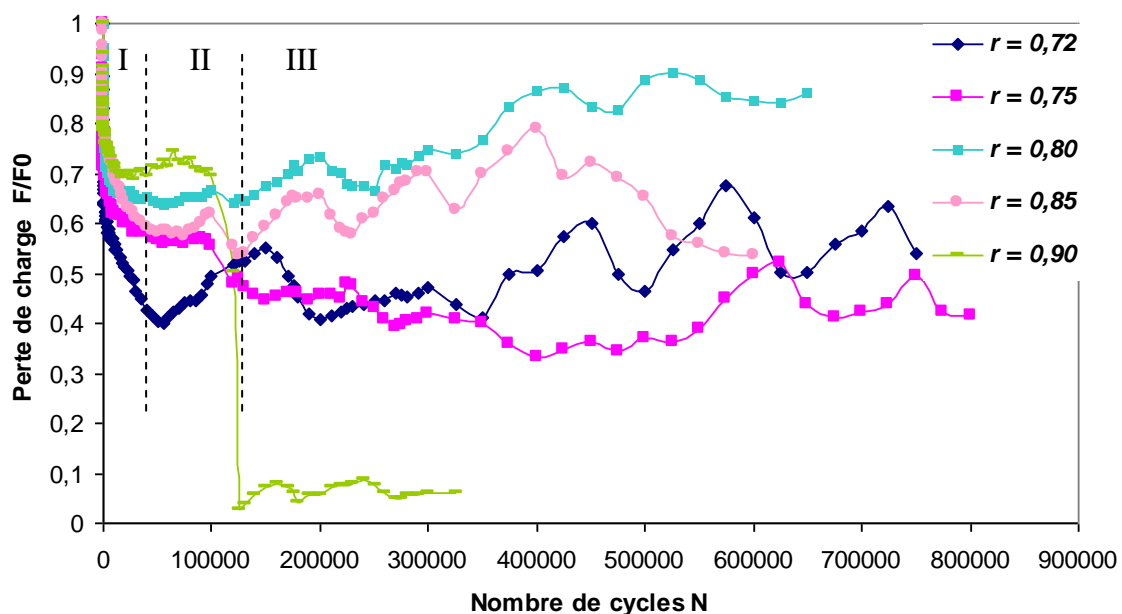


**Figure IV.4** Evolution de la perte de charge  $F/F_0$  en fonction du nombre de cycle pour différents niveaux de chargement  $r$ .



**Figure IV.5** Evolution de la perte de charge  $F/F_0$  en fonction du nombre de cycle pour différents niveaux de chargement  $r$  avec une échelle semi logarithmique.

Pour enrichir l'analyse de ce travail, nous avons réalisé des essais allant jusqu'à 800000 cycles, dans ce cas la perte de rigidité peut être divisée en trois phases (Figure IV.6). La première est caractérisée par une forte réduction de la perte de rigidité  $F/F_0$  durant les premiers cycles, alors que pendant la deuxième phase la dégradation est plus progressive et lente et atteindre un comportement plateau. Cependant, la troisième phase se caractérise par un comportement alternatif entre un accroissement et décroissement de la perte de rigidité, et cela peut être due à la diminution de la température pendant la nuit, ce qui provoque un durcissement de la mousse ce qui se traduit par une augmentation relative de la perte de rigidité.



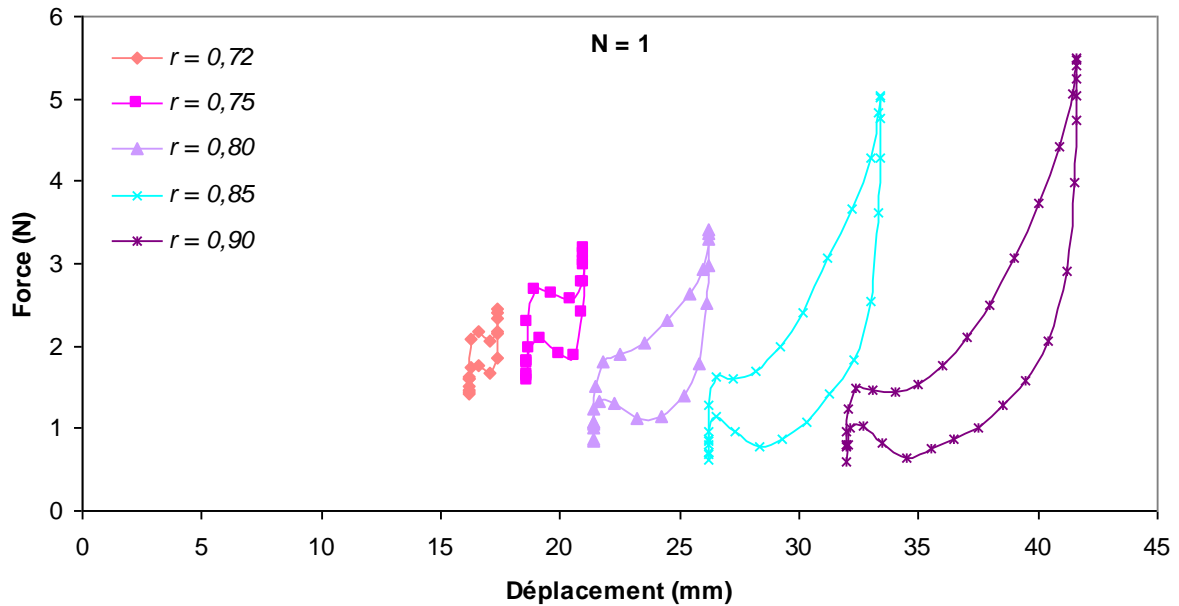
**Figure IV.6** Evolution de la perte de charge  $F/F_0$  en fonction de nombre de cycle pour les différents niveaux de chargement  $r$ .

Il est bien connu que la fatigue thermique (FT) et la fatigue thermomécanique (FTM) conduisent à la dégradation des matériaux [OHT-03]. L'étude montre la diminution de la résistance à la fatigue pour un accroissement de température d'essai [GUS-11]. Plusieurs paramètres déterminent le comportement en fatigue des polymères tel que la température, la fréquence [HAR-91].

#### IV.2.2 Boucles d'hystérésis

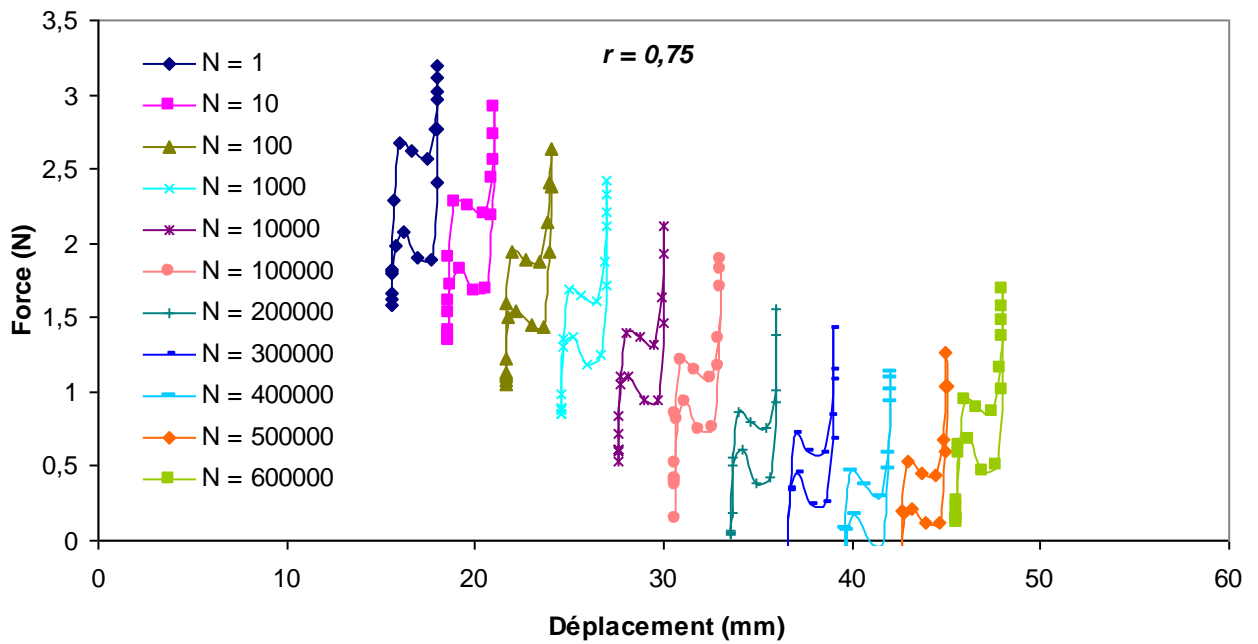
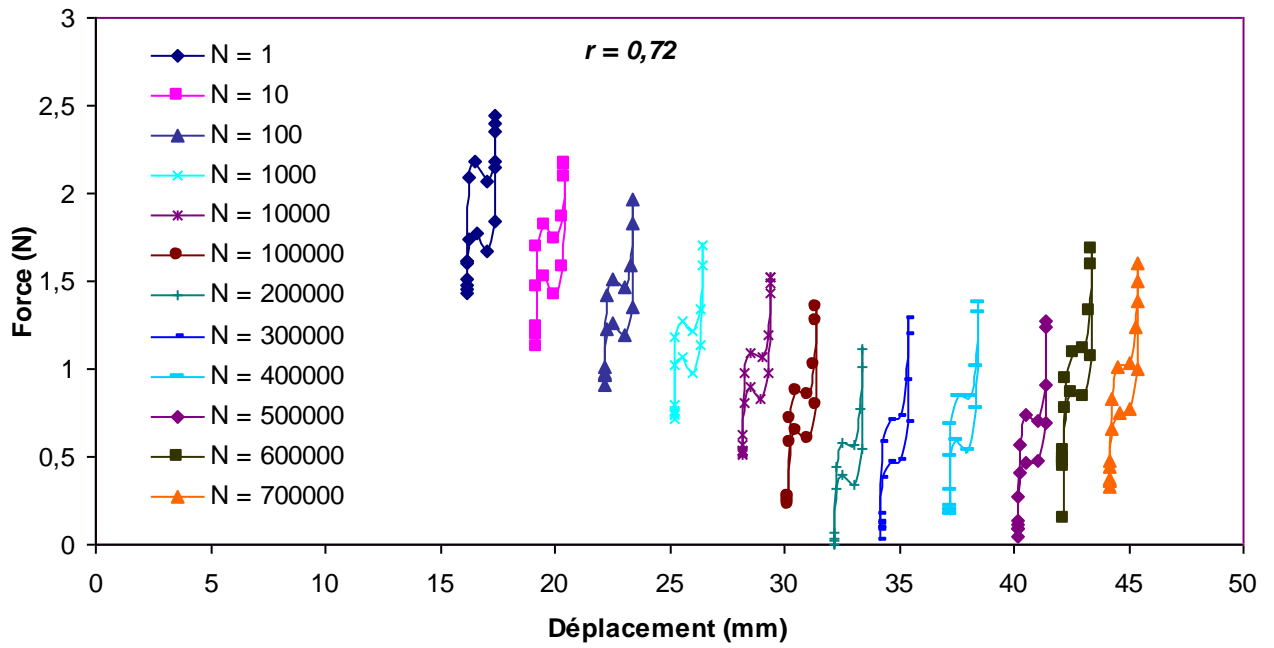
La Figure IV.7 représente les boucles d'hystérésis enregistrées du premier cycle ( $N = 1$  cycle) pour les différents niveaux de chargements utilisés ( $r = 0,72 ; \dots ; r = 0,90$ ).

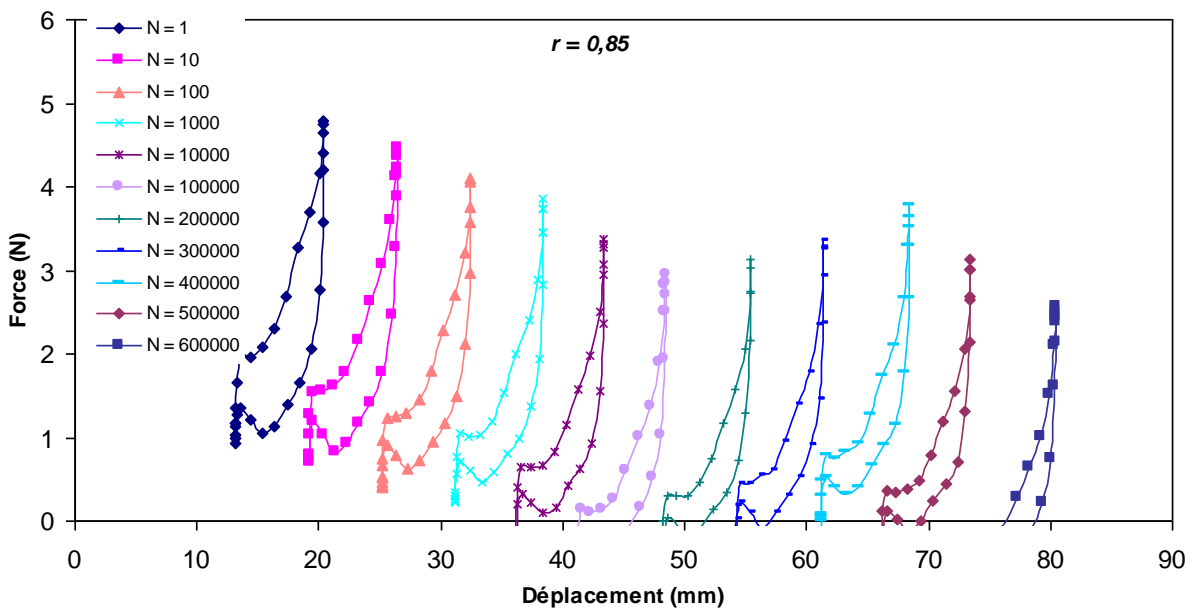
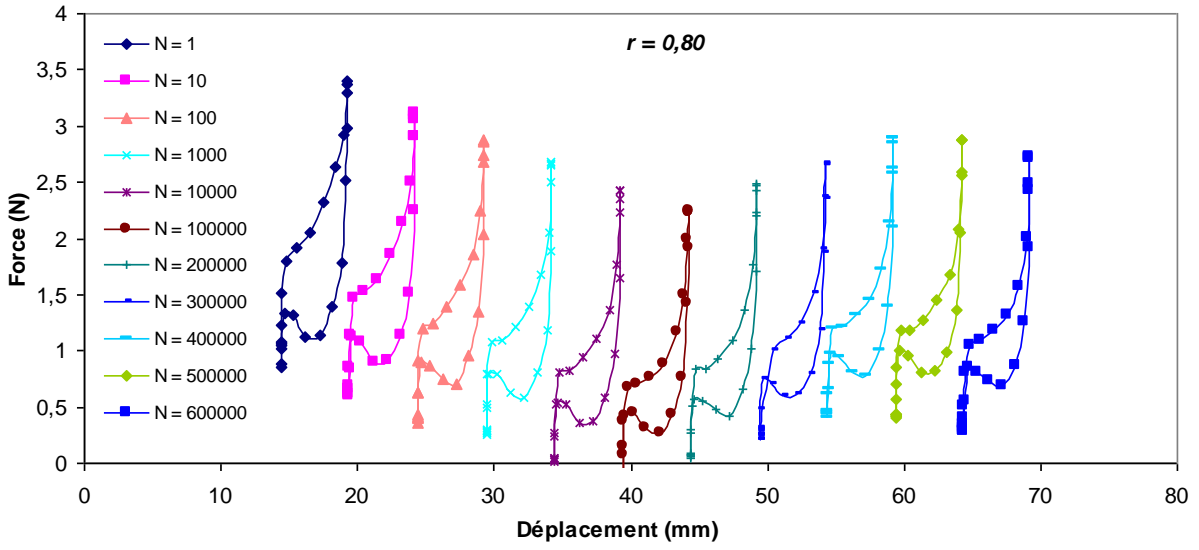
L'augmentation du niveau de chargement pour un nombre de cycle défini conduit à une augmentation de la boucle d'hystérésis. En d'autres termes l'augmentation de  $r$  conduit à l'augmentation de la force, du déplacement et par conséquent de la surface de la boucle.



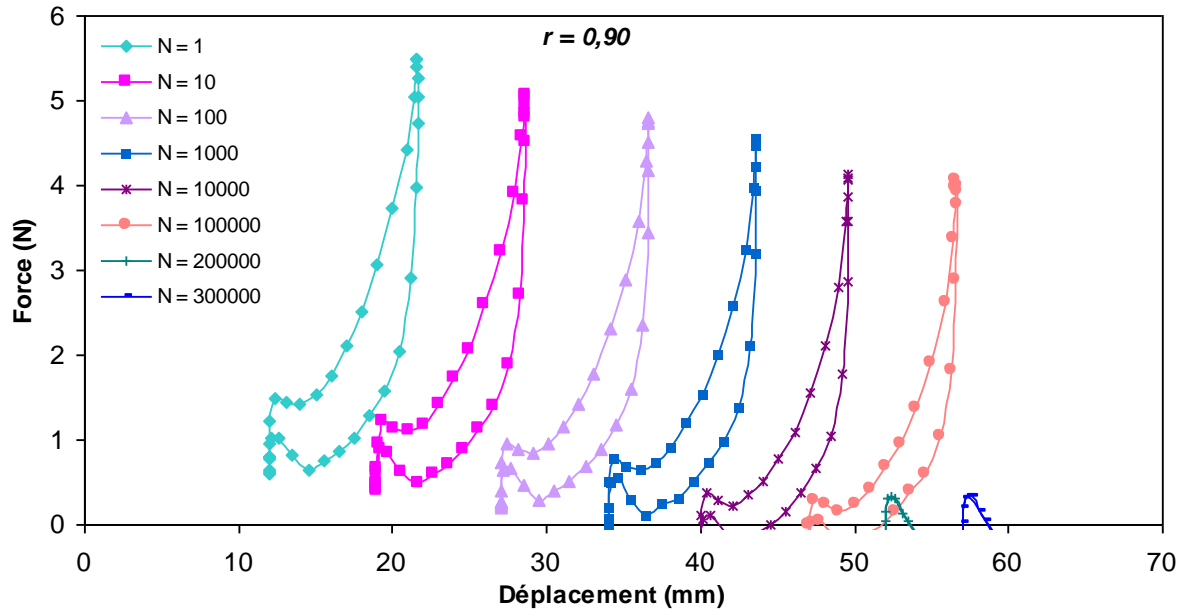
**Figure IV.7** Boucles d'hystérésis pour le premier cycle des différents niveaux de chargement utilisés.

La figure IV.7 montre l'évolution des courbes force-déplacement (boucles d'hystérésis) pour des cycles spécifiques (1, 10, 100, 1000, 10000, 100000, 200000, 300000, 400000, 500000, 600000, 700000, 800000) sollicité avec les différents niveaux de chargement étudiés (0,72 ; 0,75 ; 0,80 ; 0,85 ; 0,90). La charge est maximale lors du premier cycle est elle diminue avec l'augmentation de nombre de cycles. Il est important de signalé aussi que les boucles d'hystérésis tendent à se fermer avec l'augmentation du nombre de cycles ou encore que l'aire de la boucle d'hystérésis est inversement proportionnel au nombre de cycles et ceci est valable indépendamment du niveau de chargement.









**Figure IV.8** Boucle d'hystérésis pour différents niveaux de chargement  $r$ .

### IV.2.3 Energie dissipée

Les boucles d'hystérésis contribuent d'une façon significative à la quantification de l'énergie de dissipation ( $E_d$ ) qui représente la surface de la courbe charge-décharge. Pour un cycle donné ( $N$ ), l'énergie dissipée par unité de volume peut être déterminée par [BEZ-11]:

$$E_d = \int_{\varepsilon_{\min}}^{\varepsilon_{\max}} \sigma d\varepsilon \quad (\text{IV } 2)$$

Où  $\varepsilon_{\max}$  et  $\varepsilon_{\min}$  sont respectivement les déformations maximale et minimale.

Les figures IV.9 et IV.10 en échelle linéaire et semi logarithmique montrent respectivement la quantité d'énergie dissipée en fonction du nombre de cycles pour les différents niveaux de chargement étudiés. La variation de l'énergie dissipée par unité de volume ( $\text{mJ}/\text{cm}^3$ ) en fonction du nombre de cycles se déroule en deux phases : la première correspond à une forte diminution jusqu'à environ 20000 cycles, tandis que la deuxième phase est liée à une diminution très lente (comportement plateau) en raison de la stabilité de déformation des brins des cellules. En d'autres termes, l'énergie dissipée reste presque constante avec l'augmentation du nombre de cycle. Ceci est en bonne concordance avec les travaux de Bezazi *et al.* [BEZ-07] et [PRI-10].

L'énergie dissipée pour le premier cycle est égale respectivement 0,02 et 0,64  $\text{mJ}/\text{cm}^3$  pour le niveau le plus faible  $r = 0,72$  et le plus élevé  $r = 0,90$  ; soit une augmentation de 32 fois plus importante. Alors que pour  $N = 80\,000$  cycle l'énergie dissipée est de 0,40  $\text{mJ}/\text{cm}^3$  pour  $r = 0,90$  est donc 23,53 de fois supérieur à celle pour  $r = 0,72$  qui égale 0,017  $\text{mJ}/\text{cm}^3$ .

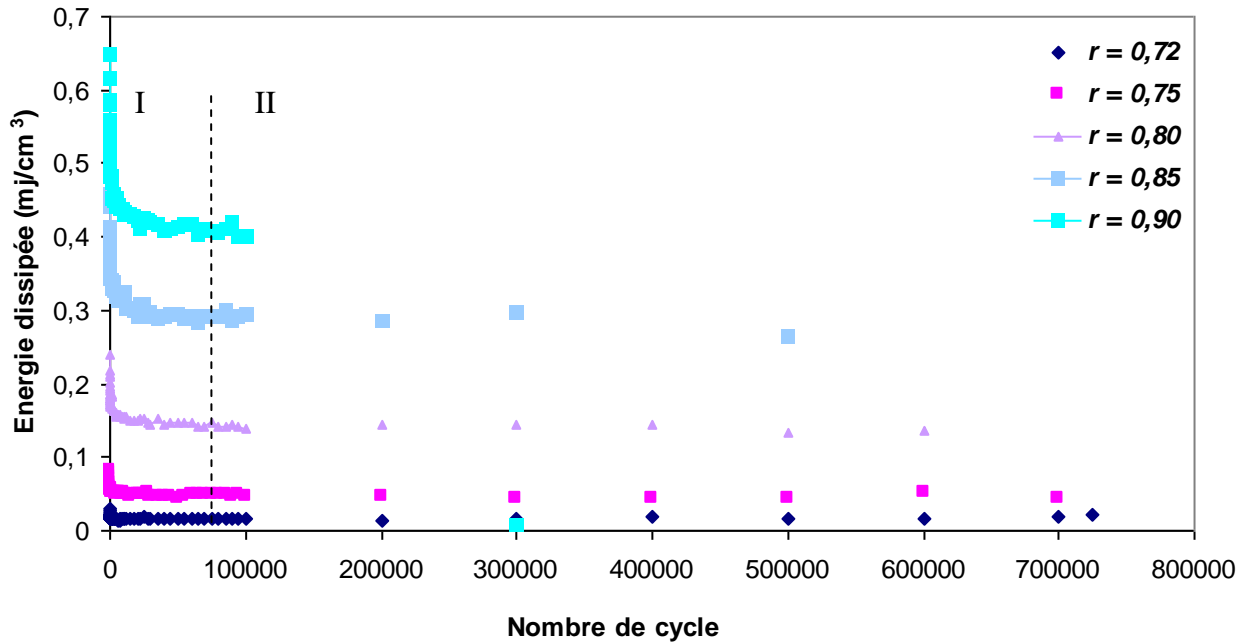


Figure IV.9 Energie dissipée  $E_d$  par unité de volume en fonction du nombre de cycle pour les niveaux de chargement étudiés.

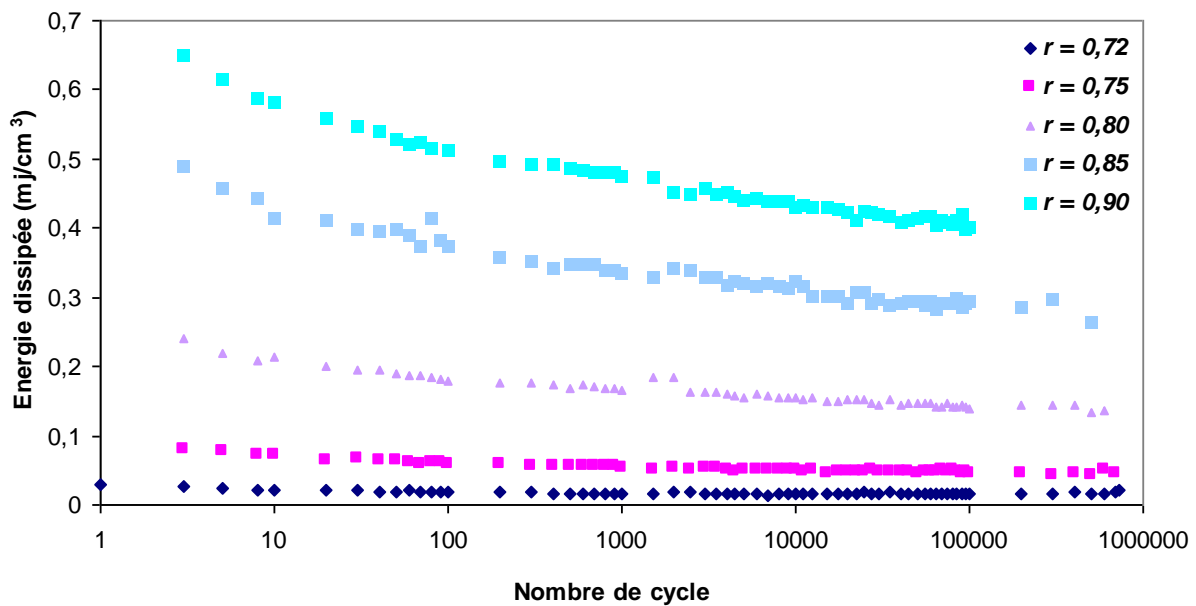
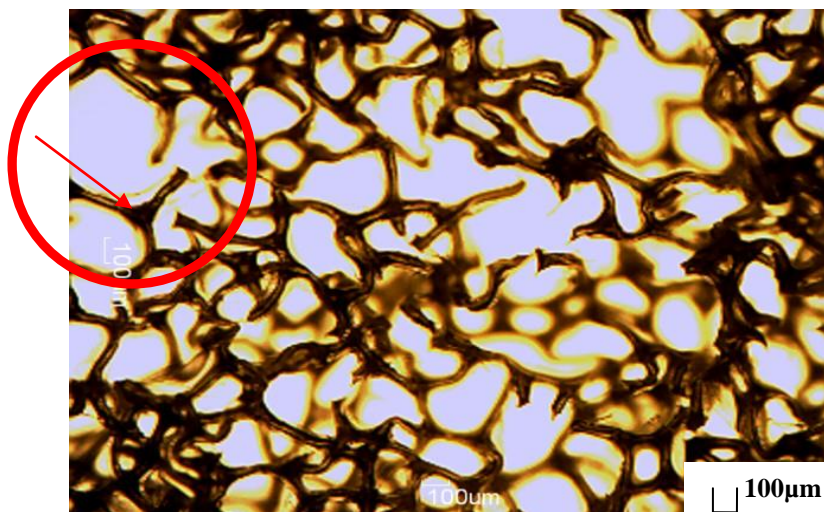


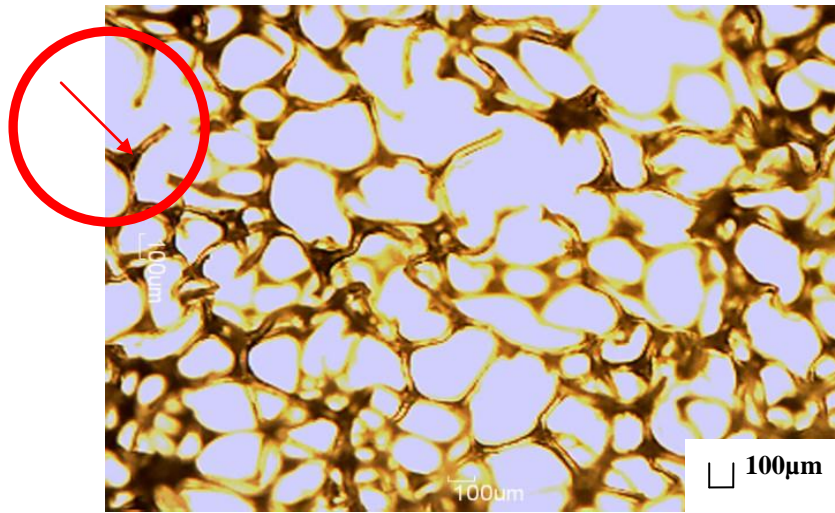
Figure IV.10 Energie dissipée  $E_d$  par unité de volume en fonction du nombre de cycle pour les niveaux de chargement étudiés présenté avec une échelle semi-logarithmique.

### IV.3 Microstructures

Il a été remarqué que les dimensions des échantillons des mousses auxétiques augmentent avec le temps est afin de mettre en évidence ce phénomène des éprouvettes ont été découpé et visualiser avec un microscope binoculaire. Après la prise successive des photos pendant 15 jours sous contrôle sans démontage de la pièce, nous avons choisi la première et la dernière photo (Figure IV.11) pour la détermination de la porosité de la mousse. Le calcul par l'intermédiaire du *Motic Image plus* de la surface des ports de la mousse pendant la première et la quinzième journée sont respectivement  $64529 \mu\text{m}^2$  et  $146995 \mu\text{m}^2$  correspondant à des porosités respectives de 52,2 et 79,0 %. Il est important de signaler donc que la porosité a augmenté de plus de 50 % après 15 jours. Cette technique de traitement permet de contrôler l'évolution de la forme des cellulaires re-entrants des mousses auxétiques.

Une mousse polyuréthane se caractérise également par la géométrie de ses cellules. [GOU-04]. Le comportement de déformation des mousses à alvéoles fermées est bien établi par Gibson et Ashby, ils ont identifié trois facteurs principaux: i) les propriétés de la matière constitutive, ii) la topologie et la forme des cellules, et iii) la densité des cellules [VIO-10]. Ce changement particulier de la microstructure de la mousse est donné par l'effet prédominant dû au mécanisme de déformation [BIA-11].





**Figure IV.11** Images microscopiques montrant l'augmentation de la porosité avec le temps.

#### IV.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présentés un suivi d'endommagement des mousses polyuréthanes flexibles à cellules ouvertes, pour ce faire nous avons effectué des essais de fatigue cyclique en compression-compression. La réalisation de ces essais nous permettra de tirer les résultats suivants :

La perte de charge  $F/F_0$  jusqu'à un million de cycle se déroule en trois phases : la première est caractérisée par une forte réduction de  $F/F_0$  dès les premiers cycles ceci est lié à la distorsion des brins des cellules, alors que pendant la deuxième phase la dégradation est plus progressive est lente et atteindre un comportement plateau. Cependant, la troisième phase se caractérise par un comportement alternatif entre un accroissement et décroissement de la perte de rigidité qui peut être due aux variations de température entre le jour et la nuit.

Les boucles d'hystérésis montre que la charge maximale est atteinte lors du premier cycle est diminuée avec l'augmentation de nombre de cycles. De plus, l'air de la boucle d'hystérésis tend à se fermer avec l'augmentation du nombre de cycles.

L'énergie dissipée par unité de volume ( $\text{mJ}/\text{cm}^3$ ) en fonction du nombre de cycles se déroule en deux phases. La première correspond à une forte diminution jusqu'à environ 20000 cycles, tandis que la deuxième phase est liée à une diminution très lente est un comportement plateau en raison de la stabilité de la déformation des brins des cellules.

# **Conclusion générale**

## Conclusion

Le phénomène de moussage des matériaux occupe une grande partie de la littérature ainsi que des recherches scientifiques anciennes et récentes à cause de leur intérêt, en outre la diversité d'application dans plusieurs domaines tel que : l'isolation thermique, l'aéronautique, les sièges de voiture, fauteuil, emballage, absorption acoustique, électroménagers ... etc.

Les différentes études mené dans ce travail sur les mousses polyuréthane à cellules ouvertes a leur état original et transformés conduit au principales conclusions suivantes :

Le comportement mécanique (force-déplacement) en compression statique des mousses polyuréthane rose et grise (originale et transformée) se déroule en trois phases : une phase linéaire suivie d'un plateau de la force et enfin une phase de densification. La phase linéaire des mousses transformées est faible par apport à celle des mousses originales.

L'effet du taux de transformation influence le comportement des mousses.

La force maximale de compression, obtenue après un déplacement de 24 mm, de la mousse grise est supérieure à celle de la mousse rose, alors q'un effet contraire est enregistré dans le cas de la traction.

Les mousses originales rose et grise ont des coefficients de Poisson maximal positifs de 0,15 et 0,25 respectivement pour des taux de compression respective de 10% et 6,67%.

La transformation des deux mousses rose et grise permet d'avoir des coefficients de Poisson négatif (Auxétique) pour toute les deux

La mousse grise se caractérise par un degré d'auxéticité beaucoup plus important ayant un coefficient de Poisson de -0,48 obtenue pour un taux de compression de 23%, alors que pour la mousse rose ce coefficient n'est que -0,30 pour un taux de compression de 50 %.

Le comportement mécanique en traction statique des mousses rose et grise transformées se déroule en deux phases non linéaires jusqu'à une valeur maximale de force, suivi par une chute brutale indiquant la rupture des éprouvettes.

La contrainte en traction statique de la mousse rose est supérieure à celle de la mousse grise.

Les dispersions enregistrées dans les résultats des essais statiques sont principalement dues à la morphologie des mousses et à la variabilité des structures aléatoire au niveau des tailles des cellules et aussi aux défauts de fabrication.

Les échantillons des mousses rose et grise testés en traction statique ne se rompent pas au milieu mais au voisinage des parties supérieur ou inférieur des étalons métalliques.

La perte de charge  $F/F_0$  jusqu'à un million de cycle, dans le cas des essais de fatigue cyclique, se déroule en trois phases : la première est caractérisée par une forte réduction de  $F/F_0$  dès les premiers cycles ceci est lié à la distorsion des brins des cellules, alors que pendant la deuxième phase la dégradation est progressive est lente et atteint un comportement plateau. Cependant, la troisième phase se caractérise par un comportement alternatif entre un accroissement et décroissement de la perte de rigidité qui peut être due aux variations de température entre le jour est la nuit.

Les boucles d'hystérésis montre que la charge maximale est atteinte lors du premier cycle est diminuée avec l'augmentation de nombre de cycles. De plus, l'aire de la boucle d'hystérésis tend à se fermer avec l'augmentation du nombre de cycles.

L'énergie dissipée par unité de volume ( $\text{mJ/cm}^3$ ) en fonction du nombre de cycles se déroule en deux phases. La première correspond à une forte diminution jusqu'à environ 20000 cycles, tandis que la deuxième phase est liée à une diminution très lente est un comportement plateau en raison de la stabilité de la déformation des brins des cellules.

## Perspectives

Les travaux future qui peuvent être envisagé par les auteurs de se travail sont :

- Le comportement en statique et en fatigue cyclique des éprouvettes cylindrique des mousses étudiés mais cette fois ci sous sollicitation en traction ;
- Fatigue statique (Fluage ou/et relaxation) des mousses (épreuve cylindrique) ;
- Transformation des mousses polyuréthane par une nouvelle technique on utilisant une auto clave ;
- Etudes en statique et en fatigue cyclique des échantillons prismatique en mousses transformé par la technique de l'auto clave ;
- Modélisation du comportement des mousses Polyuréthane sous chargement en traction et en compression.



## **Références bibliographiques**

## *Référence bibliographiques*

[ART-95] **Arthur H. Landrock**. Handbook of plastic foams types, properties, manufacture and applications. Park Ridge, New Jersey, U.S.A., 1995.

[BAS-06] **Basir Shafiq, Amilcar Quispitupa** : Fatigue characteristics of foam core sandwich composites, International Journal of Fatigue 28 (2006) 96–102.

[BEZ-07] **Abderrezak Bezazi, Fabrizio Scarpa**: Mechanical behaviour of conventional and negative Poisson's ratio thermoplastic polyurethane foams under compressive cyclic loading (2007) 922-930

[BEZ-09] **Abderrezak BEAZI, FABRISIO SCARPA**: Tensile fatigue of conventional and negative Poisson's ratio open cell PU foams, international journal of fatigue 31 (2009) 488-494.

[BEZ-11] **Abderrezak BEAZI, Nadia FRIUI, FABRISIO SCARPA**: Tensile static, fatigue and relaxation behavior of closed cell electret PVDF foams, mechanics of materials 43 (459-466).

[BIA-10] **M. Bianchi, F. Scarpa, C.W. Smith**: Shape memory behaviour in auxetic foams: Mechanical properties; Acta Materialia 58 (2010) 858–865.

[BIA-11] **M. Bianchi, F. Scarpa, M. Banse, C.W. Smith**: Novel generation of auxetic open cell foams for curved and arbitrary shapes; Acta Materialia 59 (2011) 686–691.

[BRA-01] **B BRANDEL, R. S LAKES**: Negative Poisson's ratio polyethylene foams; journal of materials science 36 (2001) 5885-5893.

[BRA-04] **B Branchel R S, LAKES**: negative Poisson's ratio polyurethane foams

[CAD-05] **F. CADAMAGNANI (2005)**: Manufacturing, Dynamic Testing and Modelling Auxetic Foams, these de master Department of Mechanical Engineerin, these (2005).

[CAR-06] **Carolina Molero, Antonio de Lucas, Juan F. Rodri'guez**: Recovery of polyols from flexible polyurethane foam by "split-phase" glycolysis with new catalysts, Polymer Degradation and Stability 91 (2006) 894-901.

[DIL-04] **THIERRY DYLLARD**. Caractérisation et simulation numérique du comportement mécanique des mousses de nickel : morphologietridimensionnelle, réponseélastoplastique et rupture. PhD thesis, école des mine de paris ; 2004.

[FRI-10] **N. Frioui a, A. Bezazi, C. Remillat, F. Scarpa , J.P. Gomez** : Viscoelastic and compression fatigue properties of closed cell PVDF foam, Mechanics of Materials 42 (2010) 189–195

[FRI-09] **Nadia FRIUI (2011)** : élaboration et caractérisation des mousses PVDF

Thèse de doctorat (2011), université de 08 mai 1945 Guelma.

**[FUT-08] Fu-Pen Chiang , Yi Ding:** Size effect on stress–strain relation of neat polyurethane foam, *Composites: Part B* 39 (2008) 42–49.

**[GAO-98] Gaoyuan Wei, S.F. Edwards:** Auxeticity windows for composites; *Physica A* 258 (1998) 5-10.

**[GOU-04] Virginie GOUSSERY-VAFIADÈS (2004) :** caractérisation microstructurale et mécanique des mousses de nickel à cellules ouvertes pour batteries de véhicules hybrides  
Thèse de doctorat (2004), Centre des Matériaux P.M. Fourt de l'Ecole des Mines de Paris

**[GUS-11] Ch. Guster, G. Pinter, A. Mösenbacher, W. Eichlseder:** Evaluation of a Simulation Process for Fatigue Life calculation of Short Fibre Reinforced Plastic Components, *Procedia Engineering* 10 (2011) 2104–2109.

**[HAR-91] G HARTWIG, S Knaak:** fatigue behaviour of polymers *Cryogenics*, Volume 31, Issue 4, April 1991, Pages 231-233.

**[HAR-01] A.-M. Harte, N.A. Fleck, M.F. Ashby:** The fatigue strength of sandwich beams with an aluminium alloy foam core, *International Journal of Fatigue* 23 (2001) 499–507.

**[KAM-05] Kouichi KamiutoT, San San Yee:** Heat transfer correlations for open-cellular porous materials; *International Communications in Heat and Mass Transfer* 32 (2005) 947–953.

**[LAK-87] LAKES, R:** Foam structures with a negative Poisson's ratio, *Science* (1987) 235:1038–1040

**[LAU-09] Laurent Mezeix, Christophe Bouvet2 et Dominique Poquillon :** Matériaux élaborés à partir de fibres enchevêtrées pour une application coeur de structure sandwich, *JNC* 16 – Toulouse 2009.

**[LEH-02] D. LEHMUS, C. MARSCHNER, J. BANHART:** Influence of heat treatment on compression fatigue of aluminium foams, *journal of materials science* 37 (2002) 3447 -8 3451.

**[LOR-05] Lorna J. Gibson:** Biomechanics of cellular solids; *Journal of Biomechanics* 38 (2005) 377–399.

**[MAC-95] MACIEJ WRONSKI:** A new hypoelastic model of the mechanical behaviour of polyurethane foams, *Computational Materials Science* 5 (1996) 271-276.

**[MAT-10] Matteo Bianchi (2010):** Open cell PU-PE Auxetic foams: structural and these Dynamic aspects, these de doctorat Department of Aerospace Engineering University of Bristol

**[OHT-03] R OHTANI:** High-temperature fatigue; *Comprehensive Structural Integrity*, Volume 4, 2003 pages 327-344.

**[PAU-10] PAUL ARTHUR TRUDEAU (2010):** analysis and optimisation of a new method for creating sandwich composites using polyurethane foam, these (2010).

**[PAS-04] P PASTORINO (2004):** Testing Modelling of Auxetic Thermoplastic Foams These de master Department of mechanical engineering.

**[PIC-10] Pascal Pichon (2010) :** fatigue thermomécanique des elastomeres polyuréthane caractérisation expérimentale de l'évolution des microstructures et modélisation des échancres thermique, thèse de doctorat (2010) école doctorale matériaux de Lyon.

**[PRI-10] M.A. Di Prima, K. Gall, D.L. McDowell, R. Guldberg, A. Lin, T. Sanderson, D. Campbell, S.C. Arzberger:** Cyclic compression behaviour of epoxy shape memory polymer foam, *Mechanics of Materials*, Volume 42, Issue 4, April 2010, Pages 405-416.

**[SHE-01] Y. Shen, F. Golnaraghi, A. Plumtree:** Modelling compressive cyclic stress–strain behaviour of structural Foam, *International Journal of Fatigue* 23 (2001) 491–497.

**[SMI-00] C. W. SMITH, J. N. GRIMA and K. E. EVANS:** a novel mechanism for generating auxetic behaviour in reticulated foams missing rib foam model, *acta mater* 48 (2000) 4349-4356.

**[VAZ-01] Fatima Vaz M, Fortes M A:** Simulation of collapse in the compression of non-uniform cellular solids. *Scripta Materialia*, 45, P375-382, 2001.

**[VIO-10] P. Viot ,R.Bouix, I.Iordanoff, JL.Lataillade :** Deformation localisation modelling of polymer foam microstructure under compression : A new approach by discrete element modelling, *Composite structures* 92 ( 2010) 585-592.

**[WHI-03] J.P.M. Whitty, A. Alderson, P. Myler, B. Kandola:** Towards the design of sandwich panel composites with enhanced mechanical and thermal properties by variation of the in-plane Poisson's ratios; *Composites: Part A* 34 (2003) 525–534.

**[WID-08] R.D. Widdle Jr., A.K. Bajaj, P. Davies:** Measurement of the Poisson's ratio of flexible polyurethane foam and its influence on a uniaxial compression model; *International Journal of Engineering Science* 46 (2008) 31–49.

**[WRO-99] Maciej Wronski :** A new hypoelastic model of the mechanical behaviour of polyurethane foams, *Computational Materials Science* 5 (1996) 271-276.

**[YAN-03] D.U. Yang, S. Lee, F.Y. Huang:** Geometric effects on micropolar elastic honeycomb structure with negative Poisson's ratio using the finite element method, *Finite Elements in Analysis and Design* 39 (2003) 187–205.

**[[www.fabrication des mousses.com](http://www.fabrication-des-mousses.com)].**

**[[fr.wikipedia.org/wiki/Polyuréthane](http://fr.wikipedia.org/wiki/Polyuréthane)].**

**[[www.toiture-isolation.com](http://www.toiture-isolation.com)].**