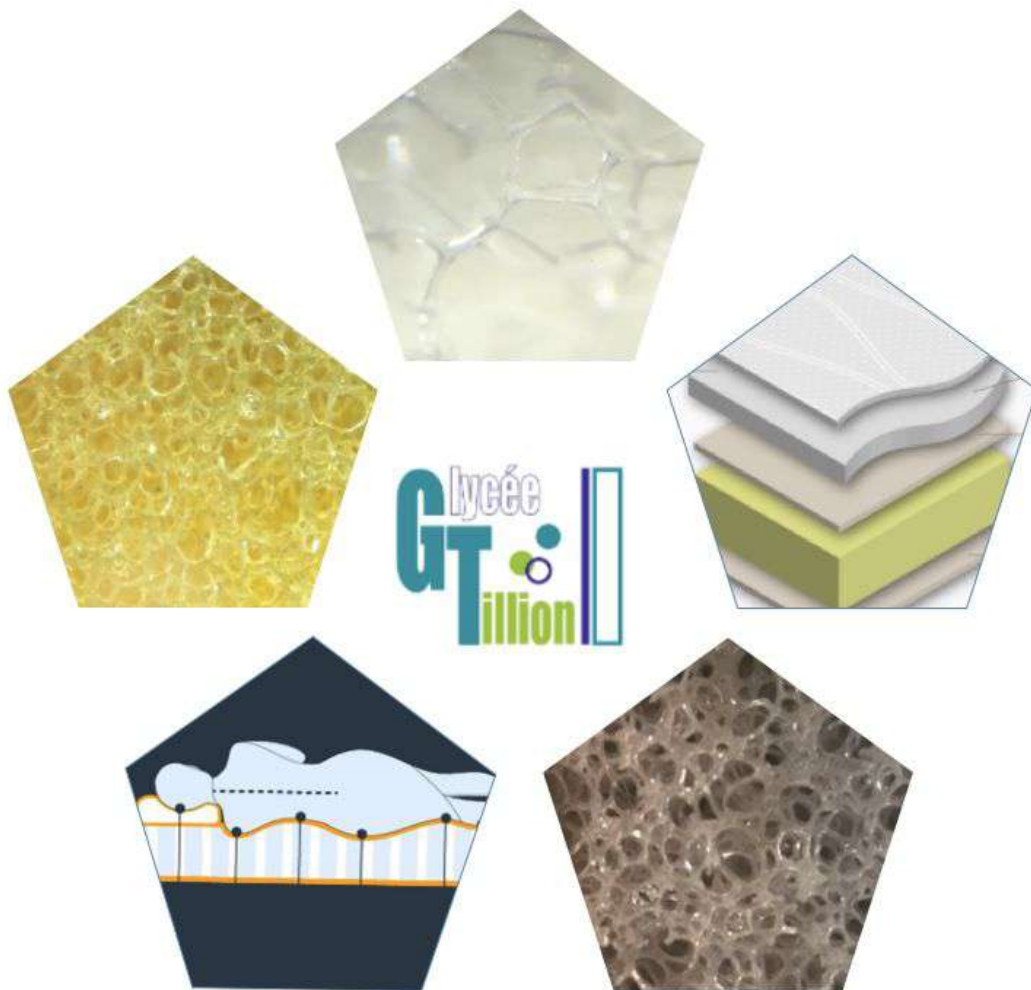


AIGOIN Justine
AMÉDÉE Charlotte
BORDEREAU Félice
LAVIRON Camille
LEOUFFRE Victor



UN COUP DE MOUSSE POUR BIEN DORMIR !



Année 2020-2021

SOMMAIRE

Avant-propos	3
Introduction	3
I. Définition des mousses	4
<i>A. Mousses en général</i>	4
1. Mousses liquides	4
2. Mousses solides	4
<i>B. Fabrication des mousses</i>	5
1. Fabrication d'une mousse liquide	5
2. Les mousses polymères et leur fabrication	6
<i>C. Les mousses polyuréthanes</i>	7
1. Caractéristiques et structure	7
2. Fabrication de la mousse polyuréthane	7
II. Arrangement des bulles dans une mousse	7
<i>A. Structure des mousses</i>	8
1. Les lois de Plateau	8
2. Structure des mousses 2D : géométrie et topologie	8
<i>B. Mûrissement, drainage et coalescence</i>	9
1. Les lois de Laplace : évolution d'une bulle dans une mousse	9
2. Mûrissement	9
3. La coalescence	10
4. Le drainage	11
5. Interactions entre coalescence, mûrissement et drainage.	11
III. Mécanique des mousses et interactions	12
<i>A. Compression des mousses</i>	13
<i>B. Résistance des mousses face à l'application d'un poids</i>	13
<i>C. La résilience des mousses</i>	15
<i>D. Module d'Young et température de transition vitreuse</i>	16
<i>E. Mousse mémoire de forme</i>	17
<i>F. Cellules ouvertes et résistance</i>	18
Conclusion	19
Remerciements	20
Sitographie	20

AVANT-PROPOS

Les mousses sont des matières très complexes : qu'elles soient thermoformables, plus ou moins denses ou encore de compositions différentes, elles possèdent toutes leurs propres caractéristiques !

Nous avons décidé d'étudier la composition des mousses ainsi que certaines de leurs propriétés (densité, résistance, ...), et ce au travers des matelas.

En effet, ils sont faits de diverses mousses, chacune adaptée à des situations spécifiques.

Pour étudier tous ces points, Joël Reignier, chercheur en Ingénierie des Matériaux Polymères à l'INSA Lyon, nous a apporté son aide précieuse.

Notre démarche expérimentale nous permet d'y voir plus clair sur la question :

Comment choisir, selon l'individu, la meilleure mousse pour son matelas?

Par notre étude, les matelas n'auront bientôt plus de secret pour vous !

INTRODUCTION

En observant autour de nous, on peut se rendre compte que la mousse est présente partout. En effet, que ce soit sous forme naturelle : écume de mer, pierre ponce... ou inventée par l'Homme : pain, isolant, matelas, la mousse est constamment sollicitée au quotidien. Mais, nous avons aussi réalisé que les connaissances sur cette structure nous étaient très limitées. Ainsi, nous avons voulu nous y intéresser de plus près.

Un humain dort en moyenne 25 ans, soit presque le tiers de son existence sur Terre. Il est donc important de bien choisir le support de ses nuits ! Nous avons alors décidé de nous intéresser plus particulièrement aux matelas.

Alors, **comment choisir la meilleure mousse pour son matelas ?**

Dans une première partie, nous étudierons la définition de la mousse ainsi que sa fabrication. Puis, nous nous intéresserons à l'arrangement des bulles et des pores dans la mousse. Enfin, nous terminerons par étudier la mécanique des mousses et ses interactions avec l'extérieur.

I. Définition des mousses

A. Mousses en général

La mousse peut être définie comme un système complexe composé de deux phases:

- La première est gazeuse : la mousse est une matrice polymère remplie de gaz. Elle a donc une faible densité.
- La deuxième phase peut être liquide ou solide. Selon sa nature, elle classe donc la mousse dans une catégorie : mousse liquide ou mousse solide.

1. Mousses liquides

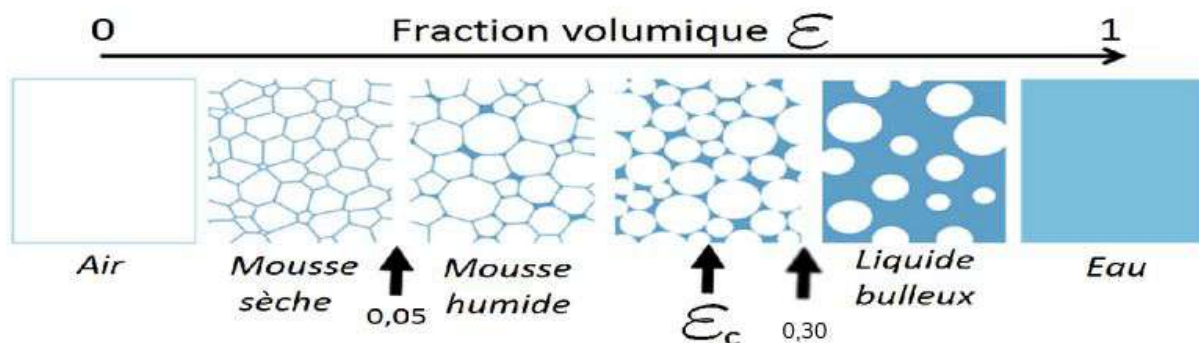
Les mousses liquides sont caractérisées par un assemblage de deux phases : une phase liquide et une phase gazeuse. Dans le cas d'une mousse de savon par exemple, on peut définir ce système comme un empilement de bulles de savon où la phase liquide est l'eau savonneuse et la phase fluide est l'air. La mousse liquide a une très grande surface spécifique (surface/volume).

Au sein des mousses liquides, nous distinguons les mousses sèches et les mousses humides. On dit qu'une mousse est sèche lorsque la fraction volumique du liquide (ε) est inférieure à 0,05 et qu'elle est humide lorsque ε est compris entre 0,05 et 0,30.

La fraction volumique d'une mousse (ou fraction liquide) est la quantité de liquide contenu dans la mousse. Elle s'obtient en divisant le volume de liquide présent dans la mousse par le volume total de la mousse.

Une mousse liquide ne peut pas avoir un ε supérieur à 0,30, autrement c'est un liquide bulleux. On remarque donc que plus le ε augmente plus les bulles sont dispersées.

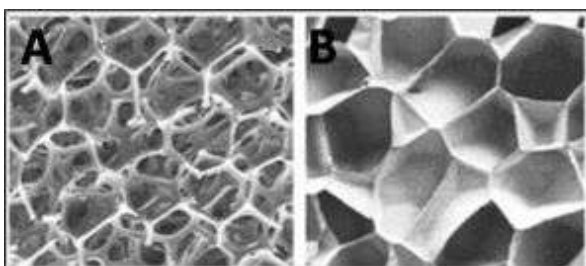
On désigne par ε_c la limite en dessous de laquelle les bulles perdent leur aspect sphérique et deviennent des cellules.



Thèse : *Stabilité-et-rhéologie-des-mousses-d'émulsions-Schneider*

2. Mousses solides

La mousse solide est un matériau poreux dont les pores sont remplis de gaz. Elle forme donc un réseau interconnecté de cellules. Ces dernières sont constituées de plusieurs faces et chacune est délimitée par un bord solide. Les bords formés par la rencontre de deux faces sont appelés arêtes. Ce sont les parties solides de la mousse.



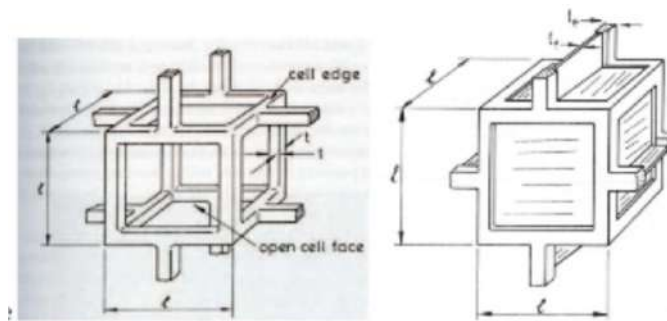
exemples de microstructures d'une mousse:
A- polyuréthane à porosité ouverte; **B-** polyéthylène à porosité fermée

Polymeric Foams Structure-Property-Performance. DOI

Un coup de mousse pour bien dormir!

Les mousses peuvent être partagées en deux types : les matériaux poreux dits à “porosité ouverte” où le gaz circule librement et les matériaux poreux dits à “porosité fermée” où le gaz ne circule pas. Les mousses à cellules ouvertes se caractérisent par une interconnexion entre des pores voisins. Deux pores adjacents sont séparés par des faces trouées, seules les arêtes délimitent les cellules. Inversement, les mousses à cellules fermées sont déterminées par deux pores séparés par des faces pleines. Il y a donc une absence d’interconnexion entre les pores voisins. Ces différentes structures dépendent des techniques de fabrication.

Structure de la cellule d’une mousse polyuréthane:



Modèle de cellule ouverte

Modèle de cellule fermée

Contribution à la modélisation du comportement visco-hyper-élastique de mousse polyuréthane

Les cellules peuvent être classées suivant leur taille. Il en existe deux catégories : les microcellulaires de l’ordre du μm et les nanocellulaires (nm), 1000 fois plus petites. Dans ce rapport, nous ne traiterons que des mousses polymères mais il existe aussi des mousses réalisées avec des métaux, des céramiques ou des verres.

B. Fabrication des mousses

1. Fabrication d’une mousse liquide

Nous avons fabriqué une mousse liquide avec des blancs d’oeufs que nous avons montés en neige. Nous sommes partis d’une base liquide dans laquelle nous avons incorporé de l’air à l’aide d’un batteur électrique. Une fois la mousse formée nous avons pu l’observer à la loupe binoculaire et remarquer que les structures sont semblables à celles des mousses solides.



Photos de nos expériences

On observe ici une mousse liquide.

2. Les mousses polymères et leur fabrication

En général, il existe deux types de fabrication des mousses solides : une première mise en œuvre consiste à solidifier une mousse liquide et une autre permet de fabriquer une mousse solide directement (sans passer par une mousse liquide).

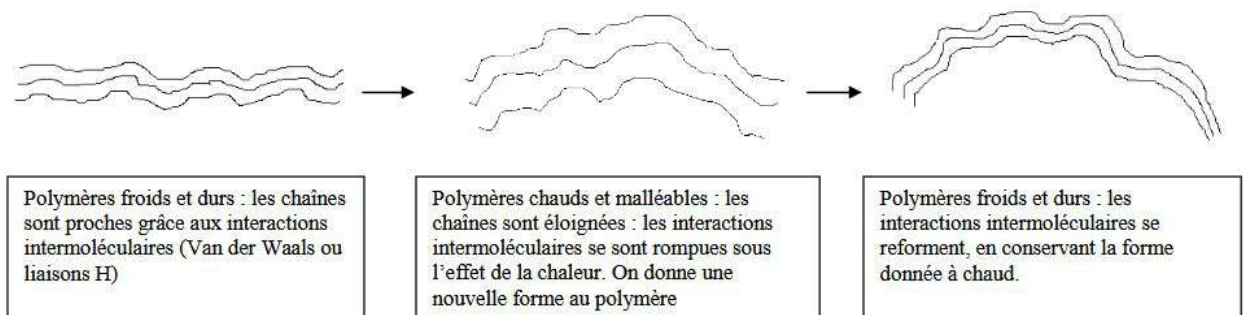
Plus précisément, il existe deux grandes familles de mousses polymères : les mousses thermoplastiques et les mousses thermodurcissables.

Les polymères sont des macromolécules : grande molécule constituée d'unités qui se répètent et qui dérivent de monomères.

Polymérisation : réaction qui assemble les monomères en macromolécules.

Exemple : Le polyéthylène (PE) : $\dots\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-CH}_2\text{-}\dots$

Les **mousses thermoplastiques** (ex : polystyrène) sont des mousses amorphes ou semi-cristallines qui prennent une structure visqueuse quand elles sont fondues. Leur fabrication se fait par chauffage du matériau suivi d'une insertion de gaz pour créer la mousse. En effet, c'est l'augmentation de la température et l'incorporation du gaz (on parle d'agent gonflant) qui rend la matière suffisamment fluide pour permettre l'expansion des bulles après la phase de nucléation. Si la matière n'est pas assez fluide, il est impossible d'atteindre de faibles densités.

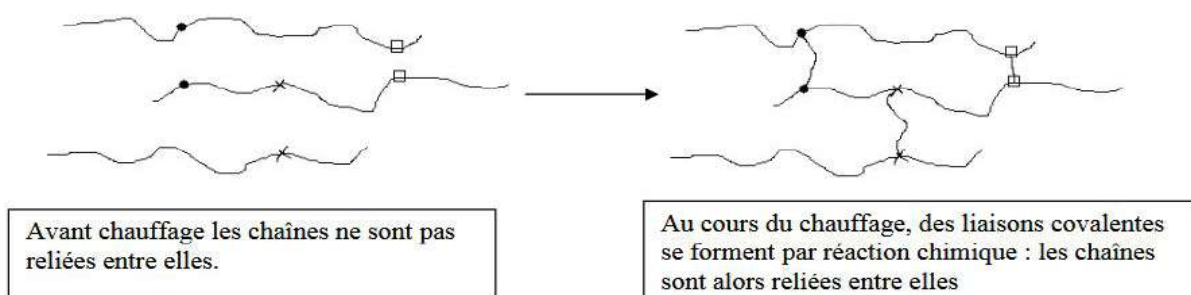


cours sur les polymères,cndp.fr

Les **mousses thermodurcissables** (ex : les polyuréthanes) ont quant à elles une structure figée. Elles se forment par réaction chimique qui transforme les réactifs liquides en produits rigides. Cette réaction a lieu grâce à des catalyseurs et/ou une forte température.

Sous l'effet de la chaleur, il devient dur et ne peut plus fondre. Une nouvelle hausse de température mènerait à une destruction du polymère.

Explication : les polymères thermodurcissables sont réticulés : ils sont obtenus par réaction chimique : les réticulations (liaisons covalentes) sont formées au cours du chauffage et ne peuvent ensuite plus être rompues.



cours sur les polymères,cndp.fr

C. Les mousses polyuréthanes

1. Caractéristiques et structure

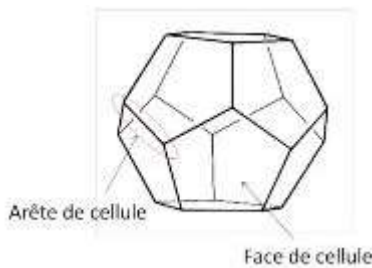
Le polyuréthane est un produit résultant d'un polyol (HO-R-OH) et d'un polyisocyanate. Ce sont des polymères de structures - (O-R-O) - (CO NH-R'-NH-CO) - (avec R et R' des groupes organiques). Selon R et R', on obtient des applications diverses du polyuréthane parmi lesquelles environ 70% servent à la production de mousses.

La mousse polyuréthane est la mousse la plus utilisée pour la fabrication des matelas. Elle se caractérise par une forte résistance et fermeté ainsi que par une faible densité.

Il existe des mousses polyuréthanes souples, semi-rigides ou rigides. Cette caractérisation dépend de la température de transition vitreuse (Tg).

La température de transition vitreuse d'un polymère est la température à laquelle le polymère passe d'un état vitreux à caoutchouteux. En dessous de cette température, la mousse est rigide, au-dessus elle est flexible. Dans le cas des matelas, on reste dans le domaine flexible et on ajuste la Tg en fonction de la mousse voulue. Cette température dépend de la structure du polyuréthane mais aussi des additifs utilisés lors de la fabrication.

La structure de la cellule de la mousse de polyuréthane est la représentation tridimensionnelle d'une cellule en forme de dodécaèdre pentagonal.



Structure de la cellule de la mousse polyuréthane structure de dodécaèdre pentagonal, c'est à dire un volume possédant 12 faces de formes pentagonales (5 côtés)

Contribution à la modélisation du comportement visco-hyper-élastique de mousse polyuréthane

2. Fabrication d'une mousse polyuréthane

La fabrication des mousses polyuréthanes est majoritairement basée sur le principe d'expansion. On crée une mousse liquide puis on fige cette structure durant la formation des cellules. Il est donc très important de figer la mousse au bon moment pour que les cellules soient ni trop fermées ni trop ouvertes. En effet, des cellules trop ouvertes font perdre la propriété de soutien de la mousse et des cellules trop fermées font perdre la propriété de souplesse de la mousse.

Cette fabrication explique donc le fait que les mousses polyuréthanes ont la même morphologie cellulaire que les mousses liquides.

II. Arrangement des bulles dans une mousse

Pour comprendre les différentes caractéristiques des mousses, nous avons ensuite décidé d'étudier l'arrangement des bulles dans la mousse et les phénomènes qui régissent les cellules. Les mousses solides que nous avons étudiées sont des mousses liquides figées, il n'est donc pas possible d'observer les interactions entre les cellules. Pour comprendre ces phénomènes, nous allons donc nous y intéresser dans les mousses liquides. Nous allons en premier lieu étudier la structure d'une mousse, puis étudier les phénomènes de drainage, de mûrissement et de coalescence.

A. Structure des mousses

1. Les lois de Plateau

Dans une mousse, les bulles sont pressées les unes contre les autres.

L'intersection entre deux bulles forme un film de savon. Si l'on ajoute une troisième bulle, les films se rejoignent en une arête appelée bord de Plateau. Lorsqu'une quatrième s'ajoute, apparaît alors un sommet appelé vertex à l'intersection de quatre bords de Plateau. L'ensemble des lois régissant la structure d'une mousse sont appelées les lois de Plateau, établies par le physicien belge Joseph Antoine Ferdinand Plateau en 1873 :

Première Loi de Plateau :

La courbure moyenne d'un film séparant deux bulles est constante. Ainsi la convexité du film est donnée par la différence de pression entre les deux bulles.

Deuxième loi de Plateau :

Les films se rejoignent toujours par trois pour former un bord de Plateau avec un angle de 120° entre les films.

Troisième loi de Plateau :

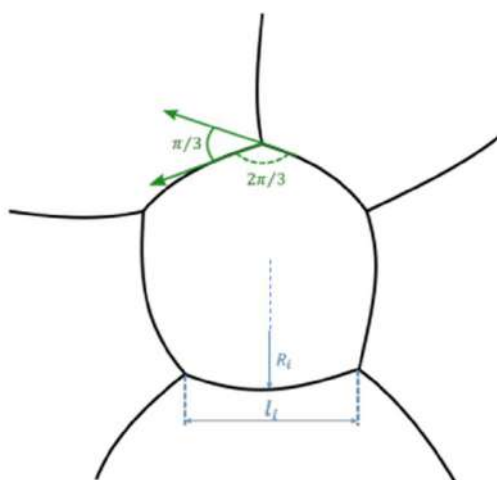
Quatre bords de Plateau se rejoignent en un vertex avec un angle de 109.5° entre les bords.

2. Structure des mousses 2D : géométrie et topologie

Lorsqu'on confine une mousse entre deux plaques, la mousse prend la forme d'une monocouche de bulles. On l'appelle alors mousse 2D, mais malgré la couche unique de bulle, la mousse 2D a une structure tridimensionnelle.

Nous pouvons alors montrer qu'il existe un lien entre le nombre de voisines d'une bulle et la courbure des parois de celle-ci dans une mousse 2D :

Réalisons un court voyage autour de cette bulle :



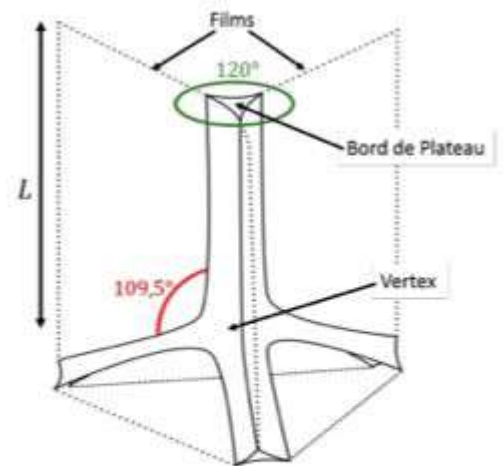
Thèse Mûrissement et coalescence de mousses liquides : Représentation d'une bulle à cinq côtés de rayon de courbure R_j et de largeur de côté L_j .

Sur la figure, en suivant le contour d'une bulle avec n côtés, la rotation effectuée par la tangente à ce contour est donnée par le rapport L/R où L est la longueur du côté considéré et R le rayon de courbure de ce côté.

De plus, au passage d'un vertex, la tangente tourne de $\pi/3$ à cause des lois de Plateau. Après un tour complet de la bulle, la tangente a tourné de 2π .

On a donc :

$$\sum_{j=1}^n \frac{L_j}{R_j} + n \frac{\pi}{3} = 2\pi \quad \Leftrightarrow \quad \sum_{j=1}^n \frac{L_j}{R_j} = (6-n) \frac{\pi}{3}$$



Mûrissement et coalescence de mousses liquides. : Représentation schématique des différentes lois de Plateau pour une mousse 3D

En conclusion : Etude de la convexité des bulles

D'après la formule précédente, nous pouvons établir que :

- Si la bulle a plus de 6 côtés : la valeur précédente est négative, les faces seront donc convexes.
- Si la bulle possède exactement 6 côtés : la courbure est nulle et les côtés de cette bulle seront droits.
- Si la bulle a moins de 6 côtés : la valeur donnée devient positive et les faces seront concaves.

Donc le nombre de côtés de la bulle a des conséquences sur sa forme, ce qui aura des répercussions sur sa durabilité comme nous allons le voir.

B. Mûrissement, drainage et coalescence

1. Les lois de Laplace : évolution d'une bulle dans une mousse

Pour comprendre l'évolution d'une bulle dans une mousse au cours du temps, et donc l'évolution d'une mousse au cours de sa formation, il faut faire intervenir les lois de Laplace.

Une bulle est une petite sphère de gaz entourée d'un liquide. En raison de la tension superficielle du liquide, les films de liquide sont dotés d'une certaine élasticité et il faut dépenser un peu d'énergie pour les étirer et permettre la formation de la bulle. Les forces de tension superficielle ont tendance à faire contracter la bulle, par conséquent la pression à l'intérieure de la bulle P_{int} va être supérieure à la pression extérieure P_{ext} .

Une bulle tend, naturellement, à prendre la forme qui lui permet d'enfermer un volume de gaz donné dans une surface d'aire minimale.

La pression à l'intérieur d'une bulle est légèrement supérieure à celle de l'extérieur. Elle est donnée par la formule de Laplace :

$$P_{int} = P_{ext} + 4\gamma / R \quad \text{avec } P_{int} : \text{pression à l'intérieur de la bulle en Pa.}$$

$$P_{ext} : \text{pression à l'extérieur de la bulle en Pa.}$$

$$\gamma : \text{tension superficielle en N.m}^{-1}$$

$$R : \text{rayon de la bulle en m.}$$

On peut déjà remarquer que la différence de pression est d'autant plus importante que la bulle est petite (R petit) ce qui va avoir des conséquences sur le vieillissement de la mousse liquide.

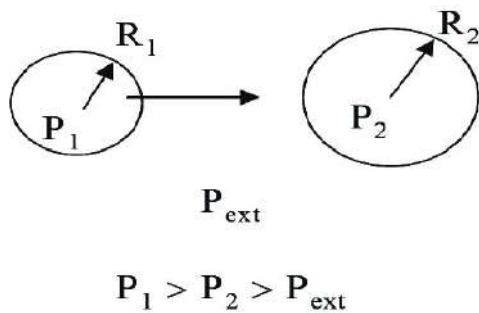
2. Mûrissement :

Une mousse est constituée de bulles jointives, c'est-à-dire qu'un gaz est contenu dans une enveloppe liquide, en l'occurrence dans les bulles. Toutefois, ce gaz peut être plus ou moins soluble dans le liquide qui l'entoure, ce qui lui permet de diffuser dans d'autres bulles.

La diffusion est due dans le même temps à une différence de pression de part et d'autre d'une interface due à la courbure de celle-ci (Loi de Laplace précédente).

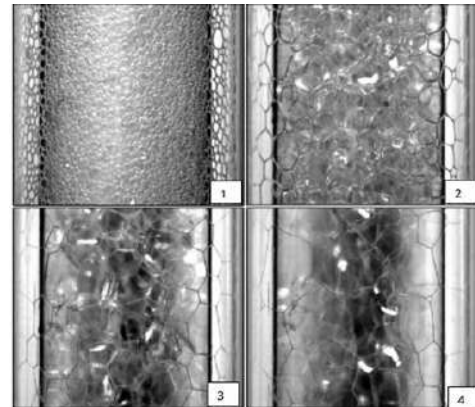
Les bulles en surpression sont de forme convexe et le gaz qu'elles contiennent se diffuse vers les bulles concaves en sous-pression. Certaines bulles vont donc diminuer de taille au profit d'autres en leur transmettant leur gaz. La conséquence de ce processus est une diminution du nombre total de bulles et une augmentation de la taille moyenne des bulles. Pour rappel, les plus petites bulles ont une surpression plus importante que les plus grandes, ce qui tend à les faire disparaître en premier au profit des plus grandes.

Ainsi, les bulles avec un nombre de côtés inférieur à six vont perdre leur gaz et diminuer de taille jusqu'à disparaître. Au contraire, les bulles avec un nombre de voisines supérieur à six vont récupérer du gaz et donc grossir.



Représentation schématique du mûrissement

Le gaz contenu dans la petite bulle se diffuse vers la plus grosse, où la pression est moins élevée.



Différentes étapes du phénomène de mûrissement d'une mousse de savon.

3. La coalescence

La coalescence est due à la rupture d'un film séparant deux bulles. [La raison de cette rupture est toujours mal comprise aujourd'hui et a suscité un certain nombre d'études donnant lieu à trois hypothèses majeures : la présence d'une fraction liquide critique, d'une pression capillaire critique ou d'une taille de bulles critique.]

De plus, la rupture d'un film engendre la plupart du temps un phénomène d'avalanche : en se rompant, deux bulles se rejoignent en une seule, causant de nouvelles perturbations pouvant potentiellement déstabiliser les bulles voisines, entraînant de nouvelles ruptures. Contrairement au mûrissement qui survient sur l'ensemble de la mousse, la coalescence est un phénomène localisé. S'il se manifeste en plusieurs points de la mousse pour des raisons différentes, il n'est que très rarement homogène à l'échelle de la mousse. On peut bien voir sur les images ci-dessous que le phénomène de coalescence est très irrégulier.

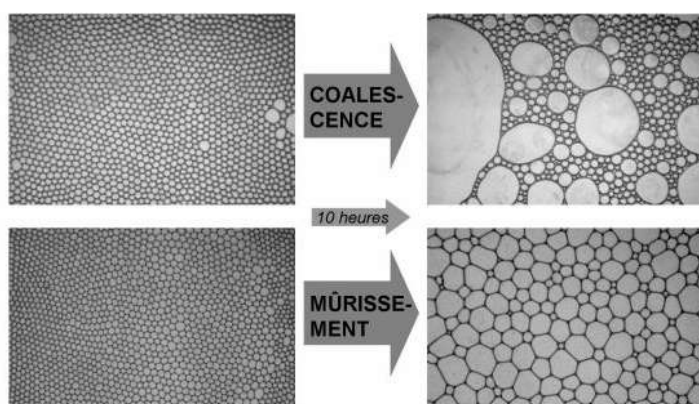


Figure : Evolution de deux mousses au cours du temps : la première (en haut) évolue essentiellement par des événements localisés de coalescence. La seconde (en bas) évolue par mûrissement, de manière homogène dans toute la cellule.

Nous pouvons essayer de comprendre l'intérêt pour deux bulles de tailles identiques de fusionner pour n'en former plus qu'une en basant le raisonnement sur la tension superficielle qui tend à minimiser la surface pour maximiser le volume.

La forme "naturelle" d'une simple bulle est sphérique car c'est la forme qui permet d'enfermer un volume maximal ($V = \frac{4}{3} \pi R^3$) pour une surface minimale ($S = 4 \pi R^2$)

Le volume total de deux bulles de rayons identiques est donc $V = 2 \times \frac{4}{3} \pi R^3 = \frac{8}{3} \pi R^3$

Une seule bulle résultant de la fusion de ces deux bulles aura donc le même volume, et on peut en déduire son propre rayon R' : $\frac{8}{3} \pi R^3 = \frac{4}{3} \pi R'^3$ Soit $R' = 2^{1/3} R$

La surface des deux bulles séparées, elle, a pour expression : $S = 2 \times 4 \pi R^2$

La bulle formée par la fusion de ces bulles a pour rayon R' , soit une surface S' telle que :

$$S' = 4 \pi R'^2 = 4 \pi (2^{1/3} R)^2 = 4 \pi 2^{2/3} R^2$$

La comparaison des deux surfaces : $S'/S = (4 \pi 2^{2/3} R^2) / (2 \times 4 \pi R^2) = 2^{2/3} / 2 = 0,8$ (80%)

La surface est donc minimiser lors de la fusion de deux bulles pour un même volume, la tension superficielle tend donc à encourager le phénomène de coalescence des bulles.

4. Le drainage

Le drainage est l'écoulement de liquide entre les bulles à cause de la gravité. Cet écoulement irréversible va entraîner un assèchement progressif de la mousse et un changement de la forme des bulles qui deviennent progressivement polyédriques avec un amincissement des bords de Plateau.

5. Conclusion de la partie B : Interactions entre coalescence, mûrissement et drainage

Le mûrissement et la coalescence augmentent la taille des bulles au cours du temps, ce qui augmente la largeur des bords de Plateau permettant au liquide de s'écouler plus facilement entre les bulles, et accélérant ainsi le drainage. Il assèche les films entre les bulles facilitant la diffusion de gaz entre les bulles et le mûrissement est accéléré à son tour.

Ces phénomènes et en particulier celui du mûrissement permettent d'obtenir la mousse la plus uniforme possible nécessaire à l'accueil d'un corps endormi. Les fabricants décident de figer la mousse au moment où l'homogénéité des bulles est la meilleure possible pour obtenir des mousses uniformes.

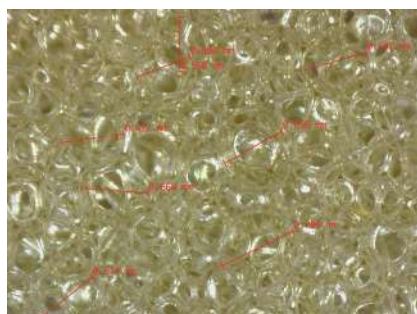
III. Mécanique des mousses et interactions

Les mousses ont des propriétés mécaniques qui leurs sont propres, et qui peuvent varier, selon beaucoup de paramètres, d'une mousse à une autre. Nous avons donc cherché à montrer les différences des propriétés mécaniques relatives aux mousses parmi nos échantillons, d'abord à l'échelle microscopique à l'aide d'un microscope USB pour mieux saisir les conséquences de ces propriétés sur une cellule, puis à l'échelle du bloc de mousse pour cette fois-ci comprendre le comportement d'un matelas.

Grâce à deux magasins de literie situés à Villefranche-sur-Saône(69), nous avons pu récupérer neuf échantillons de mousses : cinq échantillons de mousse polyuréthane de densités et de fermetés différentes, puis quatre échantillons de mousses Bultex®, qui sont aussi de nature polyuréthane, de densités semblables : un polyuréthane ordinaire, une mousse thermoflexible ou dite “à mémoire de forme” et deux mousses haute résilience “nano”.

mousse 25	mousse 30	mousse 35F	mousse 35	mousse 40	bultex ordinaire	bultex nano beige	bultex nano grise	mémoire de forme
--------------	--------------	---------------	--------------	--------------	---------------------	----------------------	----------------------	---------------------

Nous avons donc observé les différents blocs de mousse au microscope USB avec un grossissement x95. Tout d’abord nous avons photographié les mousses sans contrainte appliquée (image 1a, 2, 3 et 4) puis en les compressant (image 1b).



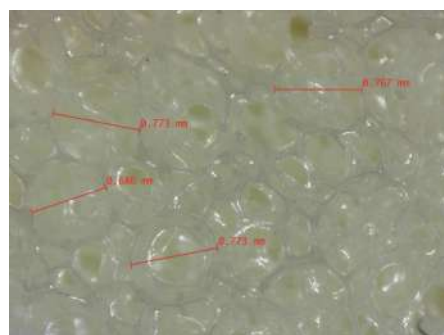
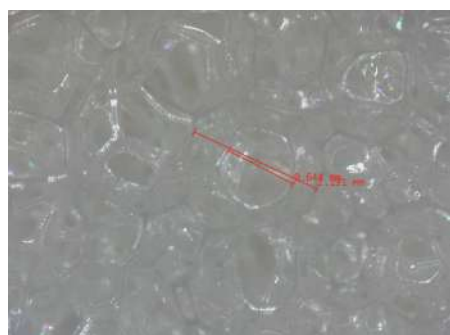
Images 1.a) et 1.b) : mousse 35F au microscope USB sans contrainte (a) puis compressée (b)



Montage d’observation des mousses au microscope USB



Image 2: mousse 35 observée au microscope USB sans contrainte



Images 3 et 4 : mousses respectivement polyuréthane Bultex ordinaire, et mémoire de forme, observées au microscope USB sans contrainte

Nous avons ainsi obtenu des résultats similaires pour toutes les mousses étudiées. On observe bien des cellules de forme dodécaèdre pentagonale qui sont caractéristiques des mousses polyuréthanes. On remarque aussi que les arêtes de certaines mousses sont plus épaisses que sur d'autres. Cette épaisseur est due au phénomène de drainage lors de la fabrication.

En comparant les images d'une mousse non compressée avec celles d'une mousse compressée, on remarque que les cellules perdent leur aspect sphérique et s'écrasent dès la présence d'une contrainte. On ne peut cependant pas effectuer de mesures exploitables des cellules compressées de la mousse car la déformation est trop importante.

En revanche, nous avons pu réaliser des mesures de cellules lorsqu'il n'y avait aucune contrainte et ainsi remarquer qu'elles étaient toutes d'une taille proche de 600 à 780 nm. Nous avons donc des cellules de l'ordre de grandeur du micromètre.

A. Compression des mousses

Pour comparer la fermeté des différentes mousses, à titre indicatif, nous les avons placées deux par deux à l'intérieur d'un étau. Puis en exécutant le même nombre de tours d'étau pour chaque comparaison, nous avons observé leur épaisseur pour en déduire leur résistance. Nous avons pris la mousse grise comme référence car c'est la plus ferme des quatre mousses comparées selon le fabricant.

L'expérience n'est, ici, pas détaillée puisque nous établissons un comparatif qualitatif et non quantitatif. Nous avons cependant obtenu un ordre provisoire de résistance des quatre mousses Bultex étudiées :

mousse nano grise > mousse nano beige > mousse ordinaire > mousse mémoire de forme

L'expérience complète se trouve en annexe. Nous allons donc maintenant chercher à mesurer plus précisément cette résistance avec une autre expérience.

B. Résistance des mousses face à l'application d'un poids

Pour comparer plus précisément les résistances des mousses quantitativement y compris pour des mousses de même famille mais avec une densité différente, nous avons procédé à des montages comme ci-dessous.

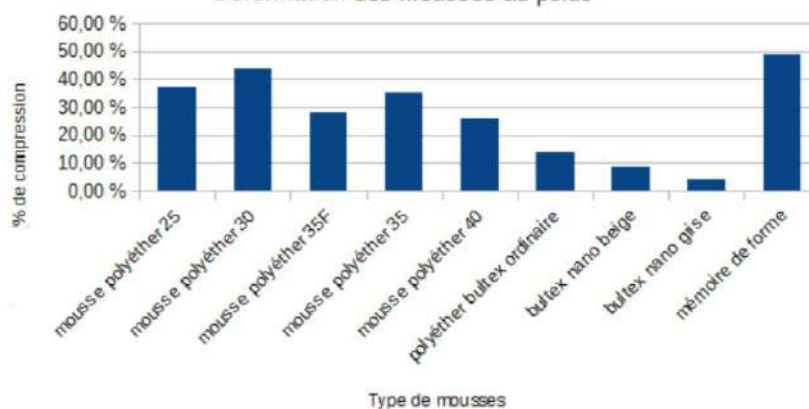
Nous avons positionné une baguette sur la mousse puis un poids métallique de 5 kg dessus pour mesurer l'enfoncement de la mousse et ainsi sa résistance.

Pour les quatre mousses Bultex, nous avons remplacé la masse de 5kg par un récipient rempli d'eau pour avoir des résultats exploitables. Toutes les mesures effectuées sont faites grâce au logiciel SalsaJ sauf pour la hauteur des blocs de mousse initiaux.



mousse	poids appliqué	taille initiale (mètre mesureur)	taille finale (salsaJ)	enfoncement (taille initiale - finale)	compression (% d'enf.) déformation
mousse 25	5kg	10.0 cm	6.280 cm	3.7 cm (3.72)	37%
mousse 30	5kg	10.1 cm	5,718 cm	4.4 cm (4.38)	44%
mousse 35F	5kg	9.9 cm	7,130 cm	2.8 cm (2.77)	28%
mousse 35	5kg	10.0 cm	6,550 cm	3.5 cm (3.45)	35%
mousse 40	5kg	10.2 cm	7,517 cm	2.7 cm (2.68)	26%
bultex ordinaire	2.72kg	7.8 cm	6.707 cm	1.1 cm (1.09)	14%
bultex nano beige	2.72kg	8.0 cm	7.355 cm	0.7 cm (0.65)	8.8%
bultex nano grise	2.72kg	7.7 cm	7.387 cm	0.3 cm (0.31)	3.9%
mémoire de forme	2.72kg	8.0 cm	4.062 cm	3.9 cm (3.94)	49%

Déformation des mousses au poids



Les numéros sur les mousses correspondent à leur densité (en kg/m³) et on observe que les enfoncements ne sont pas proportionnels par rapport aux densités des mousses, ce qui nous fait penser que la densité d'une mousse n'a pas de rapport avec sa résistance face à un poids qu'on applique sur elle, ou du moins ce n'est pas le seul critère de résistance.

En effet les deux mousses de densité 35kg/m³ n'ont pas le même enfoncement quand on y applique un poids de 5 kg car une des deux, notée 35F, est une mousse dite "ferme", donc conçue pour être plus résistante avec une densité semblable.

Les deux mousses Bultex nano grises et beiges ont elles aussi la même densité puisqu'elles sont fabriquées de la même manière avec la technologie Bultex Nano, et elles n'ont pas la même résistance.

On déduit donc que d'autres paramètres entrent en compte lorsqu'il s'agit de la résistance d'une mousse.

C. La résilience des mousses

Nous avons observé que la densité et la résistance n'avaient pas de lien direct entre eux, nous avons donc essayé de différencier nos mousses selon un autre critère: la résilience. La résilience d'une mousse est sa capacité à reprendre sa forme initiale, de rebond, son élasticité. Nous avons lâché une boule de pétanque métallique de 547g sur les échantillons de mousse. Nous avons ensuite mesuré la hauteur de rebond, celle de lancer sur la vidéo de l'expérience avec SalsaJ pour nous rendre compte de la capacité de rebond de la mousse. Nous effectuerons par la suite des mesures d'incertitudes.

Notre but est de voir si la densité peut ou non avoir un lien avec la résilience et si le type de matériau a une influence sur celle-ci. Nous avons donc lancé la boule et nous avons calculé le pourcentage de la hauteur du rebond de la balle par rapport à la hauteur initiale du lâcher.



Mousse	Hauteur lâchée (SalsaJ)	Hauteur de rebond (SalsaJ)	Pourcentage de la hauteur de projection
mousse 25	1.33 m	0.39m	29%
mousse 30	1.32m	0.43m	32%
mousse 35F	1.32m	0.44m	33%
mousse 35	1.31m	0.49m	37%
mousse 40	1.30m	0.46m	35%
bultex ordinaire	1.25m	0.23m	18%
bultex nano beige	1.23m	0.47m	38%
bultex nano grise	1.23m	0.55m	45%
mémoire de forme	1.24m	0.09m	7%

La résilience d'une mousse est donnée par le pourcentage de hauteur du rebond comme dit précédemment. Ici, on observe que pour les 5 mousses de même nature, la résilience augmente avec la densité (sauf entre la mousse 40 ce qui peut être expliqué par des erreurs de mesures ou d'installation lors de l'expérience).

La théorie semble prédire une relation de proportionnalité entre densité et résilience, ce que nous n'avons pas retrouvé.

En revanche, on remarque que les mousses de composition et de familles différentes ont un pourcentage de rebond différent.

La résilience permet de définir trois catégories de mousses:

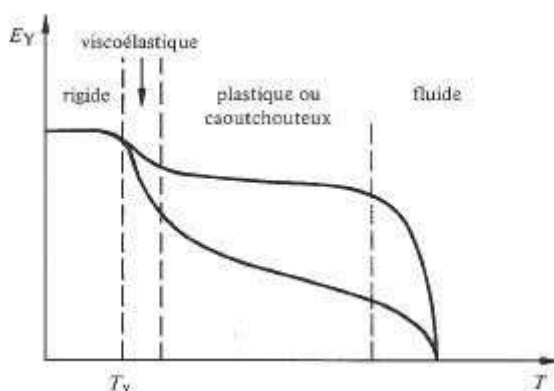
- les mousses à Haute Résilience, avec un fort rebond (théoriquement au dessus de 60%),
- les mousses viscoélastiques, avec un faible rebond (théoriquement en dessous de 10%),
- les mousses classiques avec un rebond intermédiaire.

Ici nous n'avons pas de pourcentage de rebond supérieur à 45% or les mousses Bultex nano sont des mousses à Haute Résilience, les résultats obtenus sont donc erronés, dus peut-être aux mesures, ou au poids choisi et la hauteur initiale de lâcher par rapport à l'épaisseur des mousses. Cependant, en rapportant les résultats en prenant comme référence de Haute Résilience les résultats des mousses bultex nano grise et beige, on en déduit que la densité, en augmentant, peut faire passer une mousse polyéther de classique à hautement résiliente puisque les mousses 35 et 40 ont des pourcentages presque aussi hauts que les mousses Haute Résilience.

D. Module d'Young et Température de transition vitreuse

Un des principaux critères dans la mécanique d'une mousse est, comme beaucoup d'autres matériaux, la température de transition vitreuse. Cette caractéristique, écrite aussi T_g , est une température à partir de laquelle un matériau passe de l'état dit vitreux à l'état caoutchouteux. La T_g d'un polymère HR (Haute Résilience) est en moyenne de -50°C , ce qui contribue à sa caractéristique très élastique.

Si on prend la courbe de l'élasticité en fonction de la T_g , on observe que pour les T_g inférieures à la température ambiante d'un milieu, les mousses sont donc très élastiques car dans le domaine caoutchouteux (voir graphique), alors que pour les T_g équivalentes à la température ambiante, on se situe dans le domaine viscoélastique, qui donne à la mousse des propriétés visqueuses et élastiques. La T_g d'un polymère peut être modifiée en mélangeant différents polyols lors de la fabrication de la mousse.



Variation du module d'élasticité d'un polymère en fonction de la température garmanage.com

Cette élasticité permet de modifier la résistance et la résilience d'une mousse.

Elle possède une limite en dessous de laquelle on peut déterminer la déformation et la contrainte grâce à loi de Hooke.

La loi de Hooke modélise le comportement des solides élastiques soumis à des contraintes. Elle indique que la déformation élastique est proportionnelle à la contrainte appliquée.

Au-delà de cette limite d'élasticité, la déformation et la contrainte ne sont plus proportionnelles.

Dans une première approximation, la loi de Hooke relie l'allongement Δl en mètre (d'un ressort par exemple) à la force appliquée et indique leur proportionnalité. $F = k \times \Delta l$

Afin de s'abstraire de la dimension de l'objet étudié, on divise la force appliquée F par la surface d'application S , pour définir la *contrainte* σ . La contrainte est une grandeur homogène à une pression et s'exprime en pascal (Pa).

L'allongement est alors exprimé non plus de façon absolue mais de façon relative que l'on appelle *déformation* ou *allongement relatif* ε (sans dimension)

La formule de la loi de Hooke devient alors : $\sigma = E \varepsilon$

ε = allongement relatif ou déformation (sans unité)

σ = contrainte (en Pa)

E = module d'Young : constante caractéristique du matériau (en Pa). $E > 0$

Le module d'Young du matériau est une constante mécanique qui dépend de la nature de celui-ci et qui permet de dire qu'un matériau est rigide lorsque le module est élevé. Les polymères qui ont un module d'Young peu élevé ne sont pas considérés comme rigides. Nos mousses font partie de cette catégorie.

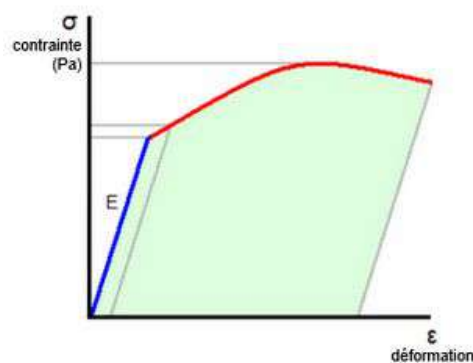


Diagramme contrainte-déformation
dictionnaire.sensagent.leparisien.fr

Autre que la densité, la température de transition vitreuse (T_g) et le module d'Young sont deux paramètres influant sur la rigidité et l'élasticité d'une mousse, et varient selon la composition de celle-ci, ce qui explique la différence de résistance et de résilience des mousses entre les quatre échantillons Bultex par exemple, qui sont de composition différentes. Pourtant, les mousses polyéther de densité différentes nous ont été indiquées comme composées de la même matière. Il y a donc soit eu un mélange léger de polyols, soit un autre paramètre de la mousse pour expliquer la différence de résistance et de résilience entre les deux mousses de densité 35kg/m^3 .

E. Mousse mémoire de forme

Une mousse est dite mémoire de forme lorsque sa température de transition vitreuse (T_g) avoisine la température ambiante du milieu dans lequel elle se trouve (en général cette T_g est autour de 20°C). Nous avons donc illustré les caractéristiques de cette mousse à travers quelques expériences en appliquant la même contrainte à la mousse pour différentes températures du bloc de mousse. Lorsque la mousse est à température ambiante, elle possède des caractéristiques caoutchouteuses. Le bloc de mousse se déforme et se reforme très vite, contrairement au bloc de mousse préalablement refroidi.

En effet, nous avons placé (à plusieurs reprises) notre mousse durant 1 heure dans un congélateur à -24° et nous avons pu constater que la mousse perdait toutes ses propriétés élastiques: elle se trouve à une température en dessous de son domaine viscoélastique, et se trouve donc dans l'état rigide dit vitreux.

Cela se traduit par une déformation quasi nulle suite à une contrainte mais aussi un temps long de "reformation", c'est-à-dire une résilience presque nulle, lorsque celle-ci se réchauffe. Cette mousse a pour particularité de se déformer plus amplement au contact de la chaleur et donc du corps humain. Sa présence dans les matelas apporte ainsi un confort important puisqu'elle permet d'épouser les formes du corps.



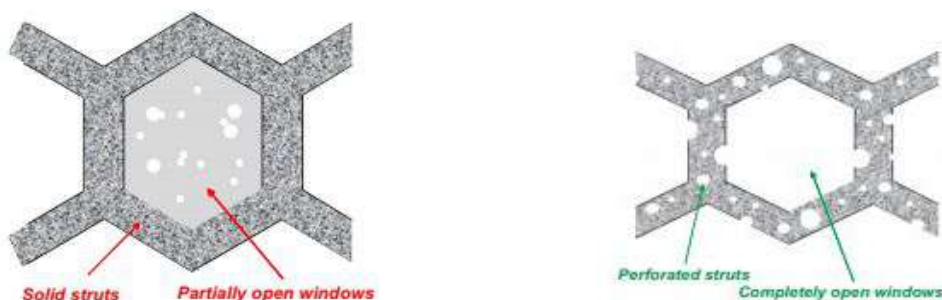
Photos de mousses mémoire de forme à température ambiante (mousse de gauche) et refroidie (mousse de droite) après avoir appliqué une masse pour observer la vitesse de reformation

F. Cellules ouvertes et résistance

En fonction de la résistance du matelas que l'on veut obtenir, plusieurs paramètres entrent en compte dans la morphologie des cellules de la mousse. Tout d'abord, la taille des cellules influe: si les cellules sont grosses, l'air qui circule dans la mousse s'évacuera mieux lorsqu'on y exercera une pression. Donc la résistance d'une mousse avec de grosses cellules sera plutôt faible. En revanche, si la mousse a de petites cellules alors l'air aura plus de mal à s'évacuer de la mousse et la résistance sera, par conséquent, plus élevée.

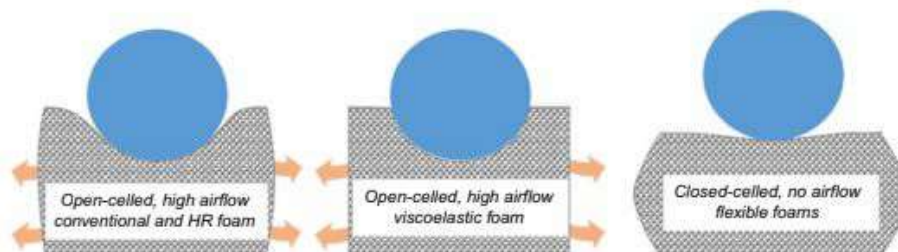
De plus, la taille des cellules a aussi un impact sur la déformation de celles-ci. Une plus petite structure se déformera moins sous une contrainte qu'une grande structure, ce qui peut expliquer une différence de rigidité même entre des cellules ouvertes de la même façon.

L'ouverture des cellules a aussi un rôle dans l'évacuation de l'air de celle-ci. En effet, si les cellules sont partiellement ouvertes (schéma gauche), l'air circulera moins facilement, comme si les cellules étaient de tailles plus petites. A l'inverse, certaines cellules sont ouvertes, et les structures de ces cellules sont poreuses (schéma droite), laissant ainsi l'air circuler plus facilement et donc diminuant la résistance de cette mousse.



These : Polymeric Foams Structure-Property-Performance. A gauche : schéma d'une cellule partiellement ouverte avec une structure complète et solide. A droite : schéma d'une cellule ouverte avec des structures poreuses.

L'évacuation de l'air d'une mousse est donc un élément important dans la déformation de celle-ci et dans sa résistance. Selon le type de mousse, la déformation varie et donc la résistance et la résilience aussi comme ci-après:



These : Polymeric Foams Structure-Property-Performance. Schéma de compression de différentes mousses en fonction de l'ouverture des cellules.

Le nombre de cellules joue aussi beaucoup dans la résistance. Une mousse qui a un très grand nombre de cellules dans un volume donné aura par conséquent des cellules de tailles plus petites. En fonction du drainage, la taille des bords de la cellule peut varier et influencer aussi sur la résistance de la mousse.

Pour la différence de résistance entre les mousses 35 et 35F, on en déduit que c'est la morphologie des cellules de la mousse qui entre en compte. Cela s'explique soit par une ouverture différente des cellules, soit par une différence dans l'épaisseur des bords des cellules, si la composition et donc la température de transition vitreuse ne changent pas.

CONCLUSION

En somme, nous avons étudié lors de ce projet différents types de mousses ainsi que leur morphologie, leurs caractéristiques et leurs propriétés.

Les mousses possèdent des caractéristiques différentes selon leur composition, leur densité, la morphologie de leurs cellules ou encore leur résilience. Ainsi on peut faire varier les paramètres d'élasticité, de résistance, de confort et de déformation d'une mousse, car selon notre masse, notre morphologie, ou même nos préférences, il est conseillé de choisir un matelas plus ou moins ferme, et avec un bon maintien du corps. En effet, les mousses très fermes soutiennent bien une masse importante, mais n'ont pas toutes le même maintien uniforme sur le corps, contrairement aux mousses très élastiques, ou même les mousses à mémoire de forme, qui sont plus déformables localement et offrent un meilleur confort.

Pour bien choisir la mousse de son matelas, il faudrait choisir une mousse à haute résilience si on veut un bon "rebond" et un support uniforme, une mousse résistante soit par une densité élevée, soit par une appellation ferme (comme la 35F) grâce à la morphologie des bulles, ou encore une mousse à mémoire de forme pour un confort et une enveloppe optimisés. De plus, l'épaisseur d'un matelas, sa durée de vie, et ses résistances au feu, à l'humidité, aux parasites... sont à prendre en compte.

Cependant, comme toutes les mousses n'ont pas les mêmes caractéristiques, il est fréquent dans les matelas de les superposer et donc combiner leurs propriétés pour obtenir le matelas idéal !

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui nous ont aidés et accompagnés pendant ce projet.

Tout d'abord, merci à Mme Alleg et à M. Mathiotte, nos professeurs de physique-chimie, et référents dans ce projet, pour leurs conseils, leur soutien et pour nous avoir accompagnés tout au long de ce projet et de nos expériences.

Merci à Christine Louis, technicienne du laboratoire du lycée pour sa gentillesse et son aide durant la réalisation de nos expériences.

Un grand merci à Joël Reignier, chercheur en Ingénierie des Matériaux Polymères à l'INSA Lyon, qui nous a apporté une aide précieuse à travers ses conseils, ses précisions et les nombreux documents qu'il nous a proposés lors de notre échange en visioconférence et par la suite. Nous souhaitons également le remercier pour le temps qu'il a accordé à la relecture de ce rapport.

Merci à Yves Hervaud, sans qui nous n'aurions pas réussi à contacter des personnes spécialisées dans le domaine des mousses et pour nous avoir relu.

Merci à Alain Rousseau pour l'aide documentaire qu'il nous a fourni.

Merci à Yann Kerneis de l'entreprise Literie Production à Villefranche-sur-Saône qui nous a fourni des mousses sur lesquelles faire nos différentes expériences et pour les conseils qu'il nous a donné.

Merci à l'entreprise Neorev à Villefranche-sur-Saône pour les autres mousses fournies.

SITOGRAPHIE

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01767011/document>

<https://docplayer.fr/83066878-Contribution-a-la-modelisation-du-comportement-visco-hyper-elastique-de-mousse-s-de-polyurethane-validation-experimentale-en-quasi-statique.html>

http://ln-www.insp.jussieu.fr/IMG/pdf/Faitd_actu_avril2013_2_V3.pdf

https://www.lps.u-psud.fr/IMG/pdf_Coalescence2009_rio.pdf

<https://www.espgg.org/Film-bulles-et-mousses-de-savon>

Dossier de la base documentaire "Matériaux à propriétés mécanique"

Dossier de la base documentaire "Plasturgie : procédés spécifiques aux composites"

Thèse de Emilie Forel " Mûrissement et coalescence de mousses liquides"

<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01788971/document>

Thèse de Bernard Obi "Polymeric Foams Structure Property Performance. A design guide"

<http://www.jma-mousse.fr/les-caracteristiques-techniques.html>

<http://dictionnaire.sensagent.leparisien.fr/Module%20de%20Young/fr-fr/>