
Développement d'une méthodologie pour l'étude des déformations de mousse polymère sous compression dynamique -Utilisation de la micro tomographie-

Philippe Viot*, Dominique Bernard, Erwan Plougonven****

* LAMEFIP, ENSAM de Bordeaux, Esplanade des arts et métiers, 33405 Talence Cedex, France

** ICMCB, CNRS, Univ. Bordeaux1, 87 av. du Dr A. Schweitzer, 33608 PESSAC, France

RÉSUMÉ. La mousse de polypropylène étudiée est un matériau multi-échelle ; des grains agglomérés sont constitués de cellules fermées beaucoup plus petites. La réponse du matériau à un choc comprend trois régimes : une phase élastique suivie d'un plateau à contrainte constante et enfin une densification. La microtomographie a été utilisée pour estimer les déformations de la structure du matériau cellulaire et mieux comprendre les mécanismes d'endommagement rencontrés pendant la phase de plateau. Puisque cette technique n'est pas assez rapide pour suivre les déformations de l'échantillon pendant une compression dynamique, des essais d'impact interrompu ont été réalisés en contrôlant les niveaux de déformation. Les résultats de ces impacts complétés par les premières visualisations en 2D de la structure sont présentés et commentés dans cet article.

ABSTRACT. The studied polypropylene foam is a multi-scale material; agglomerated grains, visible to the naked eye, are comprised of microscopic closed cells. The response of the material to a shock presents three stages; an elastic phase followed by a collapse phase and then a densification. Microtomography was used in order to better understand damage mechanisms during the stress plateau. As this technique is not fast enough to directly follow the impact deformation, interrupted impact tests were carried out by controlling the levels of the sample deformation. The results of these impact tests completed by the micro tomographic visualisation in 2D are presented and commented in this paper.

MOTS-CLÉS : mousse polymère, sollicitations dynamiques, techniques de micro tomographie.

KEYWORDS: polymeric foam, dynamic compression, micro tomography techniques.

1. Introduction

Les matériaux cellulaires sont utilisés dans de nombreuses applications de protection et de sécurité passive que ce soit pour le transport de matériels fragiles (matériel électronique, structures aéronautiques, ...), l'emballage d'aliments ou la protection des personnes (gilet de protection, casque, genouillère..). Dans tous les cas, l'outil numérique est de plus en plus utilisé pour optimiser la conception du produit de protection, en vue d'augmenter ses performances, même si les connaissances sur le matériau cellulaire constitutifs sont faibles. Afin d'améliorer les résultats de ces simulations –et répondre ainsi aux exigences des bureaux d'études, il est nécessaire de mieux comprendre, identifier et modéliser le comportement de ces matériaux. De nombreuses études ont déjà été réalisées pour estimer le comportement –à l'échelle macroscopique- de mousses sous sollicitations dynamiques (Avalle 2001, Maier 2003, Viot 2005). Des lois empiriques ont pu être proposées, pour répondre au plus vite aux attentes des industriels, mais qui intègrent plus ou moins bien les phénomènes observés (ces lois décrivent souvent la relation entre contraintes et déformations en fonction de différents paramètres (densité, température...)). Les lois macroscopiques utilisées dans les codes de calcul éléments finis, de type élasto visco-plastique, peuvent décrire approximativement le comportement macroscopique du matériau cellulaire (dans les phases élastique et contrainte en plateau) mais ne prennent pas en compte les localisations des contraintes et déformations observées –et donc leur hétérogénéité-. Ces lois utilisées dans l'industrie et ajustées numériquement sur des courbes contraintes moyennes-déformations globales peuvent aussi bien être utilisées pour représenter le comportement d'une mousse polymère que celui d'une mousse d'aluminium. Il est connu que pour le premier matériau, le phénomène prédominant dans son endommagement est le flambement des parois des cellules constitutives. Dans le cas des mousses d'aluminium, on observe plutôt des ruptures de parois (Gibson 1988). Il est donc indispensable de proposer des lois de comportement à l'échelle macroscopique qui prennent en compte les phénomènes physiques observés aux différentes échelles de la structure du matériau cellulaire.

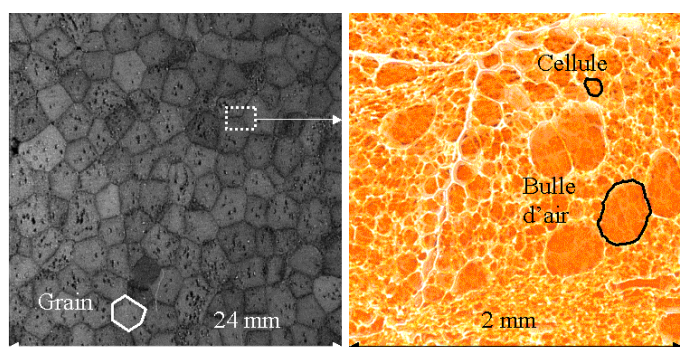


Figure 1. photographies de la structure multi échelle de la mousse de polypropylène. (a) à l'œil nu, (b) par reconstruction micro tomographique.

La structure de la mousse de polypropylène étudiée, est multi échelle (figures 1a et 1b). Le matériau cellulaire est constitué de grains de matériau poreux de polypropylène agglomérés lors de la fabrication (échelle mésoscopique). Ces grains ont une taille moyenne de 2mm et l'épaisseur des parois est de l'ordre de 0,05 mm. Ils sont constitués de cellules fermées beaucoup plus petites (échelle microscopique) dont le diamètre moyen est de 60 μm . L'épaisseur des parois de ces cellules est inférieur à 1 μm . La réponse de cette mousse polymère sous sollicitation dynamique dépend du matériau constitutif (le polypropylène) et aussi de la structure multi échelle de cette mousse.

La voie de recherche que nous envisageons pour l'étude de cette mousse a pour objectif de proposer une loi de comportement qui prend en compte la physique des phénomènes rencontrés lors de la sollicitation dynamique. C'est par une approche multi échelle que l'étude du comportement des matériaux cellulaires - structures sous sollicitations dynamiques est abordée. S'il s'agit d'étudier la réponse globale du matériau –à l'échelle macroscopique- à différentes vitesses de déformation, il s'agit aussi d'étudier la réponse de la structure de la mousse aux échelles mésoscopiques (celle du grain) et microscopiques (celle de la cellule élémentaire). L'observation des déformations des parois méso et micro (cellule et grain) de la structure sera un des éléments qui permettra d'établir une loi phénoménologique à ces échelles.

La première phase de cette méthodologie, décrite dans cet article, est donc l'observation, la compréhension et la mesure des phénomènes physiques. Cette étape doit nourrir l'étape finale de modélisation de la structure du matériau cellulaire.

2. Méthodologie

L'observation et l'interprétation des phénomènes physiques rencontrés lors d'une sollicitation dynamique ont déjà fait l'objet d'un travail important (Viot 2004). Ainsi, post impact, le flambement des parois des cellules ainsi que celui des parois des grains (parois pourtant beaucoup plus épaisses) ont pu être observés. Ces observations ont été menées à partir de vues micrographiques (par MEB) d'échantillons ayant été sollicités en compression dynamique. Il a aussi été constaté une forte hétérogénéité dans la déformation résiduelle des cellules. Cependant, la difficulté première de ces observations réside dans la découpe de l'échantillon (découpe indispensable pour effectuer l'observation au cœur de l'échantillon) qui peut engendrer des dommages supplémentaires. Des mesures complémentaires ont été effectuées pendant la sollicitation dynamique à l'aide de cinématographie rapide. Ainsi, des techniques de mesure optique et de traitement d'images ont été mises en œuvre (caméra grande vitesse et corrélation d'images) pour l'étude de ces phénomènes. Il a été montré une forte hétérogénéité du champ de déformation, localisation qui apparaît sous forme de strates –perpendiculaires à la direction de chargement. La ruine du matériau progresse alors au voisinage de cette zone pendant toute la phase de contrainte en plateau (Viot 2003). Cependant, ces observations n'ont pu être faites qu'à la surface libre de l'échantillon. Mais au vu de ces premiers

résultats, il était intéressant de poursuivre cette approche expérimentale pour décrire et mesurer le plus finement possible les phénomènes physiques rencontrés. L'utilisation de la technique de micro tomographie a donc été envisagée. Cette technique de mesure permet de caractériser en trois dimensions la structure d'un matériau hétérogène avec une grande précision mais est incompatible avec les moyens expérimentaux usuels d'impact. Les instruments de mesure en micro tomographie (table micrométrique multiaxiale, caméra haute définition...) sont fragiles et coûteux et ne peuvent être utilisés directement sur une machine de sollicitation dynamique conventionnelle. De plus, les temps de mesure sont longs (souvent supérieurs à 60 min), la mesure ne peut être donc réalisée pendant le temps de l'impact (inférieur à quelques millisecondes).

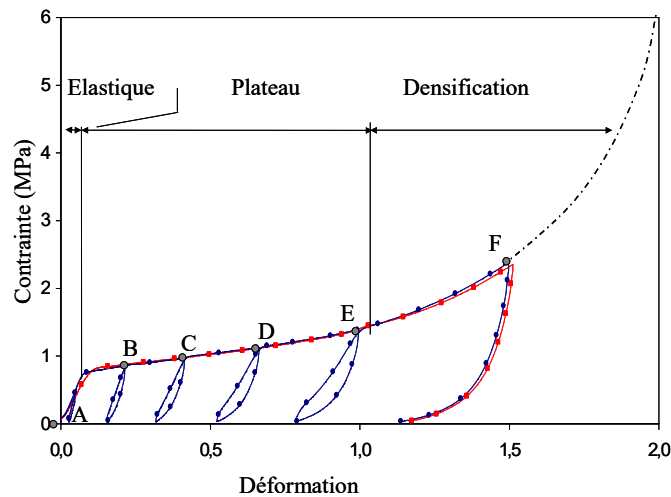


Figure 2. Cycle de compression imposé sur mousse de polypropylène. Résultats de trois essais obtenus en compression quasi-statique.

Ce projet d'identification en 3D du champ de déformation de la mousse et de la propagation de son endommagement par flambement des parois des cellules était suffisamment intéressant et original pour développer une méthodologie et des moyens expérimentaux de sollicitation dynamique compatible avec les contraintes techniques des mesures par micro tomographie. Cet article présente la méthodologie adoptée, les précautions de mise en œuvre qui ont été conduites et les premiers résultats.

La méthode expérimentale retenue consiste à réaliser des essais d'impact interrompus suivis de mesure de micro tomographie. En premier lieu, un enregistrement par micro tomographie est effectué sur la structure saine de la mousse (avant impact, point A de la figure 2). L'échantillon est ensuite impacté en utilisant une tour de chute. Pendant le chargement dynamique, l'amplitude de déformation est limitée à une certaine valeur. L'échantillon est maintenu comprimé, il est ensuite placé une seconde fois sur la table de mesure de micro tomographie pour être radiographié (point B, figure 2). Ces opérations (impacts et scans

radiographiques) sont répétés jusqu'à la complète densification de la mousse (point C, D, E et F). La déformation du matériau cellulaire peut être évaluée à partir des reconstructions 3D des images de micro tomographie enregistrées aux différentes étapes de l'essai de compression dynamique.

Il était nécessaire de vérifier si cette méthodologie (impact interrompu suivi d'un long temps de mesure pendant lequel le matériau est maintenu comprimé) ne modifiait pas le comportement de la mousse. Des compressions quasi statiques ont été effectuées pour mettre en évidence que la méthodologie d'essais interrompus ne modifiait pas la réponse macroscopique du matériau cellulaire. Les courbes de la figure 2 représentent les résultats en contrainte – déformation des essais de compression quasi statique (la vitesse de déplacement du piston de compression était de 10 mm/min). Ces résultats montrent que le matériau est insensible aux cycles interrompus de sollicitation.

2.1. Tour de chute

La caractérisation de la microstructure de la mousse par micro tomographie entre chaque sollicitation dynamique interrompue nécessite évidemment de réaliser les essais d'impact à proximité du dispositif de mesure micro tomographique. Il a donc été nécessaire de développer une tour de chute portable capable de réaliser des impacts interrompus. Ce dispositif a été développé spécifiquement pour cette étude. La tour de chute est constituée de deux sous-ensembles (figure 3) ; le premier module de chargement comprend un projectile en polycarbonate (de diamètre 30 mm) de masse $m=0,37$ kg guidé dans un tube métallique rectifié d'une hauteur h de 1.6 m. Cet ensemble vient se positionner au dessus du module de mesure constitué d'une base en aluminium, d'une matrice et d'un piston. Le piston est guidé dans le diamètre intérieur de la matrice avec un ajustement $\phi 10H7g6$. L'échantillon est enfermé dans le volume ainsi défini.

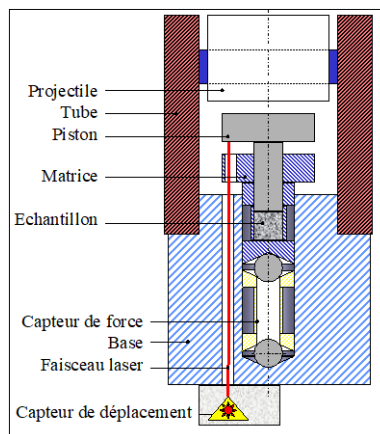


Figure 3. Schéma de principe du dispositif de tour de chute.

Pendant l'essai, le projectile est lâché -vitesse initiale nulle- à l'extrémité supérieure du tube de guidage. Il vient frapper le piston qui s'enfonce alors dans la

matrice et comprime l'échantillon. L'énergie du projectile étant nettement supérieure à l'énergie que peut absorber l'échantillon de mousse, la vitesse n'évolue pas pendant la compression de l'échantillon. A l'impact, la vitesse mesurée du projectile est de 5 m/s, elle est légèrement inférieure à la vitesse théorique du projectile de 5.6 m/s ($v = \sqrt{2.g.H}$ avec H hauteur de chute et $g=9.81 \text{ m/s}^2$).

Les compressions successives sont réalisées en utilisant des pistons de longueurs différentes (l = 16, 18, 20, 22 et 24 mm) ; on impose ainsi à chaque impact une déformation maximale de l'échantillon de 2 mm excepté pour le premier impact où la déformation est de 1mm. Cet ensemble piston-matrice a été conçu pour que l'échantillon puisse être sollicité en compression uniaxiale dynamique mais aussi pour qu'il puisse ensuite être enlevé de la tour de chute et placé sur le dispositif de mesure micro tomographique. Après l'impact, l'épaulement du piston reste en appui sur la matrice, l'échantillon reste donc comprimé pendant la mesure radiographique. Pour conclure, il faut souligner que cet essai de compression est une sollicitation uniaxiale et non pas une compression oedométrique puisqu'il existe un jeu diamétral entre l'échantillon et la matrice. De plus, on suppose souvent (puisque cela a déjà été vérifié expérimentalement) que le coefficient de Poisson des mousses polymériques est voisin de 0 (voir Gibson, 1988). La déformation diamétrale de l'échantillon est donc très faible et ne peut donc pas entraîner une augmentation de la pression radiale sur l'échantillon.

Ce dispositif de compression est instrumenté afin de mesurer l'effort de compression et le déplacement du piston pendant l'essai. La mesure du déplacement a été réalisée par une méthode optique de suivi de marqueurs et en utilisant une caméra dynamique Phantom V4. Les films des impacts ont été enregistrés à la fréquence de 5000 images par seconde (résolution $128 * 256 \text{ pixels}^2$). Enfin, la mesure de la force est obtenue à partir d'un capteur - réalisé à partir d'un tube en aluminium (de diamètre 7 mm et d'épaisseur 0,2 mm) instrumenté par 4 jauges montées en pont de wheatstone. La pleine échelle de ce capteur est calibré à 200 N. La relation entre la force mesurée et le signal de sortie du capteur est déterminée par étalonnage en compression quasi-statique. L'influence de la vitesse de déformation sur la réponse du capteur est nul.

2.2. Technique de micro tomographie

Soit un matériau homogène placé dans un faisceau de rayons X d'énergie E. Le nombre de photons N transmis à travers l'épaisseur L du matériau est donné par la loi de Beer-Lambert (Baruchel 2000)

$$N = N_0.e^{-\mu L} \quad (1)$$

Avec N_0 le nombre de photons incidents et, μ le coefficient d'atténuation linéaire du matériau.

Pour un matériau hétérogène, caractérisé cette fois par son champ tridimensionnel $\mu(x,y,z)$, le terme μL de l'équation (1) doit être remplacé par l'intégrale du coefficient μ sur le chemin des photons à travers l'épaisseur L. Le nombre N de photons transmis est alors :

$$N' = N_0 e^{\left(- \int_{\text{chemin L}} \mu(l) dl \right)} \quad (2)$$

En mesurant N_0 et N' , l'intégrale de μ peut être calculée :

$$\ln \frac{N_0}{N'} = \int_{\text{chemin L}} \mu(l) dl \quad (3)$$

Partant de cette théorie, plaçons maintenant un échantillon sur une table en rotation (axe de rotation z), dans un faisceau de rayons X (de direction v), et avant un détecteur photosensible -plan (u,z) - (voir figure 4a). Chaque section perpendiculaire à l'axe z de l'objet peut être considérée de manière indépendante parce que le faisceau synchrotron est parallèle. Pour une position angulaire θ de l'objet, N' peut être mesuré en tout point u du détecteur et la relation (4) peut être utilisée pour calculer la projection P :

$$P(\theta) = \{P(u, \theta); u = \pm r\} = \left\{ \ln \left(\frac{N_0(u)}{N'(u)} \right) = \int_{\text{Ray } u} \mu(v) dv ; u = \pm r \right\} \quad (4)$$

où $(-r)$ et $(+r)$ représentent les limites de u sur le détecteur et $\text{Ray } u$ correspond à la ligne parallèle au faisceau de rayons X d'axe v frappant le détecteur au point u . L'ensemble des projections $P(\theta)$ pour θ variant de 0 à 180° , est la transformée de Radon de $\mu(x,y)$. En 1917, Radon prouve mathématiquement qu'il est possible d'inverser cette transformée et ainsi de reconstruire le champ de μ à partir de l'ensemble des projections $P(\theta)$ mesurées (Herman 1980, Natterer 1999).

L'ensemble des sections reconstruites forment le champ $\mu(x,y,z)$ à partir duquel il est possible d'obtenir une image 3D du matériau. En effet, pour un matériau pur, homogène de densité ρ , le coefficient d'atténuation massique μ/ρ peut être calculé à partir de l'énergie E et du nombre atomique Z . Pour une énergie inférieure à 200 Kev, la relation suivante peut être utilisée :

$$\frac{\mu}{\rho} = K \frac{Z^4}{E^3} \text{ avec } K \text{ constante} \quad (5)$$

Cette équation implique que pour une énergie donnée E (paramètre ajustable lors de la mesure), le coefficient d'atténuation est une fonction linéaire de la densité. Pour un matériau cellulaire, composé dans notre cas de deux éléments -du polypropylène et de l'air-, le coefficient d'atténuation massique du matériau hétérogène est calculé par la relation :

$$\frac{\mu}{\rho} = \sum w_i \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_i \quad (6)$$

avec w_i la concentration de l'élément i et $(\mu/\rho)_i$ son coefficient d'atténuation massique.

Ainsi, la détermination du champ de coefficient d'atténuation $\mu(x,y,z)$, permet de reconstruire, à partir de cette dernière équation, le champs de densité $\rho_i(x,y,z)$ de chaque élément i .

La microtomographie rayon X consiste donc en la mesure de l'énergie résiduelle qui traverse l'échantillon (c'est en fait une radiographie donnant N') pour un grand nombre de prises de vue (entre 900 et 1500 prises d'angle θ compris entre 0° et

180°). Plusieurs radiographies références (angle θ constant) sont prises avec et sans échantillon afin de déterminer le bruit de mesure et l'homogénéité du faisceau incident ; ces images permettent d'obtenir N_0 . La représentation 3D de l'absorption des rayons X par l'échantillon est recalculée numériquement à partir de l'ensemble de ces images 2D. L'algorithme de calcul le plus couramment utilisé pour cette reconstruction est basée sur la technique de rétro-projection filtrée (the filtered back-projection method, voir Herman 1980).

Les résultats présentés dans cet article ont été obtenus sur la ligne BM05 du synchrotron Européen ESRF à Grenoble. Les capacités tomographiques de cette ligne permettent l'acquisition de radiographies de 1024 x 1024 ou 2028 x 2048 pixels via une caméra CCD. Un scintillateur placé devant cette caméra qui convertit les rayons X transmis en lumière visible. Une série d'optiques complémentaires permet d'adapter la taille de la projection de l'échantillon à la taille du capteur CCD de la caméra et par conséquent de fixer la taille des pixels des images obtenues (de 40 μm à 0.3 μm par pixel). En effet, en micro tomographie classique, les dimensions des échantillons sont telles que la caméra doit être en mesure d'enregistrer la projection complète de l'échantillon traversé par le faisceau rayon X. La diamètre maximal de l'échantillon est donc égal à la taille du pixel multipliée par la largeur (en pixels) du capteur CCD de la caméra. Pour notre étude, parce que les impacts doivent être appliqués sur des volumes d'échantillon représentatifs de la structure de la mousse (donc les plus grands possible) mais aussi parce que la précision de mesure micro tomographique est d'autant meilleure que l'échantillon est petit, le diamètre de l'échantillon a été fixé à 10 mm. Pour cette taille de pixel (1 pixel = 4,8 μm), il n'est pas possible de mesurer avec précision les dimensions des cellules (à l'échelle microscopique) mais la mesure est suffisante pour identifier la position et la dimension des parois beaucoup plus larges des grains (à l'échelle mésoscopique).

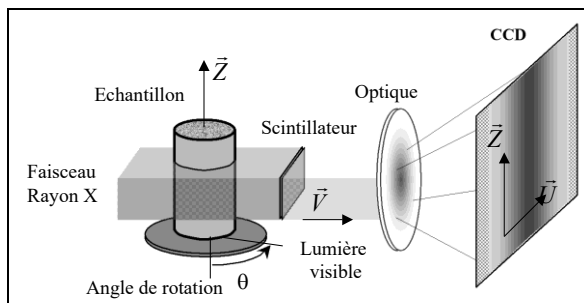


Figure 4a (ci-dessus) : schéma du dispositif de micro tomographie

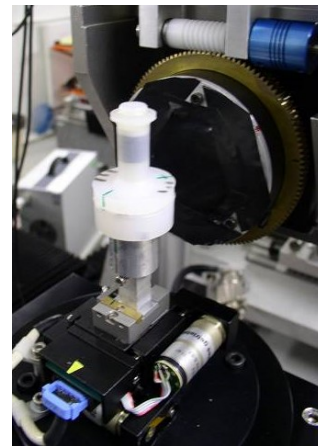


Figure 4b (ci-contre) : ensemble échantillon matrice piston positionné sur la table de micro tomographie

L'énergie E a été réglée à 1.6 Kev (en fonction de l'absorption du matériau poreux) afin d'obtenir des images avec le meilleur contraste. Pour cette énergie, la hauteur du faisceau rayon X était légèrement supérieure à 5 mm. Il a donc fallu réaliser deux scans de 900 images chacun, à deux hauteurs différentes, pour mesurer complètement l'échantillon vierge (de hauteur 10 mm) et l'échantillon comprimé

par les deux premiers impacts (la hauteur résiduelle étant respectivement de 9 et 7 mm). Le recalage en hauteur et la superposition des deux champs de mesure a été fait en post traitement.

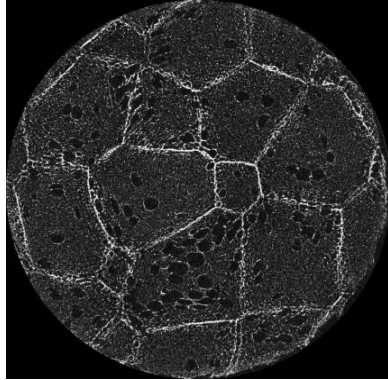


Figure 5a : *superposition de la section S_{def} et de la section S_{ref} avant recalage angulaire*

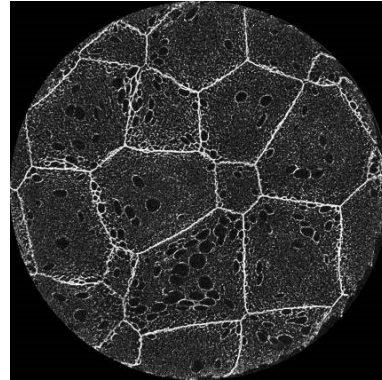


Figure 5b : *superposition de la section S_{def} et de la section S_{ref} après recalage angulaire.*

De plus, l'opération d'impact effectuée sur la tour de chute nécessite une manipulation de l'échantillon hors de la table de micro tomographie. Un pion de centrage positionné sur le conteneur permet de replacer ensuite l'échantillon sur la table de mesure et faire coïncider l'axe de l'ensemble matrice piston échantillon avec l'axe de rotation de la table après un impact. Cependant, la position angulaire de l'échantillon cylindrique ne peut être contrôlée avec précision. Des marqueurs visuels ont été placés sur le conteneur de l'échantillon pour régler approximativement cette position. Afin de pouvoir identifier le déplacement des grains de la structure, il était nécessaire de réajuster numériquement la position angulaire de l'échantillon après impact par rapport à la première mesure référence effectuée sur l'échantillon vierge.

Pour cela une première reconstruction micro tomographique RMT de l'échantillon a été réalisée pour chaque étape de l'essai dynamique interrompu (vierge, hauteur de 9, 7, 5, et 3 mm). A partir d'une section diamétrale S_{ref} reconstruite de l'échantillon vierge, il a été possible de retrouver la section correspondante déformée S_{def} sur la hauteur de l'échantillon comprimé par le premier impact. Les deux images de ces sections ont été additionnées numériquement pour obtenir une image de contrôle S_c (figure 5a). Elle permet d'évaluer visuellement l'angle de recalage en rotation de la section S_{def} par rapport à la section référence S_{ref} . On voit clairement sur cette image le décalage angulaire des deux sections ; les parois des grains situés sur la périphérie de l'échantillon ne coïncident pas. En effectuant une rotation angulaire de la section S_{def} de l'échantillon et en répétant l'opération d'addition avec la section référence S_{ref} , il est possible d'approcher progressivement l'angle optimal de recalage de l'échantillon par rapport à la position référence. La figure 5b montre le résultat de cette opération pour l'angle de recalage, les parois des grains entre les deux images coïncident au mieux. Afin de détecter l'angle de rotation optimal, le niveau de gris

moyen de chaque section S_c a été mesuré. L'intensité de l'image S_c atteint un maximum lorsque les deux sections S_{def} et S_{ref} coïncident.

Il était beaucoup plus difficile de faire cette opération pour les échantillons plus fortement comprimés (hauteur de 7, 5 et 3 mm). Pour ces échantillons, la section S_{def} correspondant à la section référence est difficile à retrouver avec précision. Il est seulement possible d'estimer approximativement sa position en hauteur h_{def} . Les opérations effectuées entre une section déformée et la section référence ont donc été répétées sur plusieurs sections de l'échantillon comprimé au voisinage de cette hauteur h_{def} . La mesure du niveau de gris moyen pour chaque étape fournit un ensemble de courbes possédant chacune un extremum. Le maximum de ces extremums indique la section optimale déformée correspondante à la section référence et sa position angulaire.

Numéro d'impact et hauteur h_{def} (en mm) de l'échantillon comprimé	Impact 1 $h_{def} = 9$	Impact 2 $h_{def} = 7$	Impact 3 $h_{def} = 5$	Impact 4 $h_{def} = 3$ mm
Angle de recalage (en degré)	-2	-3,4	-2,5	x

Tableau 1 : Angle de correction pour retrouver l'échantillon comprimé dans sa position référence

Le tableau 1 fournit les angles de rotation déterminés par cette méthode. Les écarts angulaires sont relativement faibles mais il était nécessaire de prendre cette précaution pour effectuer dans le même repère physique (O, x, y, z) la reconstruction 3D de l'échantillon vierge et les différentes étapes de la déformation.

3. Résultats

3.1. Comportement macroscopique

La figure 8 montre les premiers résultats obtenus avec la tour de chute. Ils doivent être confirmés par des expériences complémentaires mais ils permettent néanmoins de décrire le comportement du matériau cellulaire sous sollicitation dynamique. Sur cette figure, deux résultats d'essais sont présentés. Le premier (ligne épaisse) correspond à un essai continu (sans cycle de décharge).

On observe la mise en charge de l'échantillon suivie de la phase de déformation élastique, puis l'apparition d'un plateau en effort (la contrainte moyenne σ_{pl} est alors de 1,4 Mpa). Enfin, l'essai se termine par une augmentation accrue de l'effort de compression pendant la densification du matériau.

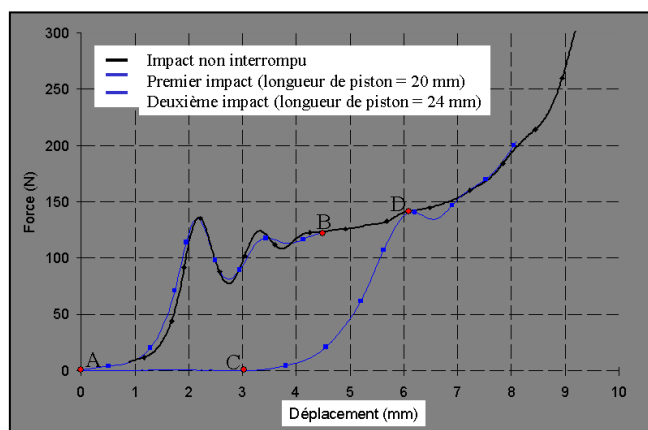


Figure 6 : Courbes contrainte /déformation obtenues pour un impact continu et un impact interrompu

Le deuxième essai (ligne fine) a été réalisé en imposant seulement deux impacts successifs. Le premier impact (courbe AB, ligne fine) présente une phase élastique suivie du début du plateau en contrainte. L'essai a été interrompu au point B. Après décharge de l'échantillon (point C), la déformation résiduelle de l'échantillon est de 29 %. Le deuxième impact commence en ce même point C, le comportement élastique de la mousse (zone CD) est moins rigide (ce constat peut être fait aussi en compression quasi-statique, figure 2) ; il y a eu pendant la phase de plateau du premier impact un endommagement de la structure par flambement des parois des cellules et des grains ce qui entraîne une plus grande souplesse du matériau à l'échelle macroscopique. De plus, puisque on constate une augmentation de l'effort en fonction du déplacement imposé pendant le plateau du premier impact, le seuil en effort lors du deuxième impact (point D) est nettement plus élevé (la contrainte moyenne est alors de 1,9 Mpa). Passé ce seuil, le comportement en plateau de cet échantillon ayant subi deux impacts successifs est similaire à celui du premier essai. Il n'apparaît donc pas d'influence de la méthodologie expérimentale d'impact successif interrompu sur le comportement du matériau.

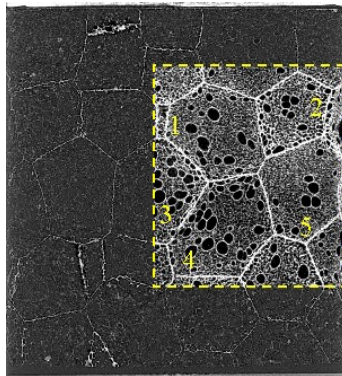
Pour ces deux essais, les deux courbes présentent de fortes oscillations qui s'atténuent progressivement. Ce phénomène est dû à la propagation de l'onde de choc dans l'échantillon et le dispositif

3.2. Comportement mésoscopique

Les premiers résultats obtenus par RMT concerne un échantillon ayant été sollicité par quatre impacts interrompus successifs. Afin de présenter avec plus de clarté ces premières reconstructions, les figures présentées correspondent à des sections verticales de l'échantillon (dans son plan médian). Cette approche 2D permet d'amener plus rapidement des premiers résultats et d'orienter les voies d'investigation de l'étude finale en 3D ainsi que la modélisation complète du

matériau poreux. Cependant, cette description 2D du comportement du matériau nécessite l'hypothèse que le déplacement hors plan est nul. Il semble que cette hypothèse puisse être proposée puisque les premiers résultats de cette étude montre que le déplacement des grains est vertical. De plus, le déplacement radial des grains étant négligeable et le coefficient de poisson de cette mousse étant voisin de zéro, on peut donc suspecter que le déplacement hors plan de la structure est nul. Les résultats présentés dans cet articles seront validés par l'étude 3D des déformations du matériau –étude en cours- ce qui permettra de s'affranchir de cette hypothèse forte (ou de la valider).

Figure 7 : Section verticale de l'échantillon avant impact obtenue par RMT



Les premiers résultats obtenus par RMT concerne un échantillon ayant été sollicité par quatre impacts interrompus successifs. Afin de présenter avec plus de clarté ces premières reconstructions, les figures présentées correspondent à des sections verticales de l'échantillon (dans son plan médian). Cette approche 2D permet d'amener plus rapidement des premiers résultats et d'orienter les voies d'investigation de l'étude finale en 3D ainsi que la modélisation complète du matériau poreux. Cependant, cette description 2D du comportement du matériau nécessite l'hypothèse que le déplacement hors plan est nul. Il semble que cette hypothèse puisse être proposée puisque les premiers résultats de cette étude montre que le déplacement des grains est vertical. De plus, le déplacement radial des grains étant négligeable et le coefficient de poisson de cette mousse étant voisin de zéro, on peut donc suspecter que le déplacement hors plan de la structure est nul. Les résultats présentés dans cet articles seront validés par l'étude 3D des déformations du matériau –étude en cours- ce qui permettra de s'affranchir de cette hypothèse forte (ou de la valider). Les premiers résultats obtenus par RMT concerne la structure saine de l'échantillon mesurée avant impact (figure 7). Puisque l'échelle choisie (10 mm pour 2048 pixels) doit permettre de distinguer la structure de grains de la mousse mais n'est pas assez fine pour reconstruire avec une bonne précision la géométrie des cellules microscopiques, c'est donc plutôt vers l'analyse des déformations des grains de la structure du matériau poreux multi échelles que les efforts se sont portés. Cependant, l'image reconstruite est de bonne qualité puisque l'on peut quand même visualiser les bulles d'air incluses dans la mousse (générées lors de la fabrication du matériau). A une échelle beaucoup plus fine, il est possible

de distinguer aussi la structure des cellules fermées, il est cependant difficile de quantifier ces observations, puisque la précision des mesures choisie est de l'ordre de grandeur de l'épaisseur des parois des cellules. A une échelle plus importante, la géométrie des grains peut être identifiée, on retrouve une structure polyédrique familière puisque cette géométrie a déjà été observée sur ce matériau en découpant l'échantillon par un plan médian. Les dimensions des grains sont voisines de 2 à 3 mm et l'épaisseur de leur paroi est proche de 50 μm (11 pixels mesurés en observation 3D et convertis par le facteur d'échelle 1pixel = 4,88 μm).

Pour la suite de cet article, il a été choisi de présenter le comportement de 5 grains à chaque étape d'impact (figure 7). Un traitement d'image numérique a été appliqué sur cette partie de l'image afin de mettre en relief les phénomènes observés. Ce même filtre a été appliqué sur les différentes sections obtenus par RTM après chaque impact. Le résultat est présenté sur les figures 8a, b et c correspondant aux trois premiers impacts.

Il est intéressant de faire quelques remarques issues des observations de la structure des grains et de compléter l'analyse visuelle de la structure de la mousse par des mesures qualitatives. Il est proposé d'évaluer la déformation de chaque grain par la mesure de variation de surface de la section de ces grains dans le plan d'observation. La surface S_{gi} du grain g a été mesurée pour chaque impact i . Chaque valeur déterminée grâce à un logiciel de traitement d'image a été comparée par rapport à sa valeur initiale S_{g0} (surface mesurée pour le grain g de l'échantillon vierge, état 0). La variation de surface ΔS_{gi0} est calculée de la façon suivante :

$$\Delta S_{gi0} = \frac{S_{gi} - S_{g0}}{S_{g0}} \quad (\text{Equation 7})$$

Cette variation de surface ΔS_{gi0} est un indicateur qui permet d'estimer l'évolution de la déformation de chaque grain (dans sa section verticale).

Pour vérifier la pertinence de cet indicateur, la moyenne des indicateurs sur l'ensemble de l'échantillon a été comparée à sa déformation globale imposée pendant l'impact.

La moyenne des indicateurs pour l'impact i est :

$$m_i = \frac{\sum_{g=1}^{n=30} \Delta S_{gi0}}{n = 30} \quad \text{définie pour 30 grains} \quad (\text{Equation 7})$$

et la déformation globale de l'échantillon est calculée par la relation ,

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta h_{i0}}{h_0}, \quad \text{pour un échantillon de hauteur } h_0 \text{ ayant subi une variation de hauteur}$$

Δh_{i0} lors de l'impact i .

Ce calcul montre que la moyenne des indicateurs pour ce premier impact $m_1 = 9\%$ est proche de la déformation globale imposée ε_1 à 10%. Pour les impacts suivants,

la moyenne des indicateurs est strictement égale à la déformation globale des

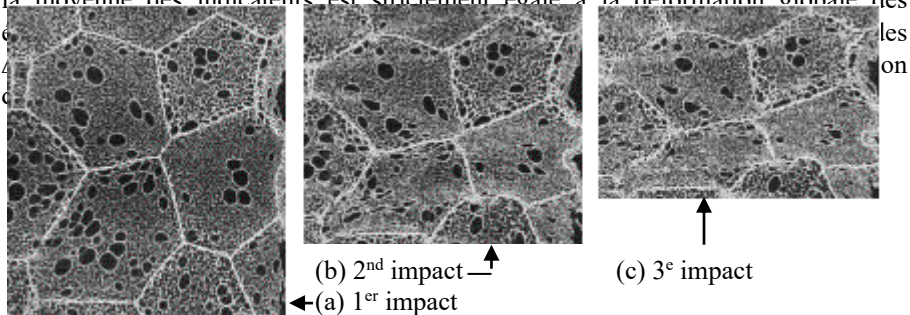


Figure 8 : Section verticale de l'échantillon obtenue par RMT après impacts.

Sur le premier impact, il est difficile d'identifier une réelle déformation de la structure, l'étude sur l'échantillon complet montre que les déformations sont principalement situées lors de ce premier impact au contact avec les surfaces de compression du piston et de la matrice. Le calcul des indicateurs ΔS_{g10} pour ces grains 1 à 5 montre que leurs variations de surface (et implicitement leurs déformations) sont de l'ordre de 4% et sont bien inférieures à la déformation globale imposée sur l'échantillon (tableau 2). On constate déjà une hétérogénéité dans les déformations puisque les variations des surfaces des grains 2 et 3 sont proches de 0. La zone étudiée commence à être réellement déformée lors du deuxième impact. Les grains 1, 4 et 5 semblent fortement comprimés, leurs parois orientés suivant l'axe de la compression subissent du flambement (figure 8b). Cette constatation est validée par la mesure des indicateurs ΔS_{g20} (tableau 2). On assiste même à des phénomènes d'indentation ; la paroi frontière entre les grains 4 et 5 semblent enfoncer la paroi perpendiculaire du grain inférieur. De plus l'hétérogénéité des déformations semble particulièrement importante. Le grain 2 est peu déformé ($\Delta S_{g20} = -8,6\%$) contrairement au grain 4 ($\Delta S_{g20} = -41,4\%$) dont la forme même a fortement évolué. Le cisaillement de ce grain peut être observé dans le plan d'observation, sollicitation qui est due aux fortes variations des déformations des grains voisins. Il y a donc, à l'échelle mésoscopique et microscopique, un réarrangement de la structure granulaire qui induit des sollicitations locales beaucoup plus complexes que la compression uni axiale imposée sur l'échantillon.

A une échelle plus fine, une localisation des déformations apparaît au sein de chaque grain. S'il est difficile sur ces images de petites tailles d'observer la déformation des cellules, il est possible de montrer ces localisations en observant les déformations des bulles d'air. Ainsi pour le grain 4, la structure cellulaire du grain, à proximité du grain 1, ainsi que celle observable dans sa partie basse sont fortement déformées. Les bulles d'air sont comprimées en forme de disque. Dans sa partie centrale, les déformations sont moindres, certaines bulles et des cellules de taille importante ont conservés leur intégrités.

	Surface (pixel)	Niveau de gris	Variation de surface (en %)			
			Impact 1	Impact 2	Impact 3	Impact 4
Grain 1	250522	77,7	-3,7	-20,0	-34,0	-61,6
Grain 2	153920	81,3	-1,7	-8,6	-24,2	-54,5
Grain 3	245959	77,6	0,0	-24,0	-41,2	-64,3
Grain 4	274272	78,2	-4,0	-41,4	-59,2	-72,9
Grain 5	225409	81,2	-4,0	-35,2	-50,6	-67,3
Echantillon complet	460.10^4	82,2	-10,0	-30,0	-50,0	-70,0

Tableau 2 : valeurs des indicateurs de variation de surface des sections de grain et comparaison avec la déformation imposée sur l'échantillon

Ces résultats sont confirmés pour le troisième impact (figure 8c). Une forte hétérogénéité des déformations des grains est visible à nouveau. Les indicateurs de variation de surface varient entre $-24,2\%$ pour le grain 2 faiblement comprimé depuis le début et $-59,2\%$ pour le grain 4 dont la forme a encore évoluée. Il existe donc à cette échelle un fort gradient de déformation combiné à des champs de sollicitation complexe. Ce constat peut être aussi établi à l'échelle de la cellule. A l'intérieur de chaque grain, il existe aussi une localisation des déformations ; des strates de matériau cellulaire plus déformées, et perpendiculaires à l'axe de sollicitation, apparaissent et se propagent entre grains.

Enfin, pour le dernier impact, la densification de l'échantillon est atteinte et les déformations des grains sont plus homogènes. Les indicateurs des variations de surface des sections des grains montrent en effet des valeurs voisines de la déformation imposée sur l'échantillon (voir valeurs tableau 2).

Conclusion

Des compressions dynamiques interrompues ont été effectuées sur une mousse de polypropylène. Ces expériences ont mis en évidence le comportement du matériau cellulaire à l'échelle macroscopique : une phase élastique suivie d'un plateau en contrainte et enfin la densification. L'état de la structure du matériau alvéolaire a été étudié à différentes étapes de la compression dynamique en utilisant les techniques de mesure de micro tomographie.

Les résultats de ce travail ont été présentés en 2D dans un plan vertical de l'échantillon. Plusieurs phénomènes physiques ont été observés et ceci à différentes échelles de la structure du matériau. Pendant la phase de plateau en contrainte, à l'échelle du grain (mésoscopique), la déformation apparaît sous forme de flambement des parois des grains. De plus, elle est hétérogène et localisée dans des strates perpendiculaires à l'axe de compression. La localisation de ces déformations engendre alors des sollicitations locales plus complexes que celle imposée globalement sur l'échantillon. Il n'est pas rare de voir des phénomènes de cisaillement inter-grains. A une échelle plus fine, les déformations des cellules microscopiques sont aussi fortement hétérogènes. Il n'est donc pas envisageable de décrire le comportement de la structure alvéolaire constitutive d'un grain par un matériau homogène sans la prise en compte de la localisation des déformations.

Cette étude 2D va être poursuivie par une analyse 3D du champ de déformation afin de valider les résultats présentés dans cet article. Mais dès à présent, il semble nécessaire que la modélisation du comportement de cette mousse polymère devra intégrer les phénomènes physiques mis en évidence par cette première étude. Il sera alors possible de proposer une loi de comportement macroscopique prenant en compte la réponse du matériau aux différentes échelles.

Bibliographie

- Avalle and al. "characterization of polymeric structural foam under compressive impact loading by means of energy absorption diagram". *International journal of Impact Engineering*, vol 25 455- 472 2001.
- Gibson L. and Ashby F., « Cellular solids. Structures and properties », Edition : *Cambridge Solid State Science Series*, 1988.
- Maier M., Huber U. and al., « Recent improvements in experimental investigation and parameter fitting for cellular materials subjected to crash loads ». *Composites science and technology* 63 (2003) 2007-2012.
- Zhao H., Elnasri I. and Abdennadher S., "An experimental study on the behaviour under impact loading of metallic cellular materials" *International Journal of Mechanical Sciences*, Volume 47, Issues 4-5, April-May 2005, Pages 757-774.
- Viot Ph. and Beani F. . Comportement de mousses polymères en compression dynamique. *Revue des Composites et des Matériaux Avancés*, vol 13(n°3):283-292, 2003. ISBN 2-7462-1117-3.
- Ph. VIOT, F. BEANI, and J-L. LATAILLADE. Polymeric Foam behavior under dynamic compressive loading. *Journal of Materials Science*, 2005. volume 40, pp 5829-5837.
- Ph. VIOT and Vacher P. . Identification of foam behavior under dynamic loading by the use of particle imaging techniques. *Revue Matériaux et Techniques*, hors série:39-43, December 2004. ISSN 0032-6895.
- Viot Ph. and Bernard D., Impact test deformations of polypropylene foam samples followed by microtomography. *Journal of Materials Science Letter*, November 2005.
- Baruchel, J., Buffière, J.Y., Maire, E., Merle, P. and Peix G. (2000) X-ray tomography in material science, Hermes Sciences Pub., Paris.
- Herman, G.T. (1980) Image reconstruction from projections: the fundamentals of computerized tomography. Academic Press, New York.
- Natterer, F. (1999) Numerical methods in tomography. *Acta. Num.* 8, 107-141