HAL open science

Optimisation du comportement électromécanique d'une mousse piézorésistive de polyuréthane en régime quasi-statique et dynamique

Jean-Christophe Walrick, Antoine Poirot, Nacera Bedrici, M. Arrigoni

To cite this version:

Jean-Christophe Walrick, Antoine Poirot, Nacera Bedrici, M. Arrigoni. Optimisation du comportement électromécanique d'une mousse piézorésistive de polyuréthane en régime quasi-statique et dynamique. 25ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2019, Nantes, France. hal-04480042

HAL Id: hal-04480042

https://hal.science/hal-04480042v1

Submitted on 27 Feb 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Optimisation du comportement électromécanique d'une mousse piézorésistive de polyuréthane en régime quasi-statique et dynamique

Antoine POIROT[a,b], Michel ARRIGONI[b], Nacera BEDRICI[a], Jean-Christophe WALRICK[a]

a. ESTACALAB', ESTACA Campus Ouest, Laval (France) ; antoine.poirot@estaca.fr, jean-christophe.walrick@estaca.fr, nacera.bedrici@estaca.fr
b. IRDL, ENSTA Bretagne, Brest (France) ; michel.arrigoni@ensta-bretagne.fr

Résumé :

Dans le secteur des transports, de l'énergie ou bien de la défense, les structures peuvent être confrontées à diverses sollicitations dynamiques comme des impacts, des chutes ou encore du blast. Ces structures nécessitent un contrôle régulier pour assurer la pérennité des systèmes et la sécurité des utilisateurs. Dans ce but, de nombreuses techniques ont été développées comme le contrôle de santé intégré (CSI) qui consiste à suivre en temps réel l'état d'une structure par l'intégration de capteurs (optiques, piézoélectriques…). Ces dernières années, les chercheurs se sont beaucoup intéressés à des capteurs peu intrusifs à base de matériaux électro-actifs comme les mousses piézorésistives. Ces matériaux peuvent combiner souplesse, légèreté tout en étant sensible à leur environnement (déformation, contrainte…). Ils sont constitués d'une matrice souple imprégnée de charges conductrices leur donnant un caractère piézorésistif.
Le travail présenté dans cet article décrit la caractérisation et le potentiel de détection d'une mousse piézorésistive lors d'essais quasi-statiques et dynamiques en identifiant les principaux paramètres influents. Une attention particulière est apportée à l'influence du niveau de conductivité électrique des échantillons sur leur sensibilité aux sollicitations. Pour cela, les échantillons sont dopés par une simple méthode de trempage dans une encre conductrice à base de PEDOT:PSS à environ 1,6% de taux massique. Il est observé que l'augmentation de conductivité diminue la sensibilité de la mousse. Selon la nature de la sollicitation à détecter, le contrôle du niveau de sensibilité de la mousse peut être optimisé.

Mots clefs : capteur de choc, mousse conductrice, PEDOT:PSS, piézorésistivité, essai confiné.

Abstract:

From transportation to space including defense applications, engineered systems are likely to face dynamic loads such as impact, drop or blast loadings. In order to assess the residual strength or the survivability of the target, is it necessary to bring models when experiments turn to be destructive and thus expansive. The modelling also meets some limits because it cannot be relevant regarding the too large variety of material behavior or loading. At such a point it is then important to implement Structural

Health Monitoring (SHM) techniques in systems in service, especially able to monitor dynamic events. From this fact, implementation of physical sensors in structures are needed.

The presented work aims at implementing a sensor within a structural assembly and then to observe its response to a dynamic loading. A first suggestion is the use of an electrically conductive foam. As a first step, it is necessary to know about its constitutive law and the relation between stress and conductivity. An open-cell foam with a low density (20 kg.m^{-3}) coated with a conductive solution is thus studied. The work describes the elaboration of the sample and its electrical response when subjected to compression tests in order to assess its piezoresistive response. In that purpose, the foam is characterized with quasi-static tests (cyclic uniaxial compressions at low velocity) conducted with a press, in free and confined (oedometric) configurations. These tests are performed in the same humidity and temperature conditions. It is observed that the electrical response (sensibility, signal stability) of the conductive foam depends on its mechanical behavior which depends on its physical parameters. Thereby, the morphology (geometry, size and repartition of cells, density…) of the conductive foam and its electrical conductivity are key parameters to be considered in the characterization. To optimize the deformation and pressure sensibility of the foam, it is coated with a conductive ink based on PEDOT:PSS copolymers at various concentration ratios.
Finally, a calibration of studied samples could be achieved in quasi static regime and its dependency to key parameters was assessed.
As a second step, the dynamic characterization of the foam is studied. The objective is to evaluate the performance of the foam as a shock sensor by identifying the key parameters. Initially, it consists of subjecting low energy impacts on a sandwich structure with integrated foam sample. From the results, the sensing performance depends on various parameters such as foam calibration, conductivity and sandwich constitution (materials, dimensions…). Supplementary tests could be performed with Hopkinson bars for obtaining high rate foam behavior and defining its pressure sensing range. The dynamic behavior of the conductive foam is compared to that in quasi static regime. The role played by viscoelasticity in the electrical response is then evidenced.

Keywords: impact sensor, conductive foam, PEDOT:PSS, piezoresistivity.

1 Introduction

Appliquées au domaine des transports (aérien, spatial, automobile…) jusqu'à celui du génie civil, les structures font face à diverses sollicitations au cours de leur vie. Leur environnement et leur contexte d'utilisation en sont directement la cause (intempéries, chocs, vibrations…). Souvent à base de matériaux composites, ces structures sont spécialement conçues pour répondre à des problématiques liées au rapport entre masse et rigidité. C'est notamment le cas des structures « sandwichs ». Légères et particulièrement raides, celles-ci présentent toutefois une fragilité à l'impact qui peut entraîner un endommagement localisé non visible en surface (1). La sécurité des systèmes et des utilisateurs peut donc être remise en cause.

Ainsi, afin de prévenir le risque de dommage critique et améliorer la durée de vie des structures, de nouveaux matériaux sont utilisés (composites…) et des modèles prédictifs ont vu le jour. Cependant, devant l'infinité de sollicitations de natures différentes que peuvent subir les structures, la fiabilité de ces modèles restent limitée. C'est pourquoi les structures notamment aéronautiques sont régulièrement contrôlées lors d'opérations de maintenance. Ces opérations ont pour but de caractériser et localiser

d'éventuels endommagements. Elles utilisent des techniques de contrôle non destructif (CND) consistant à déployer des réseaux de capteurs (optiques, piézoélectriques…) sur l'ensemble de la structure. La réalisation de ces opérations représente un coût considérable car elles nécessitent du personnel et un temps d'immobilisation important.

Face à ce constat, la recherche s'est dirigée vers des structures dites « fonctionnelles » ou « intelligentes » permettant d'être sensibles à leur environnement. L'idée est d'obtenir un historique complet de l'état de santé d'une structure tout en réduisant les coûts de maintenance grâce à l'insertion de capteurs au sein même de celle-ci. Il s'agit du contrôle santé intégré (CSI).

Le CSI a fait l'objet de nombreuses études qui se sont intéressées à l'intégration de capteurs piézoélectriques, capacitifs ou encore piézorésistifs dans les structures composites. Ces capteurs, classiquement à base de matériaux métalliques et de semi-conducteurs, présentent de bonnes performances en termes de sensibilité aux sollicitations mais sont souvent massifs et rigides. Or, l'un des défis actuels est de rendre l'intégration de ces capteurs peu intrusive à la structure.
De nouveaux capteurs à base de matériaux intelligents ont alors fait leur apparition ces dernières années. Dans cette classe de matériaux, les polymères conducteurs sont devenus incontournables en raison de leurs propriétés mécaniques (faible densité, légèreté) et électriques (conductivité, sensibilité) intéressantes. Ils se composent majoritairement d'une matrice isolante en polymère (matériaux cellulaires, élastomères…) chargée de nanomatériaux électriquement conducteurs (graphène, nanotubes de carbone, polymères conducteurs…). Leur constitution leur permet d'être sensibles aux stimuli extérieurs. C'est particulièrement le cas pour les mousses piézorésistives. La piézorésistivité est un phénomène qui se traduit par une variation de la résistance électrique du matériau lorsque celui-ci subit une sollicitation mécanique.

Aujourd'hui, les mousses piézorésistives suscitent un grand intérêt de recherche. Un des exemples les plus étudiés est la mousse de polyuréthane chargée de différents types de nanomatériaux (graphène, copolymères conducteurs…). En plus d'être un matériau très accessible, sa structure cellulaire et sa nature polymérique lui confèrent diverses propriétés mécaniques avantageuses : faible densité, légèreté et souplesse. La légèreté est un des critères les plus recherchés pour des capteurs intégrés dans l'aérospatiale, de même que la souplesse est utile pour des capteurs portatifs destinés à la médecine ou la robotique. L'ajout de charges conductrices au sein de la mousse lui donne une fonctionnalité de capteur piézorésistif.
Cependant, selon la quantité et le type de charges ajoutée, les propriétés mécaniques sont également modifiées. La nécessité d'une étude approfondie de la relation entre les paramètres électriques et mécaniques est donc légitime.

Depuis une dizaine d'années, les chercheurs se sont concentrés principalement sur les différentes méthodes d'intégration des charges conductrices ainsi qu'au comportement électromécanique en quasi-statique (compression uniaxiale simple et cyclique à basse vitesse de déformation). Toutefois, l'influence du caractère viscoélastique sur le comportement électrique des mousses piézorésistives a été peu explorée. De plus, peu d'informations existent sur le comportement en choc de ce type de mousse.
Le travail présenté dans cet article décrit la caractérisation de la réponse électromécanique d'une mousse piézorésistive sous sollicitations quasi-statiques et dynamiques en mettant en évidence leurs principaux paramètres influents.

2 Matériaux et méthodes expérimentales

2.1 Mousse conductrice à base de polyuréthane

Le matériau étudié est une mousse de polyuréthane à cellules ouvertes imprégnée d'une solution électriquement conductrice (sa composition est gardée confidentielle par le fournisseur). Elle est commercialisée chez sous le nom de mousse synthétique MIC. La mousse MIC présente une conductance de l'ordre de 10 $k\Omega^{-1}$ et une masse volumique de 18 $kg.m^{-3}$. En considérant que la masse volumique du polyuréthane non cellulaire est de 1200 $kg.m^{-1}$, la densité relative de cette mousse est de 0,015 ce qui la classe parmi les mousses de faible densité.

Les échantillons de l'étude sont découpés au cutter et ont une épaisseur de 12 mm et une surface de dimensions 35 × 35 mm. Le choix d'un faible volume d'échantillon est motivé par la recherche de capteurs peu intrusifs dans un contexte de CSI. La prise de mesure électrique sur un échantillon est effectuée grâce à des électrodes en cuivre collées sur sa face inférieure et supérieure qui ont été recouvertes de vernis conducteur au préalable. Ce vernis à base d'argent pour but d'optimiser le contact électrique entre la mousse et les électrodes en cuivre.

2.2 Intégration d'une encre conductrice à base de PEDOT:PSS

L'un des objectifs de l'étude est de comprendre l'influence de la conductivité électrique sur la réponse piézorésistive de la mousse MIC. Il s'agit donc de comparer la réponse de la mousse MIC à plusieurs niveaux de conductivité. Pour augmenter la conductivité, une encre conductrice élaborée à partir de PEDOT:PSS avec additifs est incorporée dans la mousse MIC par une méthode de trempage déjà utilisé dans certains sujets de recherche (figure 1).

Le PEDOT:PSS est un polymère conducteur issu du mélange de deux polymères : le poly(3,4-éthylènedioxythiophène) (PEDOT) et le poly(styrène sulfonate) de sodium (PSS). Il est commercialisé sous forme de solution aqueuse et présente une conductivité élevée de l'ordre de 800 $S.cm^{-1}$. Son niveau de conductivité est multiplié par dix lorsqu'il est mélangé à du diméthylsulfoxyde (DMSO) et à de l'acide 4-dodécylbenzènesulfonique selon les fractions massiques répertoriées dans le tableau ci-dessous.

Constituants de l'encre	Fraction massique (en %)
PEDOT:PSS	94
DMSO	5
Acide 4-dodécylbenzènesulfonique	1

TABLEAU 1 − Proportions des constituants de l'encre conductrice

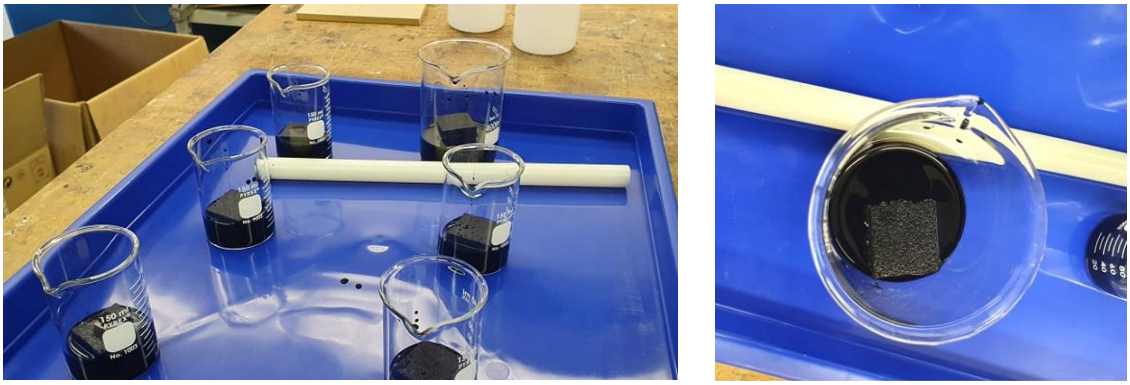


FIGURE 1 − Trempage des échantillons de mousse MIC dans l'encre conductrice à base de PEDOT:PSS et additifs.

Chaque échantillon est précompressé entièrement avant d'être plongé dans l'encre conductrice pendant 15 min. Après immersion totale, la mousse est compressée à nouveau afin d'évacuer l'encre en excès. Le séchage est ensuite réalisé dans une étuve à 100°C pendant 3h.

2.3 Essais quasi-statiques

La caractérisation du comportement électromécanique de la mousse MIC est réalisée grâce à des essais cycliques de compression uniaxiale en libre (fig.2a) et en confiné (fig.2b) dans les mêmes conditions de température et d'humidité (. L'étude vise également à comparer la réponse des échantillons chargés à 1,65%. La méthode consiste à mesurer l'évolution de la résistance électrique des échantillons au cours des cycles de compression.

Un cycle est défini par une phase d'écrasement de la mousse à une vitesse de déformation de 8 $mm.min^{-1}$ (66 $\%.min^{-1}$) selon la direction de son épaisseur jusqu'à atteindre 80% d'amplitude (9,6 mm) puis d'une phase de relâchement où la traverse revient à sa position initiale à la même vitesse. Ce cycle est réalisé dix fois en utilisant une machine de compression Instron de capacité max de 50 kN.

Les mesures de la charge sont acquises via une cellule de force de 500 N ± 0,0001 N. Les paramètres électriques sont déterminés à partir de la résistance mesurée aux bornes de l'échantillon. Pour cela, un micro-courant continu est délivré à la mousse par un micro-générateur. Une chaîne d'acquisition 0-10V mesure l'évolution de la tension aux bornes de l'échantillon. Connaissant la valeur du courant, on en déduit la résistance. Des surfaces en téflon recouvrent les plateaux de compression afin d'isoler électriquement les échantillons (fig.2). Par ailleurs, le téflon est un matériau avec un haut coefficient de frottement permettant un non-glissement des surfaces en contact.

Les paramètres mécaniques mesurés lors des essais de compression cyclique sont :

- La contrainte σ (en kPa) subie par l'échantillon est calculée à partir de la contrainte ingénieur définie comme telle :

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

  avec S la section (en m²) de l'échantillon considérée constante et F la charge (en N).

- La déformation ε est déterminée à partir du déplacement de la traverse par rapport à l'épaisseur e de l'échantillon :

$$\varepsilon = \frac{(H - H_0)}{e}$$

  avec H la position mesurée de la traverse et H_0, sa position initiale (en mm).

Le comportement électrique est caractérisé en déterminant les paramètres ci-dessous :

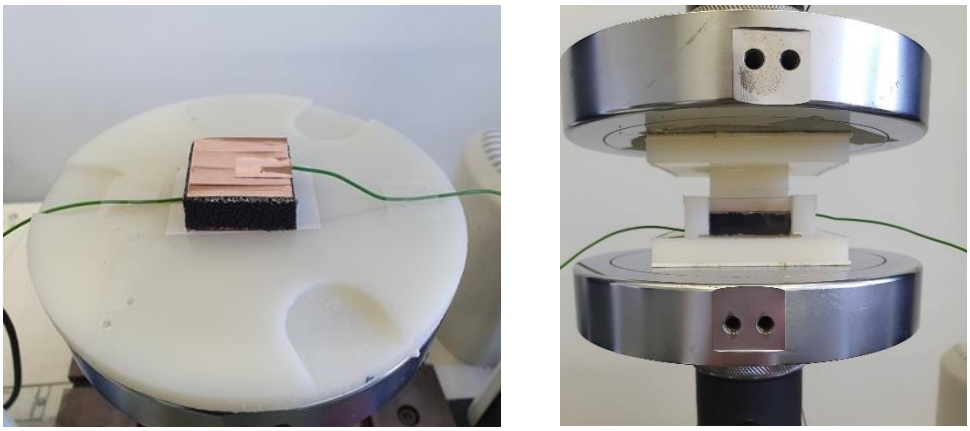
- La sensibilité électrique à la déformation, G_ε (en %) :

$$G_\varepsilon = \frac{(R - R_0)/R_0}{\varepsilon} = \frac{\Delta R/R_0}{\varepsilon}$$

avec R la résistance électrique mesurée et R_0 la résistance initiale (en Ω).

– La sensibilité électrique à la pression, G_σ (en Pa^{-1}) :

$$G_\sigma = \frac{(R - R_0)/R_0}{\sigma} = \frac{\Delta R/R_0}{\sigma}$$



(a) (b)

FIGURE 2 – Montage expérimental des essais de compression en libre (a) et en confiné (b)

2.4 Essais en choc

Les essais de choc ont vocation à caractériser le comportement dynamique des mousses piézorésistives dans le but de juger leur éventuelle utilisation en tant que capteur de choc. Prévus pour une intégration dans une structure, les échantillons sont en premier lieu testés en libre pour évaluer leur sensibilité à l'impact.

Le comportement électromécanique en dynamique de la mousse MIC chargée et non chargée est étudié en réalisant des impacts de faible énergie (tableau 2). Un impacteur plan en téflon d'une masse de 145 g et de même surface que les échantillons est lâché verticalement à différentes hauteurs et selon la direction de l'épaisseur des échantillons. On considère l'énergie d'impact comme étant égale à l'énergie potentielle définie par :

$$E_{impact} = E_{potentielle} = mgh$$

avec m la masse de l'impacteur (en kg), g l'accélération de la pesanteur (m.s^{-2}), et h la hauteur de chute (en m).

Energie potentielle (J)	Hauteur de chute (cm)
0,014	1
0,028	2
0,057	4
0,114	8
0,171	12
0,227	16

TABLEAU 2 – Valeurs d'énergie d'impact en fonction de la hauteur de chute de l'impacteur

La résistance électrique est mesurée au cours des essais avec la résistance relative maximale $(\Delta R/R_0)_{\max}$ comme critère de mesure principal.

3 Résultats et discussions

3.1 Essais en compressions cycliques

3.1.1 Première phase d'écrasement

En premier lieu, il est pertinent de s'intéresser au comportement électromécanique de la mousse MIC durant l'écrasement au cours du premier cycle. Ces essais en compression mettent en évidence les trois phases du comportement mécanique bien connu des mousses : élasticité, plateau et densification. Sur les échantillons de mousse MIC non chargée, la réponse résistive semble dépendre de ces trois phases (fig.3b et fig.3c) où la résistance électrique relative augmente significativement jusqu'au seuil de densification (≈53% de déformation ; ≈5kPa) puis diminue.

D'un point de vue microscopique, la phase de densification suppose un écrasement complet des cellules de la mousse (repli sur elles-mêmes) engendrant de nombreux points de contact électrique entre les charges se traduisant finalement par une meilleure conduction électrique. A l'inverse, l'augmentation de résistance à faible déformation est due à un flambement local des arêtes des cellules qui réduit le nombre de points de contact.

Les essais en confiné ont pour but de s'approcher de la condition d'intégration d'échantillons dans une structure. Les échantillons confinés montrent alors un comportement électromécanique général proche des échantillons en libre (fig.3a,b,c) avec toutefois une moindre sensibilité électrique à la déformation et à la contrainte (fig.3a,b,c). Une différence de résistance relative maximum d'environ 8% a pu être relevée par rapport aux échantillons testés en libre.

L'intégration de charges conductrices modifie considérablement le comportement électromécanique. Les résultats montrent une importante diminution de la sensibilité électrique (fig.3b,c,d) des échantillons chargés seulement à 1,65 % de leur masse d'encre conductrice. Cette influence du taux de charges a déjà été observée sur des mousses de polyuréthane chargées avec du graphène. La nette augmentation de conductivité électrique diminue la sensibilité (tableau 3).

Durant la phase d'élasticité (0-10% de déformation), on constate une diminution linéaire de la résistance entre − 1 et − 1,5%, puis une diminution moins marquée. En raison de cette faible variation de résistance, le bruit électrique émis par le générateur devient très visible et rend la mesure moins précise. Ce constat pourrait définir la condition qui détermine la conductivité maximum de la mousse.

Type d'échantillon	R_0	$(\Delta R/R_0)_{\max}$	$(G_\varepsilon)_{\max}$	$(G_\sigma)_{\max}$
Non chargé en libre	5,8 kΩ	49,63 %	1,37	0,11 kPa^{-1}
Non chargé en confiné	5,7 kΩ	41,35 %	0,94	0,08 kPa^{-1}
Chargé à 1,65% en libre	350 Ω	− 2 % (valeur min)	− 0,19 (valeur min)	− 0,005 kPa^{-1} (valeur min)

TABLEAU 3 − Comparaison des paramètres électriques des différents échantillons déterminés entre 0 et 60% de déformation.

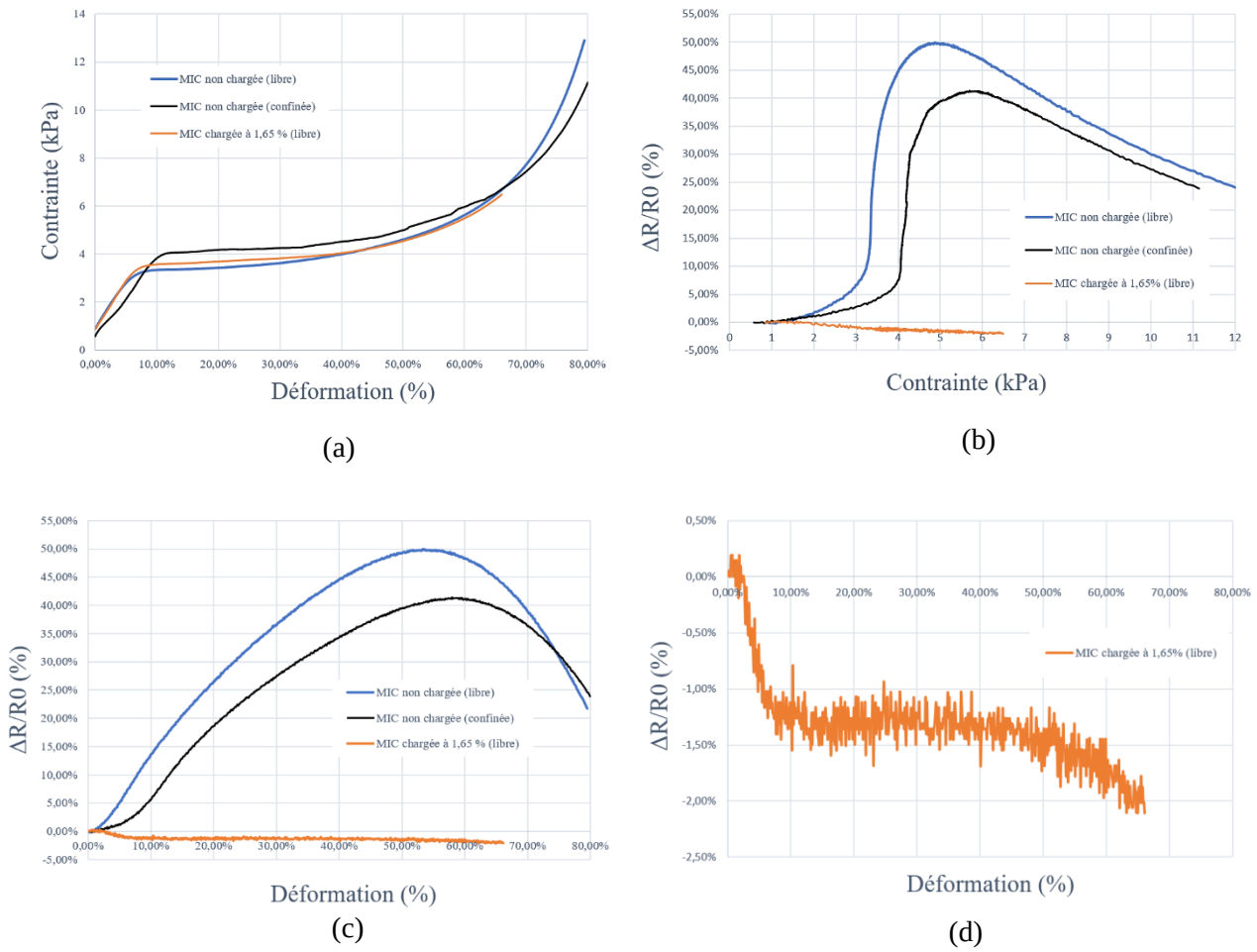


FIGURE 3 – Comportement électromécanique de la mousse MIC (non chargée en libre et en confinée, chargée en libre) au cours de la première phase d'écrasement avec : (a) la contrainte mécanique en fonction de la déformation ; évolution de la résistance électrique relative selon le niveau de contrainte (b) et de déformation (c) ; (d) focus sur la réponse électromécanique de la mousse MIC chargée.

3.1.2 Hystérésis électromécanique

Les essais en compression cyclique ont pour but d'étudier la répétabilité de la réponse électromécanique perçue à la première phase d'écrasement et de mettre en évidence l'influence de la viscoélasticité de la mousse MIC non chargée sur son comportement électrique.

A partir du deuxième cycle de compression, la mousse subit une perte de rigidité. Un cycle d'hystérésis mécanique est alors observable (fig.4a). Ce phénomène est connu sous l'effet Mullins. Il est dû à un endommagement de la microstructure qui voit ses cellules les plus fragiles se disloquer au cours de l'écrasement. La nature viscoélastique de la mousse polyuréthane est également à l'origine de ce phénomène.

Cette hystérésis mécanique n'est pas sans conséquence sur la réponse électrique. En effet, les mesures de la résistance relative en fonction de la déformation (fig.4b) et de la contrainte (fig.4c) révèlent également une hystérésis. En fin du cycle 1, la mousse montre un niveau de résistance bien plus élevé

(+ 160%) qu'en début de compression. Cette différence tend à diminuer avec l'augmentation du nombre de cycle (voir cycle 10 en fig.4). Une tendance vers une stabilisation du comportement électromécanique est alors perceptible au bout de 10 cycles de compression (fig.4d).
L'autre principale observation est que la réponse résistive observée au premier cycle (fig.4c) ne se répète pas aux cycles suivants. En effet, celle-ci décrit une diminution de la résistance en fonction de la déformation lors de la compression.

Toutefois, après un temps de repos de 24h, il a été observé que les échantillons de mousse MIC non chargée retrouve un comportement électromécanique similaire à celui observé au premier cycle avec une légère augmentation de la sensibilité et une rigidité diminuée (endommagement des échantillons).

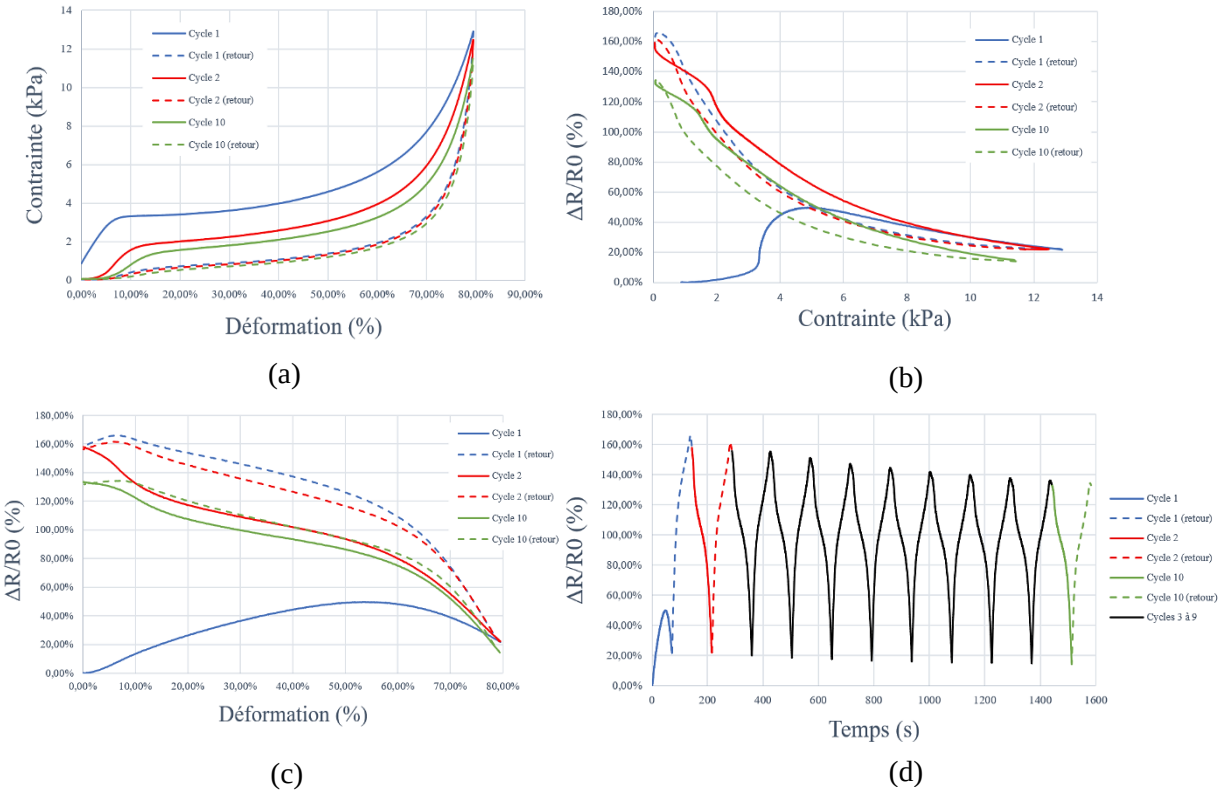


FIGURE 4 – Comportement électromécanique de la mousse MIC non chargée en compression cyclique libre avec : la contrainte mécanique en fonction de la déformation (a) ; évolution de la résistance électrique relative selon le niveau de contrainte (b) et de déformation (c) ; évolution de la résistance électrique relative au cours du temps (d).

3.3 Essais en choc

A la différence des essais quasi-statiques, les échantillons vont subir une compression rapide lors du contact avec l'impacteur. Après absorption de l'énergie du choc, l'impacteur est immobilisé sur la mousse. L'échantillon est sollicité selon une compression constante. Il s'agit d'une condition de relaxation. Par conséquent, la réponse observée correspond au comportement électrique de la mousse en relaxation. Un premier lien entre la viscoélasticité et résistance électrique est donc mis en valeur. Le comportement électrique s'apparente au comportement de la contrainte déjà observé dans des travaux consacrés à l'étude de la relaxation des mousses polymériques.

Globalement, la réponse électrique au moment de l'absorption du choc est visualisée comme une impulsion vers le haut du niveau de résistance relative suivi d'une diminution progressive correspondant à la réponse électrique en relaxation (fig.4a et 4b).

Sur tous les échantillons chargés, une brusque diminution de faible amplitude précède l'impulsion vers le haut (fig.5b). Pour les échantillons non chargés, cette observation n'est faite qu'au dernier palier d'énergie de choc (227 mJ) (fig.5a). A notre connaissance, aucun travail de recherche n'a mis en valeur ce type de réponse dans le cas des mousses piézorésistives. Cette réponse pourrait être interprétée par un amortissement de l'onde mécanique de l'impact se manifestant par de rapides oscillations verticales de la mousse. Un suivi de la déformation des échantillons réalisé au moyen d'une caméra rapide pourrait valider cette hypothèse.

La valeur de résistance relative maximum relevée semble être reliée proportionnellement avec le niveau d'énergie de choc (fig.4c) avec une très bonne répétabilité entre échantillons non chargés. A l'inverse, dans le cas des échantillons chargés, une importante dispersion des résultats est constatée (fig.5d) avec une relation non proportionnelle. De la même manière qu'en quasi-statique, les mousses chargées montrent (fig.5d) une sensibilité électrique au choc plus faible ($2\% \leq (\Delta R/R_0)_{max} \leq 10\%$).

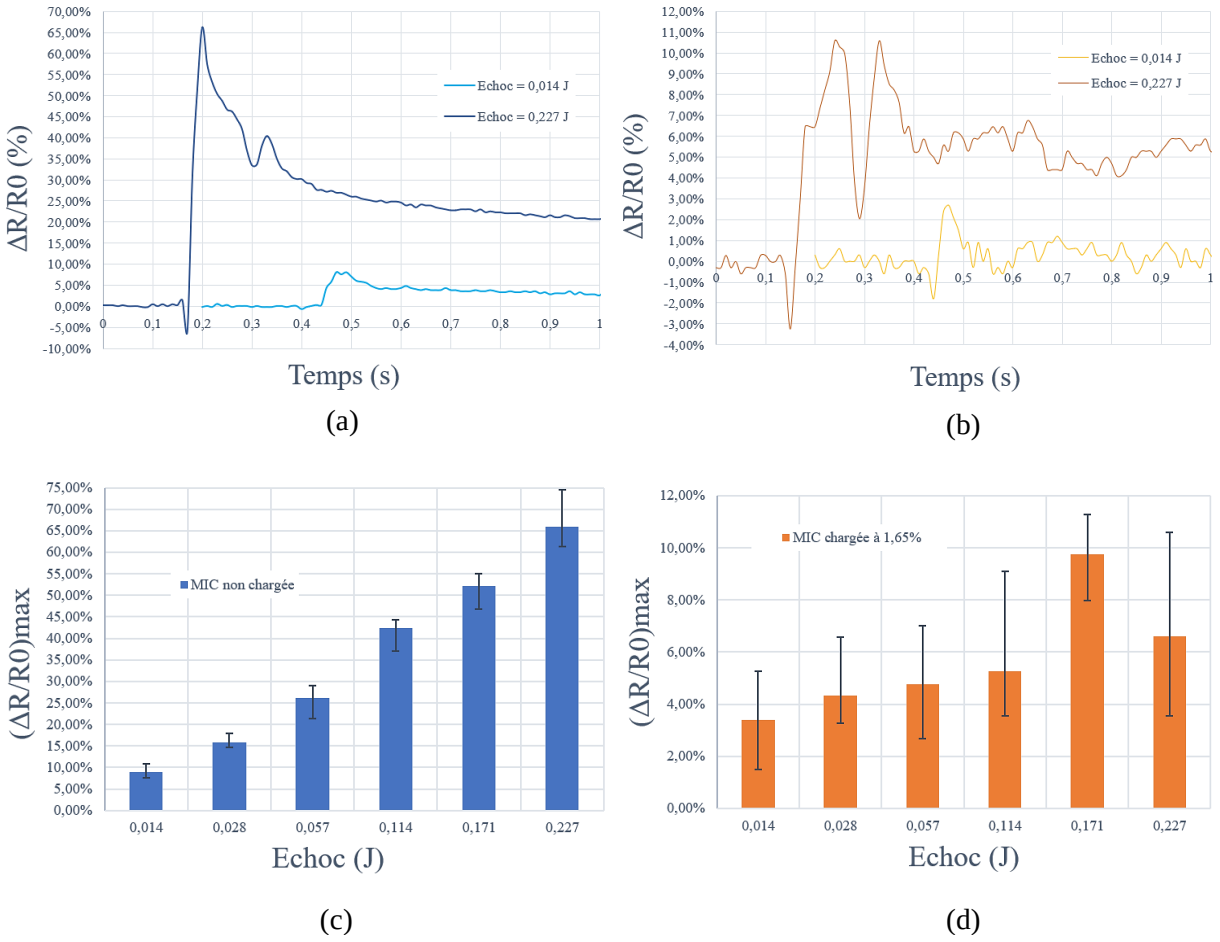


FIGURE 5 – Comparaison du comportement électromécanique en choc de la mousse MIC non chargée et chargée à 1,65%.
Allure de la réponse résistive représentative des échantillons de mousse MIC non chargée (a) et chargée (b) aux énergies de choc minimum et maximum des essais.
Niveau maximum de résistance relative atteint à chaque palier d'énergie d'impact des échantillons non chargés (c) et chargés (d).

4. Conclusion et perspectives

Le travail présenté dans cet article s'inscrit dans le cadre de la recherche de nouveaux capteurs de choc à base de matériaux intelligents destinés à être intégrés dans des structures composites de type sandwich (CSI). En particulier, le but est de caractériser le comportement électromécanique d'une mousse piézorésistive en compression quasi-statique et sous impacts de faible énergie en identifiant les paramètres clés.

Les essais en compression quasi-statique ont montré lors de la première phase d'écrasement que la mousse MIC comporte deux régimes de réponse de la résistance électrique : une phase montante (à faible déformation) puis descendante (à grande déformation) avec un facteur de sensibilité G_ε maximum de 1,37. Le confinement des échantillons diminue de manière notable cette sensibilité électrique ($G_{\varepsilon\max}$=0,94). Ces résultats permettent de dire que l'intégration d'échantillons dans une structure aura une influence non négligeable sur leur sensibilité et donc sur leur performance en termes de détection.

Afin d'étudier l'influence du niveau de conductivité électrique sur le comportement électromécanique, la mousse MIC a été dopée avec une solution d'encre conductrice par une simple méthode de trempage. Chargés à un taux massique de 1,65%, les échantillons ont vu leur résistance initiale diminuer drastiquement de 94% engendrant un changement de régime de réponse en résistance. En effet, lors de l'écrasement de la mousse MIC chargée, les facteurs de sensibilité G_ε et G_σ sont négatifs. Ces résultats montrent que la conductivité électrique nominale des échantillons influence directement la sensibilité électrique et donc le comportement électromécanique. Ne connaissant pas la constitution de la charge de la mousse MIC, le lien entre taux de charges et conductivité électrique ne peut être établi correctement.
Par conséquent, une des perspectives est l'étude de la relation entre la conductivité et la sensibilité électrique de mousses piézorésistives dont la matrice est uniquement constituée en polyuréthane et chargées à diverses concentrations d'encre conductrice afin d'attribuer un niveau de sensibilité et donc un taux de charges optimal (seuil de percolation) en fonction de l'intensité des sollicitations à détecter.

Le potentiel de détection de choc de la mousse piézorésistive a été mis en évidence. Les résultats montrent une sensibilité électrique au choc importante (à partir de 14 mJ). Une réponse impulsionnelle de la résistance peut être observée au cours du temps suivi d'une décroissance progressive. Ces essais pourraient être réalisés à l'aide d'une caméra rapide afin de relier la déformation en temps réel et le signal de la résistance électrique.

Sur les échantillons de mousse MIC, le plus haut niveau de résistance relevé est proportionnel à l'énergie de choc avec une bonne répétabilité (faible marge d'erreur). Les échantillons chargés à 1,65% montrent une sensibilité au choc bien plus faible avec une importante disparité des résultats. De la même manière qu'en quasi-statique, l'augmentation de la conductivité joue un rôle important sur la sensibilité électrique. Par ailleurs, la condition de confinement pourrait également être étudiée en choc.
Ces essais ont globalement pu mettre en évidence la réactivité de la mousse en quasi-statique et dynamique. L'un des principaux paramètres qui influencent sa sensibilité au choc est sa conductivité électrique nominale. Afin d'évaluer son utilisation en tant que système CSI, des essais d'impacts sur structure sandwich avec mousse piézorésistive intégrée devront être entrepris.

Références

[1] Birman V, Kardomateas GA. Review of current trends in research and applications of sandwich structures. Composites Part B: Engineering. juin 2018;142:221-40.