



**HAL**  
open science

**Protection d'une structure face à une onde de souffle  
avec isolant thermique et bardage rapportés :  
Caractérisation des isolants et modélisation simplifiée de  
l'effet protecteur**

Hamza El Yamani, Jean-Luc Hanus, Huabin Zeng, Patrice Bailly, Gaëtan  
Prod'Homme, Benjamin Le-Roux

► **To cite this version:**

Hamza El Yamani, Jean-Luc Hanus, Huabin Zeng, Patrice Bailly, Gaëtan Prod'Homme, et al.. Protection d'une structure face à une onde de souffle avec isolant thermique et bardage rapportés : Caractérisation des isolants et modélisation simplifiée de l'effet protecteur. Congrès Français de Mécanique 2022, Aug 2022, Nantes, France. hal-03833683

**HAL Id: hal-03833683**

**<https://hal.science/hal-03833683v1>**

Submitted on 28 Oct 2022

**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.

# Protection d'une structure face à une onde de souffle avec isolant thermique et bardage rapportés : Caractérisation des isolants et modélisation simplifiée de l'effet protecteur

H. EL YAMANI<sup>1</sup>, J-L. HANUS<sup>1</sup>, H. ZENG<sup>1</sup>, P. BAILLY<sup>1</sup>,  
G. PROD'HOMME<sup>2</sup>, B. LE-ROUX<sup>2</sup>

1. Laboratoire de Mécanique Gabriel Lamé, INSA Centre Val de Loire, Université de Tours, Université d'Orléans
2. Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques (INERIS)

## Résumé :

*La protection des bâtiments industriels face aux ondes de souffles, d'origine accidentelle ou malveillante, est un enjeu important. Une solution de protection de ces bâtiments est d'utiliser des matériaux isolants thermiques permettant d'absorber de l'énergie par déformation, permettant également de répondre à la RT 2020 (Réglementation Thermique 2020). Dans cet article, nous décrivons le comportement de matériaux isolants couramment utilisés en France et nous développons une méthodologie simple pour évaluer la capacité dissipative d'un revêtement constitué d'un bardage supposé rigide et du matériau isolant, protégeant une structure. Cette modélisation montre que si un effet atténuateur est possible, son efficacité va dépendre tout à la fois de la signature de la sollicitation et des caractéristiques physiques et géométriques du système de protection. Ces cas de figure sont mis en avant dans ce travail et sont basés sur les réglementations et normes en vigueur (RT 2020, PPRT, dimensionnement des bardages).*

## Abstract :

*The protection of industrial buildings from blast waves, whether accidental or malicious, is an important subject of concern. One solution to protect these buildings is to use thermal insulating materials that can absorb energy by deformation, also allowing to answer the Thermal Regulation 2020. In this paper, we describe the mechanical behavior of insulating materials commonly used in France and we develop a simple tool to evaluate the dissipative capacity of a cladding composed of a rigid cladding and an insulating material, protecting a structure. This modeling shows that if a mitigation effect is possible, its effectiveness will depend on both the signature of the blast loading and the physical and geometric characteristics of the protection system. These cases are highlighted in this work and are based on the regulations and standards in effect.*

**Mots clefs : Mousse polymère, laine minérale, comportement mécanique, simulation numérique, revêtement dissipatif, risque explosion**

# 1 Introduction

La protection de bâtiments sur des sites industriels face à des sollicitations dynamiques de type onde de souffle, d'origine accidentelle ou malveillante, est un sujet d'intérêt pour les ingénieurs. Les bâtiments, et en particulier les constructions métalliques ou légères, s'avèrent parfois peu protecteurs voire amplificateurs de ces effets (risque d'effondrement) et nécessitent d'être renforcés. Cette mitigation des effets accidentels, pour rester économiquement viable, requiert la mise en œuvre de matériaux et de concepts spécifiques et innovants pour le dimensionnement des futures structures ou le renforcement de l'existant.

Dans le domaine de la protection face aux risques industriels ou la malveillance, la protection lourde (type bunker) est une solution difficilement envisageable dans l'industrie comme pour les bâtiments recevant du public. Aujourd'hui, la protection coûteuse et restrictive pour l'architecture est souvent abandonnée au profit de mesures de prévention (zone d'effets, PPRT). Dans le domaine militaire, ces dernières années ont vu apparaître des solutions de protection spécifiques aux impacts de type matériaux cellulaires ou composites. Ce type de solution montre des facultés d'absorption et de modification des chargements intéressants pour la protection des structures. Néanmoins, ces solutions spécifiques restent complexes à produire et coûteuses pour des applications à grande échelle.

En parallèle, les réglementations thermiques successives favorisent l'isolation de plus en plus importante des bâtiments. L'étude du potentiel dissipatif d'une isolation extérieure (bardage métallique-matériau isolant), pour les constructions existantes ou futures pour atténuer les effets de l'onde sur le bâtiment, semble une piste intéressante techniquement et économiquement permettant d'allier protection face aux risques technologiques et rénovation énergétique. Dans cet article, cette solution est étudiée en effectuant une modélisation simplifiée du problème.

## 2 Comportement mécanique des matériaux isolants

### 2.1 Mousse de polyisocyanurate

La mousse étudiée est une mousse de polyisocyanurate (PIR), produite par l'entreprise Recticel. Cette mousse est commercialisée sous forme de panneaux isolants d'épaisseur 6 cm (fig. 1). Du point de vue morphologique, il s'agit d'une mousse polymère rigide à cellules fermées et d'une très faible densité ayant une masse volumique de  $30 \text{ kg/m}^3$ . Sa conductivité thermique est de  $0,022 \text{ W/(m K)}$ , ce qui donne une résistance thermique surfacique de  $2,73 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ . C'est donc un isolant thermique classique de très haute qualité.



FIGURE 1 – Echantillon de mousse de polyisocyanurate industrielle (Recticel)

Le comportement en compression de la mousse de polyisocyanurate a été étudié pour des vitesses de sollicitations quasi-statiques. La norme EN826 fixe la vitesse de sollicitation quasi-statique de référence à 10%/min pour les isolants thermiques [1]. Des essais de compression simple ont été réalisés dans la direction de croissance et dans des directions perpendiculaires. Ils ont été complétés par des essais de compression confinée dans la direction de croissance, afin d'être représentatif du comportement du panneau isolant.

Le comportement de la mousse est isotrope transverse suivant la direction de croissance (fig. 2) et fait apparaître les trois phases caractéristiques de la réponse en compression des matériaux cellulaires : phase élastique, phase plateau et phase de densification [2]. Pour la gamme des vitesses quasi-statiques étudiées, la sensibilité à la vitesse demeure faible, mais les résultats mettent néanmoins en évidence la viscoélasticité (augmentation du module d'Young en fonction de la vitesse de sollicitation) et la viscoplasticité (augmentation de la contrainte plateau en fonction de la vitesse de sollicitation) du matériau [3].

Les essais de compression œdométrique dans la direction de croissance ont révélé une augmentation apparente du module d'élasticité limitée en raison de la faible valeur du coefficient de Poisson. Malgré une forte dispersion sur les résultats, les essais de compression œdométrique montrent une faible influence du confinement sur la réponse non linéaire du matériau avec une très légère augmentation des contraintes seuil et de plateau [3].

Les essais réalisés par analyse mécanique dynamique (DMA) ont permis d'étudier les caractéristiques viscoélastiques de la mousse, notamment en montrant un module d'Young dynamique supérieur au module d'Young statique, et un coefficient de viscoélasticité de l'ordre de 250 Pa.s. Les essais réalisés aux barres de Hopkinson ont permis d'étudier le comportement viscoplastique de la mousse, en déterminant la contrainte plateau pour plusieurs vitesses de déformation, en compression simple et œdométrique. Le coefficient de viscoplasticité a été déterminé par méthode inverse en simulant les essais, et ce coefficient est du même ordre de grandeur que le coefficient de viscoélasticité [3].

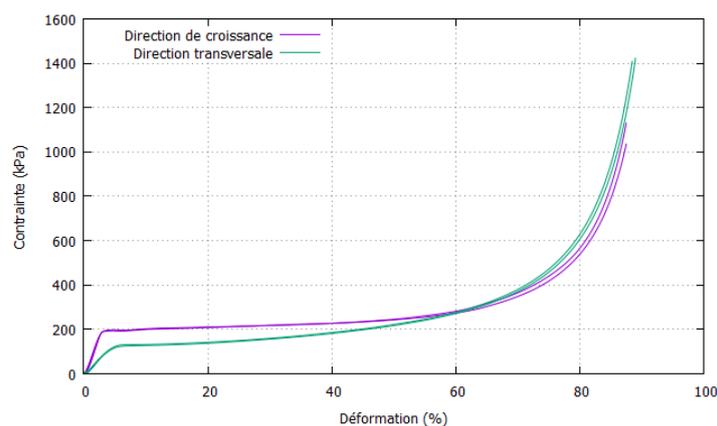


FIGURE 2 – Courbes de comportement des échantillons parallélépipédiques dans les deux directions

## 2.2 Laine de verre

La laine de verre étudiée est produite par l'entreprise URSA. Cette laine minérale est commercialisée sous forme de panneaux isolants semi-rigides revêtus d'épaisseur 7,5 cm (fig. 3). Du point de vue morphologique, il s'agit d'une laine minérale de très faible densité, ayant une masse volumique de 30 kg/m<sup>3</sup>.

Sa conductivité thermique est de  $0,032 \text{ W/(m K)}$ , ce qui donne une résistance thermique surfacique de  $2,34 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$ . C'est également un isolant thermique classique de haute qualité.



FIGURE 3 – Échantillon de laine de verre étudiée

La laine de verre a été étudiée en compression simple quasi-statique selon la direction perpendiculaire à la stratification initiale uniquement, et en faisant varier la vitesse de compression de la mousse. La norme EN826 permet également de fixer la vitesse de sollicitation quasi-statique de référence à  $10\%/min$  pour cet isolant [1]. En raison de la très faible résistance mécanique, des échantillons de plus grandes dimensions (Fig. 3) ont été testés ( $24 \times 35 \text{ cm}^2$ ) dans la seule direction de l'épaisseur. Compte-tenu de la très grande porosité ouverte, il n'a pas été jugé utile de réaliser des essais quasi-statiques confinés.

Le comportement mécanique de la laine de verre est un comportement sans seuil élastique, composé de deux phases, une phase plateau et une phase de densification. L'influence de la vitesse sur le comportement est très peu marquée pour de faibles vitesses. La littérature fait parfois état d'un comportement initialement élastique jusqu'à un seuil, et ce comportement n'a pas été observé ici [4]. Deux explications sont possibles : la première serait que la phase élastique existe, mais à un niveau de contrainte et de déformation très faibles non mesurables avec notre instrumentation ; la deuxième serait qu'après sa fabrication, lors de l'emballage, du stockage ou du transport par exemple, la laine de verre ait subi des efforts suffisamment importants pour dépasser son seuil élastique et que nous l'étudions pré-endommagée et pré-déformée. Ceci dit, le matériau testé est représentatif du comportement d'un panneau isolant en usage réel.

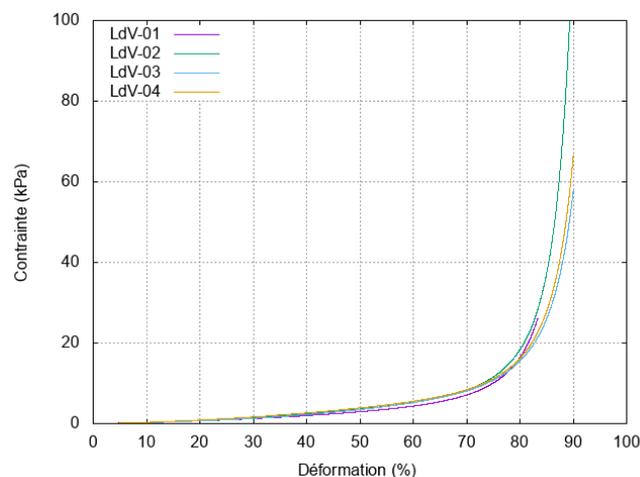


FIGURE 4 – Courbes de comportement de la laine de verre en quasi-statique

### 3 Modélisation du problème et simulation numérique

#### 3.1 Problème résolu et type de sollicitation étudié

Le problème général consiste à déterminer la réponse d'un bâtiment équipé d'un revêtement de protection face à un chargement de type onde de souffle résultant d'une détonation. Le chargement est supposé connu et utilisé comme donnée d'entrée du calcul. La résolution complète d'un problème de couplage fluide-structure est extrêmement complexe et une version plus simple, cohérente pour des accidents industriels avec de faibles niveaux de surpression incidente, est retenue, celle d'un comportement linéaire du fluide, approche dite de « l'acoustique linéaire » [5].

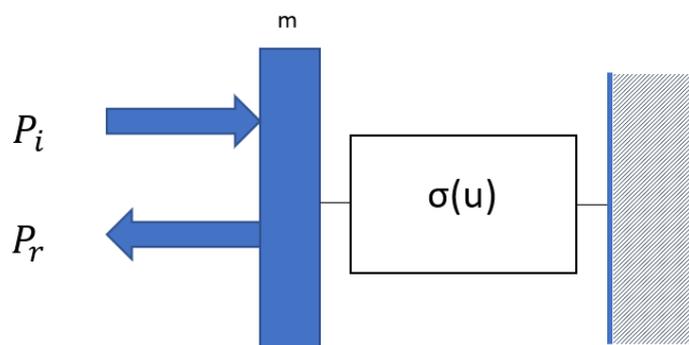


FIGURE 5 – Modélisation de la structure : bardage et isolant à réponse non linéaire

L'objectif de cette modélisation est d'effectuer une première prédiction sur un problème de structure *revêtement de protection* (bardage et matériau isolant) - *bâtiment*, avec un effort de surpression arrivant sur ce système. Pour évaluer l'effet du dispositif de protection, nous effectuerons le calcul de la surpression transmise sur le bâtiment et du déplacement du bardage.

Les systèmes de bardage sont réalisés à partir de tôles en acier ou en aluminium, d'épaisseur comprise entre 0,63 mm et 1,50 mm [6]. Pour permettre une isolation thermique suffisante, une épaisseur caractéristique d'isolant de 100 mm à 300 mm au minimum est à envisager, selon l'application des réglementations thermiques dites RT 2012 ou RT 2020. L'épaisseur du bardage pourra donc être négligée vis-à-vis de celle de l'isolant. La différence de module d'Young entre le bardage, typiquement pour l'aluminium 74 GPa et pour l'acier 200 GPa et celle de l'isolant thermique, typiquement pour la mousse PIR étudiée 11 MPa, permettra également de supposer le bardage comme rigide dans le modèle unidimensionnel.

Dans ce cas, l'équation du mouvement est donnée par (1), obtenue par le principe fondamental de la dynamique appliqué sur le bardage, et par l'équation de d'Alembert pour la propagation de l'onde de souffle dans l'air avant impact sur le bardage.

$$m \frac{d^2 u(t)}{dt^2} + Z_a \frac{du(t)}{dt} + \sigma(u) = 2\Delta P_i(t) \quad (1)$$

Avec  $\sigma(u)$  la loi de comportement du matériau, supposé homogène et isotrope. Selon que la mousse de polyisocyanurate ou la laine de verre est étudiée, la fonction  $\sigma(u)$  changera.

La sollicitation peut être de plusieurs natures. Nous nous intéressons en premier lieu aux détonations, donc nous choisirons un signal de pression de type Friedlander théorique [7] :

$$\Delta P_i(t) = \Delta P_0 \left(1 - \frac{t}{t_f}\right) e^{-\Lambda \frac{t}{t_f}} \quad (2)$$

Avec  $\Delta P_0$  la surpression incidente,  $t_f$  la durée de phase positive et  $\Lambda$  une constante permettant d'ajuster la forme du signal. Nous prendrons  $\Lambda = 1$  pour les développements initiaux par la suite.

### 3.2 Modèles unidimensionnels de comportement des matériaux

Pour la mousse de polyisocyanurate, nous avons retrouvé lors des essais de caractérisation les trois phases de comportement caractéristiques des matériaux cellulaires. Nous avons déterminé en statique une courbe moyenne de comportement que nous approchons par morceaux :

$$\sigma(u) = \begin{cases} E\varepsilon(u) & \text{si } \varepsilon(u) \leq \varepsilon_y \\ H\varepsilon(u) + C & \text{si } \varepsilon(u) \leq \varepsilon_d \\ A \exp(B\varepsilon(u) + D\varepsilon(u)^2) & \text{si } \varepsilon(u) > \varepsilon_d \end{cases} \quad (3)$$

Où nous pouvons relier la déformation globale de la mousse au déplacement du bardage par :

$$\varepsilon(u) = \frac{u}{e_p} \quad (4)$$

Les autres coefficients de  $\sigma(u)$  sont identifiés à partir des résultats expérimentaux.

Avec ces conditions, il est possible de déterminer les valeurs de tous les paramètres du modèle. Pour compléter le modèle afin d'être plus représentatif du comportement réel du matériau, nous introduisons également la possibilité de décharge élastique. Dans ce cas, il faut introduire une partition des déformations. La déformation plastique dépend de la fonction de contrainte par :

$$\varepsilon_p(u) = \varepsilon(u) - \frac{\sigma(u)}{E} \quad (5)$$

Lors d'une décharge élastique, la déformation plastique ne change pas. Le calcul de la contrainte en fonction de la déformation plastique sera donné par l'équation (6).

$$\sigma(u, \varepsilon_p) = E(\varepsilon(u) - \varepsilon_p(u)) \quad (6)$$

La fonction  $\sigma$  en fonction de  $\varepsilon$  est donnée en figure 6, comparée avec la courbe moyenne du comportement de la mousse de polyisocyanurate. Cette fonction est obtenue en prenant les valeurs dans le tableau 1 pour les paramètres du modèle. Nous reportons sur la figure 6 les courbes issues des essais et du modèle.

Caractéristique du comportement	Valeur	Paramètre empirique	Valeur
Module d'Young E (MPa)	8.5	Module d'écrouissage H (kPa)	133,9
Limite d'élasticité (kPa)	190	C (kPa)	187
Contrainte plateau (kPa)	230	A (MPa)	832,2
Déformation à la densification (%)	62	B	-26,41
Contrainte à 90% de déformation (kPa)	1700	D	21,70

TABLE 1 – Paramètres identifiés pour le modèle de mousse

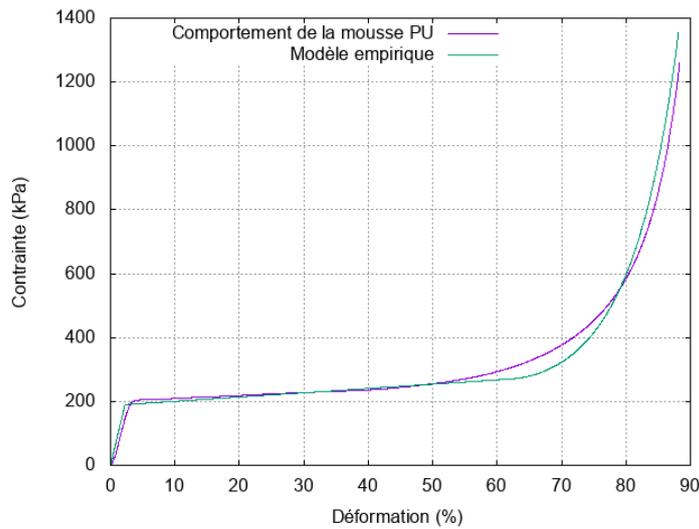


FIGURE 6 – Réponse en compression de la mousse de polyisocyanurate : expérience et modèle

Pour la laine de verre, nous utilisons la fonction suivante :

$$\sigma(u) = A \exp(B\varepsilon(u) + C\varepsilon(u)^2 + D\varepsilon(u)^3) + \sigma_a(u) \tag{7}$$

Il apparaît dans cette expression deux contributions, celle due au *squelette* de la laine de verre et déduite des essais de compression statiques mais également celle de l’air ( $\sigma_a(u)$ ) qui, contrairement aux essais statiques ne pourra pas s’échapper lors d’une compression dynamique. Comme l’illustre la figure, la contribution de l’air sera prépondérante aux forts niveaux de déformation.

Pour déterminer les coefficients de la fonction, nous effectuons une régression, permettant d’obtenir directement les valeurs des paramètres sans calcul analytique (tableau 2).

Paramètre	A (Pa)	B	C	D
Valeur	0.1176	52.79	-88.83	52.08

TABLE 2 – Paramètres identifiés pour le modèle de la laine de verre

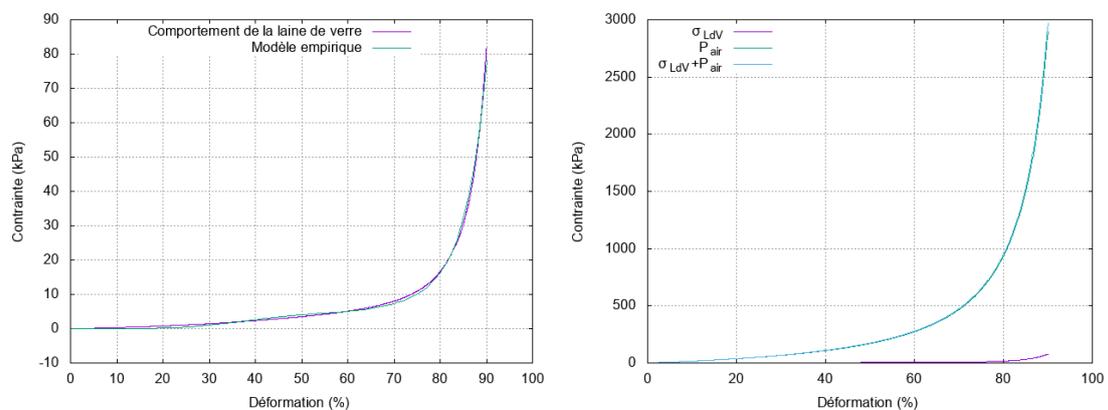


FIGURE 7 – Réponse en compression de la laine de verre : expérience et modèle (gauche) contribution respective du squelette cellulaire et de l’air (droite)

L’effet de vitesse peut être décrit de deux manières : soit par l’ajustement des paramètres de la loi empirique, ce qui nécessiterait la connaissance en amont de la vitesse de sollicitation, soit en ajoutant un

coefficient d'amortissement au terme de vitesse dans l'équation différentielle, coefficient lié à la viscosité du matériau. Pour cette dernière possibilité, l'expression de la contrainte serait :

$$\sigma(u) = \sigma_s(u) + \frac{\eta}{e_p} \frac{du}{dt} \quad (8)$$

Avec  $\sigma_s(u)$  la contrainte en statique,  $\eta$  la viscosité du matériau et  $e_p$  l'épaisseur de l'isolant.

Remarque : Dans les simulations présentées, l'effet de la vitesse de sollicitation sur le comportement ne sera pas pris en compte.

### 3.3 Résolution numérique

Pour résoudre l'équation différentielle (1), nous utiliserons un schéma numérique de Runge-Kutta d'ordre 4 avec dérivée seconde. La procédure de résolution numérique se base sur la forme générale de l'équation :

$$\frac{d^2u}{dt^2} = f\left(t, u, \frac{du}{dt}\right) \quad (9)$$

Posons les changements de fonctions suivants :

$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u \\ \frac{du}{dt} \end{pmatrix} \quad (10)$$

Ceci donne le système différentiel suivant :

$$\begin{pmatrix} \frac{dy_1}{dt} \\ \frac{dy_2}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{du}{dt} \\ \frac{d^2u}{dt^2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_2 \\ f(t, y_1, y_2) \end{pmatrix} \quad (11)$$

Avec les conditions initiales connues ( $y_1(t_0)$  et  $y_2(t_0)$  connues). Pour résoudre ce système numériquement, l'intervalle d'étude sera subdivisé de manière uniforme  $N$  fois, avec un pas de division  $h$ , et une résolution sera réalisée pour chaque subdivision.

Soit  $[t_i, t_{i+1}]$  une subdivision quelconque. Calculons le vecteur suivant :

$$\vec{k}_1 = \begin{pmatrix} y_2(t_i) \\ f(t_i, y_1(t_i), y_2(t_i)) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_{1,1} \\ k_{1,2} \end{pmatrix} \quad (12)$$

Ce vecteur peut être calculé, parce que les conditions initiales sont connues, et, par récurrence, permettent de calculer  $y_1$  et  $y_2$  à chaque instant, avant d'arriver à l'intervalle  $[t_i, t_{i+1}]$ . Dans le cas où l'intervalle  $[t_i, t_{i+1}]$  est le premier intervalle,  $t_i$  correspond à  $t_0$  et donc  $y_1$  et  $y_2$  sont connues à cet instant. Par la suite, selon l'ordre du schéma numérique qui est utilisé, des vecteurs supplémentaires seront calculés. Nous avons :

$$\vec{k}_2 = \begin{pmatrix} y_2(t_i) + k_{1,1} \frac{h}{2} \\ f\left(t_i + \frac{h}{2}, y_1(t_i) + k_{1,2} \frac{h}{2}, y_2(t_i) + k_{1,2} \frac{h}{2}\right) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_{2,1} \\ k_{2,2} \end{pmatrix} \quad (13)$$

$$\vec{k}_3 = \begin{pmatrix} y_2(t_i) + k_{2,1} \frac{h}{2} \\ f\left(t_i + \frac{h}{2}, y_1(t_i) + k_{2,2} \frac{h}{2}, y_2(t_i) + k_{2,2} \frac{h}{2}\right) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_{3,1} \\ k_{3,2} \end{pmatrix} \quad (14)$$

$$\vec{k}_4 = \begin{pmatrix} y_2(t_i) + k_{3,1} h \\ f(t_i + h, y_1(t_i) + k_{3,2} h, y_2(t_i) + k_{3,2} h) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} k_{4,1} \\ k_{4,2} \end{pmatrix} \quad (15)$$

Enfin, les valeurs des fonctions  $y_1$  et  $y_2$  à l'instant  $t_{i+1}$  sont données par :

$$\begin{pmatrix} y_1(t_{i+1}) \\ y_2(t_{i+1}) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_1(t_i) \\ y_2(t_i) \end{pmatrix} + (\vec{k}_1 + 2\vec{k}_2 + 2\vec{k}_3 + \vec{k}_4) \frac{h}{6} \quad (16)$$

La répétition de cette procédure pour toutes les subdivisions de l'intervalle de l'équation différentielle aboutit à la résolution de l'équation sur l'intervalle d'étude. Grâce à cette procédure, il sera possible d'effectuer la résolution de l'équation en introduisant n'importe quelle loi de comportement  $\sigma(u)$ .

Pour obtenir une simulation numérique plus représentative de la réalité, une possibilité de décharge élastique est prise en compte. Dans le cas de la mousse de polyisocyanurate, le comportement en décharge est très différent du comportement en charge. Pour la laine de verre, compte tenu du rôle prédominant joué par l'air, nous supposons que la courbe de décharge reste voisine de celle de la charge.

Pour le calcul du déplacement et de la déformation, l'algorithme précédent est modifié. L'algorithme de calcul de la contrainte, en fonction du déplacement et de la déformation plastique, se base tout d'abord sur le calcul de la déformation plastique, qui va dépendre de la déformation à l'état actuel et de la déformation plastique à l'état précédent.

- Si la déformation est inférieure à  $\varepsilon_y$ , la déformation plastique reste nulle ;
- Dès lors que la déformation dépasse  $\varepsilon_y$ , la déformation plastique est donnée par :  $\varepsilon_{pi} = \varepsilon_i - \frac{\sigma(u)}{E}$
- La valeur de la déformation plastique est donnée par sa valeur à l'état actuel, sauf si le matériau est en décharge/charge élastique, et dans ce cas, elle vaut sa valeur à l'état précédent.

Pour savoir si le matériau est en charge/décharge élastique, il suffit de noter la valeur maximale de la déformation atteinte, et de comparer la valeur de la déformation actuelle à cette valeur-ci.

## 4 Résultats et discussions

### 4.1 Réponse en surpression transmise

Concernant les sollicitations, nous étudierons dans un premier temps deux cas de figure, de surpressions respectives 200 et 800 mbar, et d'une durée de phase positive de 30 ms. La masse surfacique du bardage sera de  $7 \text{ kg/m}^2$  [8]. L'impédance acoustique  $Z_a$  est égale à  $417 \text{ kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$  et la célérité  $C_0$  correspond à la célérité du son dans l'air, et qui vaut  $340 \text{ m/s}$  ( $C_0 = \sqrt{\gamma P_0 / \rho_{air}}$ ).

Pour la mousse de polyisocyanurate, nous imposons une épaisseur d'isolant de 6 cm, et pour la laine de verre, une épaisseur de 7,5 cm. Ces épaisseurs, très faibles, correspondent aux épaisseurs des panneaux dans lesquels ont été prélevés les échantillons pour caractériser le comportement des matériaux. Les courbes en figure 8 et 9 présentent les surpressions transmises en fonction du temps, comparées au chargement sur le bardage (somme de la surpression incidente et de la surpression réfléchie).

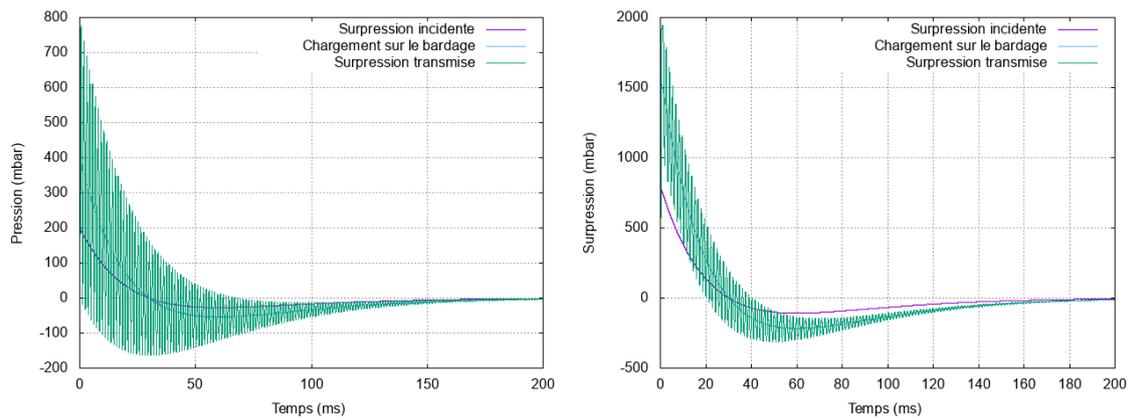


FIGURE 8 – Surpressions transmises avec la mousse PIR comme isolant et avec un chargement de type Friedlander : à gauche, surpression incidente à 200 mbar, à droite, surpression incidente à 800 mbar

Pour la sollicitation à 200 mbar, la réponse en surpression transmise est une courbe qui oscille autour de la surpression du chargement sur le bardage. La période des oscillations est liée à la pulsation, qui dépend de la raideur du matériau isolant en phase élastique et de la masse surfacique du bardage.

Pour la sollicitation à 800 mbar, nous remarquons que dès la première oscillation, la limite d'élasticité est atteinte, et que la première oscillation voit sa période augmenter due à la plastification de la mousse. Après la plastification, la mousse se décharge élastiquement et reste à l'état élastique jusqu'à la fin de la simulation.

Dans les deux situations, la surpression transmise maximale est supérieure à la surpression sur le bardage, il y a donc amplification.

Nous utilisons la loi empirique pour le comportement mécanique de la laine de verre déterminée à l'équation (7) et dont la courbe a été tracée en figure 7. Les résultats des simulations sont en figure 9.

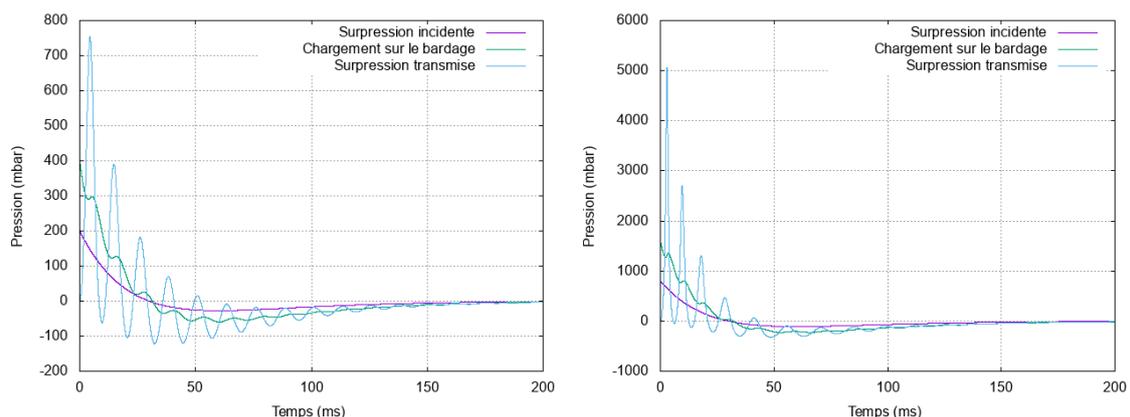


FIGURE 9 – Chargements transmis avec la laine de verre comme isolant pour un chargement avec signal de type Friedlander : à gauche, surpression incidente à 200 mbar, à droite, surpression incidente à 800 mbar

La réponse en surpression transmise dans le cas de la laine de verre est similaire à la réponse pour la mousse de polyisocyanurate, c'est une courbe qui oscille autour de la courbe de chargement sur le bardage. Il y a également amplification de la surpression transmise par rapport à la surpression sur le

bardage. La période des oscillations est plus élevée, puisque la raideur apparente dans le cas de la laine de verre est plus faible que la raideur de la mousse de polyisocyanurate en phase élastique.

## 4.2 Discussions : capacité d'atténuation

Les premières simulations discutées précédemment ont été réalisées avec une épaisseur d'isolant très faible, non réaliste vis-à-vis d'une mise en œuvre dans la cadre des réglementations thermiques RT 2012 ou RT 2020. Nous choisissons donc d'augmenter l'épaisseur du matériau de protection, et nous prenons une épaisseur de 30 cm. Les figures 10 et 11 comparent les surpressions transmises obtenues entre l'épaisseur originale de l'isolant et l'épaisseur de 30 cm, pour chaque isolant.

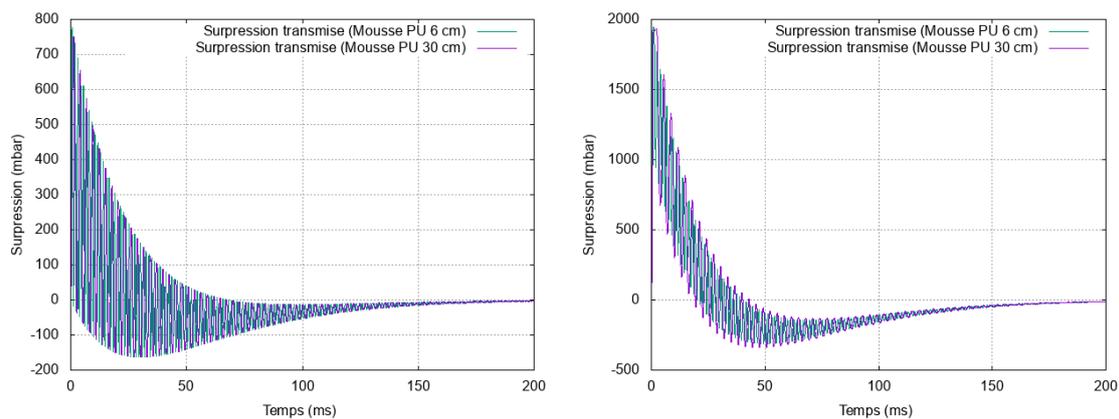


FIGURE 10 – Comparaison des chargements transmis pour deux mousses d'épaisseurs différentes : à gauche, chargement de 200 mbar, à droite, chargement de 800 mbar

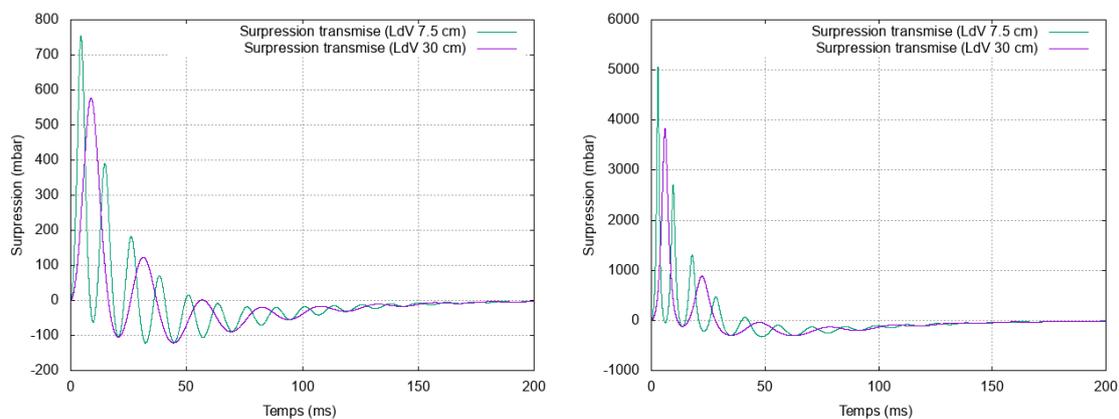


FIGURE 11 – Comparaison des chargements transmis pour deux laines d'épaisseurs différentes : à gauche, chargement de 200 mbar, à droite, chargement de 800 mbar

Tout d'abord, nous observons que la période des oscillations augmente lorsque l'épaisseur augmente, dans tous les cas. Ceci s'explique de manière simple : l'augmentation de l'épaisseur implique la diminution de la raideur surfacique en phase élastique, ce qui diminue la pulsation des signaux et fait donc augmenter la période.

Pour la mousse de polyisocyanurate, la surpression maximale est plus faible pour une épaisseur plus élevée uniquement pour le chargement de 200 mbar, avec une diminution peu marquée, car la période d'oscillation reste petite devant la durée de phase positive. Pour l'intensité de 800 mbar, il n'y a pas

d'effet significatif, car l'atténuation de la surpression est due aux déformations irréversibles. Pour la laine de verre, la surpression maximale est plus faible avec une épaisseur plus élevée pour les deux chargements. Ceci s'explique mathématiquement : comme la période des oscillations est plus élevée lorsque l'épaisseur est plus élevée, le pic de la première oscillation est moins élevé, puisque l'enveloppe du signal est décroissante.

Jusqu'à présent, les résultats obtenus pourraient laisser penser qu'un dispositif constitué d'un assemblage bardage – isolant n'est pas en mesure d'atténuer l'amplitude de l'onde de souffle transmise au bâtiment. Pour rechercher des situations plus favorables, nous allons dans la suite doubler l'épaisseur du bardage, tout en restant conformes aux usages dans le bâtiment [6, 8], ce qui conduit à une masse surfacique de  $14 \text{ kg/m}^2$ . L'épaisseur d'isolant sera conservée égale à 30 cm.

Une première analyse avec la mousse de polyisocyanurate comme isolant est réalisée avec une durée de phase positive considérablement réduite, 1.5 ms, en conservant des surpressions incidentes de 200 et 800 mbar. Cette valeur de durée de la phase positive a été choisie, car elle correspond au maximum de celle mesurée pour les essais au tube à choc à initiation par explosif sur des mousses de polyuréthane réalisés par Ousji [9]. Même si les configurations ne sont pas identiques, épaisseur d'isolant et masse surfacique plus élevée pour Ousji, elle est retenue, car une atténuation d'onde de souffle a été observée avec une mousse de polyuréthane de densité équivalente à celle adoptée dans notre étude. Nous pouvons observer sur la figure 12 l'effet d'atténuation obtenu sur le pic de chargement transmis.

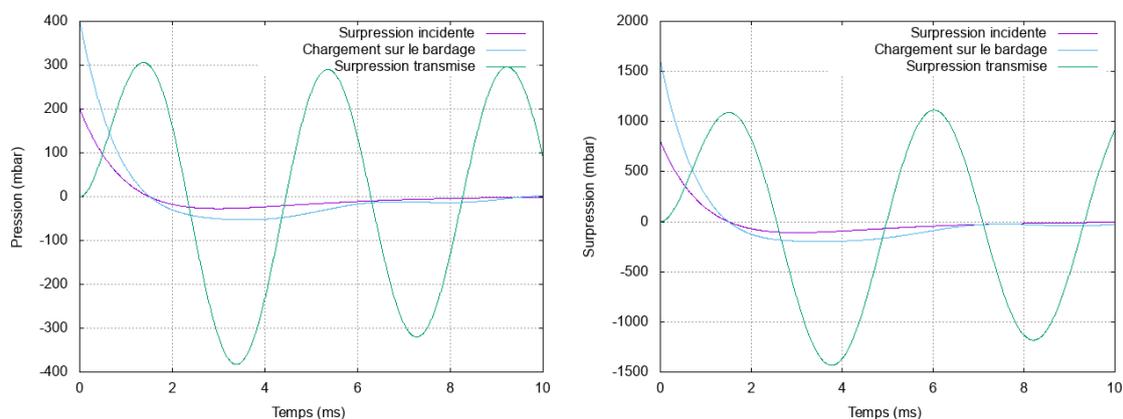


FIGURE 12 – Atténuation du pic de chargement transmis pour des surpressions incidentes de 200 mbar (gauche) et 800 mbar (droite)

Avec ces niveaux de surpression incidente, la réponse de la mousse de polyisocyanurate demeure linéaire et l'effet d'atténuation est lié à la modification du signal incident imposée par le temps de réponse du système bardage-isolant comme cela a déjà été observé pour la laine de verre avec des durées de phase positive plus importantes (fig. 11).

Il nous a paru intéressant d'observer la réponse face à des sollicitations avec des surpressions plus importantes à même d'entraîner une réponse non linéaire de la mousse de polyisocyanurate. Trois nouvelles simulations ont été réalisées avec trois nouvelles surpressions incidentes de 1200 mbar, 1600 mbar et 2000 mbar en revenant à la durée de phase positive initiale de 30 ms. Les surpressions transmises sont reportées sur les figures 13 et 14. Ces trois exemples ont été retenus, car ils mettent en évidence les effets bénéfiques ou néfastes de la présence de l'isolant selon que sa réponse corresponde à la phase plateau ou à la phase de densification du comportement en compression d'un matériau cellulaire. Dans les deux

premiers cas, il y a une atténuation du chargement dû à la compaction progressive de la mousse de polyisocyanurate : pour une surpression incidente de 1400 mbar, la déformation maximale de la mousse de polyisocyanurate est de 39% et pour une surpression incidente de 1600 mbar elle est de 59%. À l'inverse pour une surpression incidente de 2000 mbar, on observe un effet d'amplification du chargement lorsque la mousse de polyisocyanurate se densifie, la déformation maximale de la mousse étant de 77% et dépassant le seuil de densification.

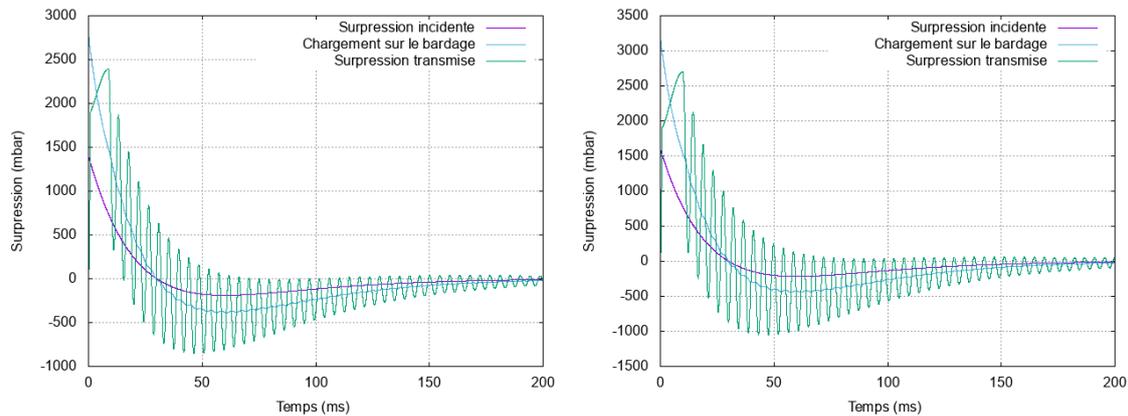


FIGURE 13 – Chargement transmis avec la mousse de polyisocyanurate comme isolant pour une surpression incidente de 1400 mbar (signal Friedlander)

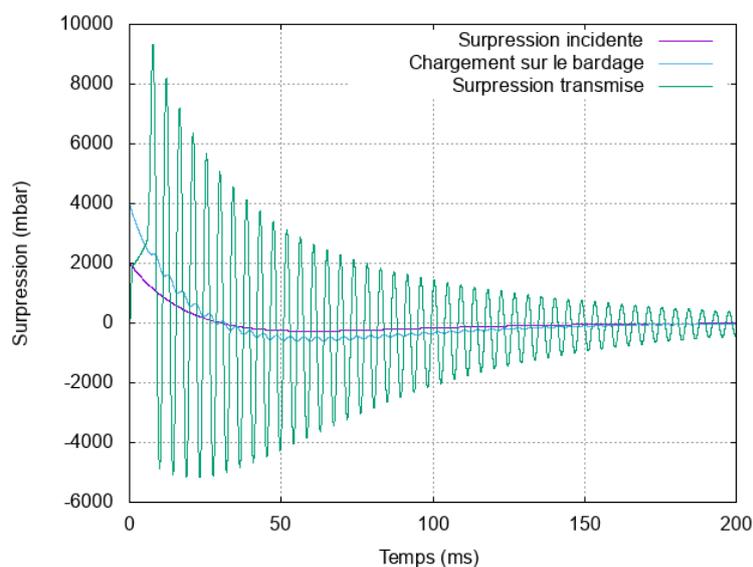


FIGURE 14 – Chargement transmis avec la mousse de polyisocyanurate comme isolant pour une surpression incidente de 2000 mbar (signal Friedlander)

De même que nous avons trouvé des configurations où l'emploi d'un isolant en mousse de polyisocyanurate pouvait avoir un effet bénéfique sur le chargement transmis à la structure, nous allons également étudier quelques configurations où l'utilisation de la laine de verre est favorable. Nous avons conservé les chargements d'intensité modérée, 200 mbar et 800 mbar, en diminuant la durée de la phase positive. La figure 15 montre ces configurations. Dans un premier cas, un chargement de surpression à 200 mbar et de durée de phase positive à 10 ms est étudié, et dans le deuxième cas, un chargement de surpression à 800 mbar et de durée de phase positive à 5 ms est appliqué.

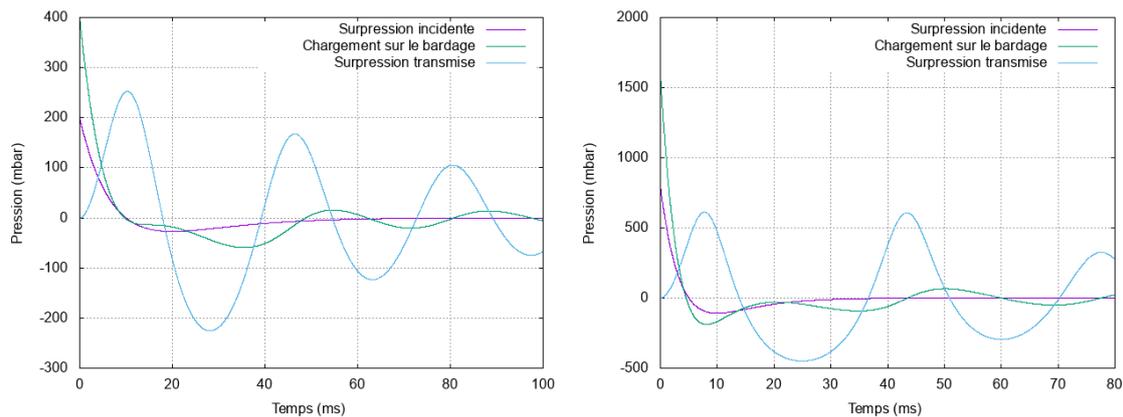


FIGURE 15 – Configurations d’atténuation de l’onde transmise avec utilisation de la laine de verre

Ces deux exemples mettent en évidence un effet bénéfique de la présence de l’isolant en laine de verre qui permet d’« étaler » le signal de surpression transmise à la structure. Nous avons donc des configurations pour lesquelles la laine aurait un effet bénéfique, pour des durées de phase positive supérieures à celles observées dans le cas d’une utilisation de la mousse de polyisocyanurate. À noter que pour les deux matériaux, il n’y a pas de diminution de l’impulsion de la surpression transmise. L’impulsion se conserve toujours entre le chargement sur le bardage et le chargement sur la structure.

## 5 Conclusion

La modélisation à un degré de liberté a permis d’effectuer une estimation de l’effet d’un système de protection composé d’un bardage rigide mobile selon un axe et d’un matériau isolant supposé se déformer de manière homogène. Les configurations étudiées ont été volontairement limitées tant pour l’épaisseur du bardage que pour celle de l’isolant à des cas représentatifs d’isolation par l’extérieur de bâtiments conformément aux dispositions RT 2012 et RT 2020.

L’étude a été réalisée pour diverses pressions incidentes : 200 et 800 mbar comme références et étendues à 1400, 1600 et 2000 mbar par la suite. La durée de phase positive initialement retenue, de 30 ms, a été diminuée à 5 et 10 ms pour la laine de verre et jusqu’à 1.5 ms pour la mousse de polyisocyanurate. Ces différents cas d’étude ont permis de mettre en évidence que chacun des matériaux proposés pourrait avoir des effets bénéfiques pour des chargements à signatures différentes. Ces effets potentiellement favorables sont liés à deux mécanismes différents qui pourraient être concomitants pour la mousse de polyisocyanurate, à savoir :

- une diminution du pic de la surpression transmise, due à l’étalement du signal lorsque le temps caractéristique de l’onde incidente est inférieur à celui du système bardage-isolant ;
- un écrêtement du signal de surpression transmise, lié à la compaction progressive de l’isolant qui limite le niveau de contrainte.

Pour le second effet, une surpression incidente trop importante peut conduire à déformer l’isolant au-delà de la déformation à la densification avec pour conséquence une amplification du pic de surpression transmise.

## Références

- [1] "Thermal insulating products for building applications - Determination of compression behaviour", Norme NF EN 826 Mai 2013, 2013.
- [2] L. J. Gibson, M. F. Ashby. *Cellular Solids : Structure and Properties*. Cambridge Solid State Science Series, Cambridge University Press, 2 ed., 1997. Lavoisier. 2013.
- [3] H. El Yamani. *Caractérisation du comportement mécanique de matériaux isolants sous choc*. Thèse de doctorat, INSA Centre Val de Loire, 2021.
- [4] L. Chapelle. *Characterization and modelling of the mechanical properties of mineral wool*. Thèse de doctorat, Technical University of Denmark, 2016.
- [5] P. Bailly. *Chocs et impacts sur les matériaux et les structures, De la théorie aux méthodes de l'ingénieur*. Collection Génie civil, Lavoisier, 2013.
- [6] S. S. Herrera. *Étude expérimentale et numérique du comportement d'un bâtiment industriel en charpente métallique soumis aux effets d'une onde de surpression*. Thèse de doctorat, Université d'Orléans, 2016.
- [7] F.G. Friedlander, "The diffraction of sound pulses I. Diffraction by a semi-infinite plane". *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences*, 186.1006, pp. 322-344, 1946.
- [8] Techniques de l'ingénieur. "Les bardages", *Techniques du bâtiment : Isoler et revêtir les façades*. vol. base documentaire : TIE811DUO, 2007.
- [9] H. Ousji, B. Belkassem, M.A. Louar, B. Reymen, J. Martino, D. Lecompte, L. Pyl, J. Vantomme. "Air-blast response of sacrificial cladding using low density foams : Experimental and analytical approach". *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 128-129, pp. 459-474, 2017.