

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE
Faculté de génie
Département de génie mécanique

DÉVELOPPEMENT D'UN CONCEPT D'ISOLANT ÉCO-ACOUSTIQUE

Mémoire de maîtrise
Spécialité : génie mécanique

Jean-Philippe REGNARD

Jury : Raymond PANNETON (directeur)
Saïd ELKOUN (co-directeur)
Hachimi FELLOUAH (rapporteur)
Maxime GAUTHIER (examineur)

À mon fils, Maël

RÉSUMÉ

Le but de cette étude est de développer un concept d'isolant acoustique à base de matières recyclées. Ce projet, initié par le Ministère des Transports du Québec (MTQ), s'inscrit dans la conception d'écrans antibruit répondant aux exigences actuelles du développement durable et de la loi sur l'environnement. L'isolant acoustique devra donc être également recyclable.

Un matériau de type coupe-son est caractérisé par son indice d'affaiblissement sonore. Plus un matériau est lourd, plus il est isolant. Cependant, un phénomène physique provoque une importante chute de son efficacité à une fréquence précise dépendant de la rigidité spécifique du matériau (i.e. rapport du module d'Young sur la masse volumique). Il devra donc avoir une masse importante tout en ayant un module d'Young adéquat pour éviter ce phénomène.

Le polyéthylène basse densité linéaire (LLDPE), thermoplastique recyclable de grande consommation, est alors alourdi avec des billes d'acier de grande taille (3.175 mm) afin d'augmenter la rigidité spécifique du composite résultant. Le composite ainsi formé montre néanmoins une augmentation du module d'Young qui compense l'ajout de masse. Cette augmentation est causée par la liaison interfaciale entre le LLDPE et les billes de fer. Pour limiter cette cohésion, un effort de traction a été effectué sur les échantillons. Ceci a eu pour effet de briser le lien mécanique à l'interface des billes et du LLDPE. En conséquence, le module a suffisamment chuté pour atteindre des valeurs inférieures au matériau brut. De plus, l'augmentation de la fraction volumique va de pair avec la réduction du module d'Young. Un modèle analytique de prédiction du module d'Young en fonction de la fraction volumique de billes d'acier a été également établi. Il a été comparé aux modèles existants et a montré de bons résultats avec les mesures.

Des simulations acoustiques de la perte par transmission ont par la suite été effectuées sur les composites obtenus afin d'évaluer leurs performances par rapport aux matériaux usuels (e.g. béton, gypse, verre,...) et par rapport à des écrans antibruit existants. Les résultats ont démontrés que les composites peuvent parfaitement se substituer aux matériaux utilisés et présentent dans certains cas de meilleurs résultats.

Mots-clés : Acoustique, écrans antibruit, recyclage, composite, perte par transmission, module d'Young.

ABSTRACT

The aim of this study is to develop a concept of an acoustic reflective material using recycled materials. This project, initiated by the Ministre des Transports du Quebec (MTQ), fits with the current requirements of sustainable development and environmental law. So the acoustic material should be also recyclable.

An acoustic reflective material is characterized by its sound transmission loss. The heavier the material is, the better is its sound transmission loss. However, a physical phenomenon causes a significant drop in efficiency at a specific frequency depending on the specific stiffness of the material (i.e., the ratio of Young's modulus and density) So the material must be heavy and should have a Young modulus adapted to avoid this phenomenon.

Linear low density polyethylene (LLDPE), a largely available recyclable thermoplastic material, is then weighed down with large steel balls (3.175 mm diameter) to increase the specific stiffness of the resulting composite. However, the composite thus formed shows an increase of its Young's modulus that compensates for the added mass. This increase is caused by the interfacial bonding between the LLDPE and steel balls. To limit this bonding, a tensile stress was applied on the samples. This had the effect of breaking the mechanical link at the interface. As a result, the modulus has dropped to a value below that of the raw material. In addition, the increase in volume fraction of steel balls goes hand in hand with the reduction of the Young's modulus. An analytical model for predicting Young's modulus as a function of volume fraction of steel balls was also established. It was compared to existing models and shown good agreement with measurements.

Simulations of the acoustic transmission loss are subsequently carried out on the obtained composites to evaluate their acoustical performance compared to conventional materials (e.g. , concrete, gypsum, glass, ...) and to existing noise barriers. The results show that the developed composites can fully replace conventional materials and show better results in some cases.

Keywords: Acoustic, noise barriers, recycling, composite, transmission loss, Young modulus.

REMERCIEMENTS

En préambule à ce mémoire, je souhaitais adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui m'ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire. Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à mes deux co-directeurs de maîtrise :

- À Raymond Panneton, pour m'avoir toujours apporté des conseils et une écoute face à mes problèmes, et aussi pour m'avoir encouragé et fait confiance pour mener à bien ce sujet.
- À Saïd Elkoun pour m'avoir guidé et conseillé pour tout ce qui a attiré au domaine des polymères et pour m'avoir soutenu et encouragé tout au long de cette maîtrise.

Un grand merci à tous le personnel du GAUS, en particulier Rémy Oddo et Patrick Levesque qui savent parfaitement allier efficacité et bonne humeur. Je tiens aussi à remercier le Ministère des Transport du Québec pour avoir financé en grande partie ce projet.

Une grande pensée va aussi à un groupe d'amis qui m'est très cher et qui m'a soutenu tout au long de ce projet : à Guillaume Veux pour tous ses conseils et les longues discussions que nous avons eues autour d'une tasse de café, à François Marcou pour sa bonne humeur et son dynamisme, à Pierre-Claude Ostiguy pour son aide et ses conseils et enfin à James Gagnon-Coupal pour son enthousiasme et sa joie de vivre.

Je remercie également tous les étudiants et autres, en particulier ceux avec qui j'ai pu avoir de longues discussions, sérieuses ou pas : Kévin Verdière, Julien Biboud, Olivier Robin, Anthony Gérard, Olivier Doutres, Maxime Bolduc, Aljosa Rakic, Nicolas Quaegebeur, Marc Lebreux, Philippe-Aubert Gauthier, Max Loszach, Pascal Newby, Walid Belgacem, Dilal Rhazi, Benoit Minard, Nicolas Bombard, Vincent Pointel. Un merci tout particulier à Nabil Mustapha Hadjaz, mon « compère » de cours à la maîtrise.

Ces dernières lignes s'adressent à ceux qui sont le plus chère à mon cœur : à ma femme Anick pour son amour, son soutien constant et pour m'avoir supporté pendant mes longues nuits d'études, et enfin à mon fils Maël, né au début de cette maîtrise et qui est assurément la plus belle réalisation de ma vie.

TABLE DES MATIÈRES

RÉSUMÉ.....	i
REMERCIEMENTS	iii
LISTE DES FIGURES	ix
LISTE DES TABLEAUX	xiii
LISTE DES SYMBOLES	xv
LISTE DES ACRONYMES.....	xvii
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Contexte.....	1
1.2 Problématique.....	2
1.3 Objectif de recherche.....	3
CHAPITRE 2 ÉTAT DE L'ART.....	5
2.1 Perte par transmission.....	5
2.1.1 Perte par transmission d'une paroi simple infinie	7
2.1.2 Perte par transmission d'une paroi simple finie	12
2.2 Les thermoplastiques	14
2.2.1 Les différents thermoplastiques.....	14
2.2.2 Les thermoplastiques les plus utilisés.....	16
2.2.3 Propriétés des thermoplastiques les plus utilisés.....	18
2.2.4 Thermoplastiques et charges	23
2.3 Les mélanges thermoplastiques / métaux	25
2.3.1 Influence de la charge sur le module d'Young.....	25
2.3.2 Influence de la taille des particules du renfort.....	28
2.4 Thermoplastiques et renforts : applications dans l'acoustique.....	30
2.4.1 Produits du commerce	30
2.4.2 Études acoustiques.....	32
2.5 Mesure des grandeurs mécaniques des plastiques.....	35
2.5.1 Norme de mesure ASTM D638-03	35
2.5.2 Norme de mesure ASTM E756-04.....	36
2.5.3 Mesure de la masse volumique.....	38

CHAPITRE 3	ÉLABORATION ET MESURE DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES COMPOSITES	41
3.1	Méthodologie	41
3.2	Élaboration des composites	42
3.2.1	Géométrie des échantillons	42
3.2.2	Procédure de fabrication des échantillons de LLDPE (lot N°1)	44
3.2.3	Procédure de fabrication des composites LLDPE/billes d'acier (lot N°2).....	46
3.2.4	Procédure de fabrication des composites LLDPE/billes d'acier à teneur maximale en billes (lot N°3).....	49
3.3	Caractérisation des échantillons	51
3.3.1	Réalisation des essais	51
3.3.2	Résultats et discussion.....	55
3.3.3	Modèles de prédiction du module d'Young.....	57
3.4	Modification microstructurale : diminution du rapport E/ρ	62
3.4.1	Procédure.....	62
3.4.2	Réalisation de la cavitation et observations	63
3.4.3	Essais mécaniques après cavitations et résultats	69
3.5	Modèles analytiques de prédiction avec cavitation.....	73
3.5.1	Modèles des composites sans adhésion du renfort.....	73
3.5.2	Modèles de matériaux poreux	75
3.5.3	Modèle analytique géométrique	78
CHAPITRE 4	SIMULATIONS ACOUSTIQUES.....	83
4.1	Comparaisons par rapport aux matériaux classiques	84
4.1.1	Les Thermoplastiques	84
4.1.2	Matériaux utilisés dans la construction	86
4.2	Comparaisons avec des panneaux antibruit existants	87
4.2.1	Écrans réfléchissants	88
4.2.2	Écrans absorbants.....	93
CHAPITRE 5	CONCLUSION.....	105
5.1	Bilan du travail effectué	105
5.2	Perspectives.....	106
ANNEXE A.....		109
ANNEXE B.....		115

ANNEXE C	119
ANNEXE D.....	124
LISTE DES RÉFÉRENCES ET LIENS	135

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Écran antibruit (a) côté habitation et (b) côté chantier.....	1
Figure 1.2 : Dégradations subies par les écrans temporaires.....	2
Figure 2.1 : Principe de la perte par transmission	5
Figure 2.2 : Configuration pour la mesure du TL : (a) chambres réverbérantes et (b) chambre réverbérante / sourde	6
Figure 2.3 : Perte par transmission d'un mur de béton de 15cm d'épaisseur en incidence oblique - simulation NOVA [3].....	7
Figure 2.4 : Schématisation du problème d'une paroi simple soumise à une onde plane en incidence oblique.....	8
Figure 2.5 : Variation de la perte par transmission en fonction de la masse – simulation NOVA [3]	10
Figure 2.6 : Perte par transmission d'une plaque finie excitée par une onde plane [6].....	12
Figure 2.7 : Répartition de la demande en thermoplastiques en Europe en 2008 [8].....	16
Figure 2.8 : Domaines d'applications des thermoplastiques en Europe en 2008 [8]	17
Figure 2.9 : Domaines d'applications des thermoplastiques au Canada [9].....	17
Figure 2.10 : Évolution du Module d'Young du LDPE en fonction de la concentration massique des différents renforts métalliques [13]	26
Figure 2.11 : Module d'Young normalisé des composites à matrice HDPE en fonction des renforts d'aluminium, de fer et de cuivre [15].	28
Figure 2.12 : Influence de la taille des particules sur le module d'Young pour plusieurs concentrations (■ 10%, ● 18%, ▲ 30%, ▼ 40% et ◆ 48%) [17].	29
Figure 2.13 : Influence de la taille des particules sur le module d'Young en fonction de la fraction volumique avec (a) une matrice de PS et (b) une matrice de PP [18].....	29
Figure 2.14 : (a) Isolant acoustique épousant la forme de la source de bruit et (b) sous forme de rideau	30
Figure 2.15 : Écran Tuf Barrier de Harder Luckey & Hargrave	31
Figure 2.16 : Exemples d'utilisation de la résine Keldax® : (a) tapis de sol et (b) intérieur de portière.....	32
Figure 2.17 : Comparaison de la perte par transmission de composites de PU avec variation du taux de concentration de silice (A1=0%; A2=7%; A3=14%) [29]	33
Figure 2.18 : Comparaison de la perte par transmission de PP chargé de CaCO ₃ à 60% et 80% [30]	34
Figure 2.19 : Comparaison de la perte par transmission de PP et de PE chargés de CaCO ₃ à 80% [30].....	34

Figure 2.20 : Courbes de traction typiques des plastiques [32]	35
Figure 2.21 : Configurations possibles pour la mesure de l'amortissement structural	36
Figure 2.22 : Montage pour la mesure de la masse volumique.....	38
Figure 3.1 : Moule pour la fabrication des échantillons : a) partie mâle et b) partie femelle ...	43
Figure 3.2 : Étapes de la fabrication de la plaque de LLDPE : a) étape 1 et b) étape 2	45
Figure 3.3 : Plaque de LLDPE réalisée pour les essais mécaniques	46
Figure 3.4 : Fixation des billes à la plaque inférieure de LLDPE	47
Figure 3.5 : Assemblage pour la fabrication du composite alourdi	47
Figure 3.6 : Photo d'une éprouvette du composite LLDPE/Billes métalliques	48
Figure 3.7 : Tranche d'une des poutres LLDPE alourdie avec des billes d'acier après polissage	48
Figure 3.8 : Empilement de billes en deux dimensions de type hexagonal	49
Figure 3.9 : Illustration du phénomène de migration des billes	50
Figure 3.10 : Photo d'un des échantillons du 3 ^{ème} lot	51
Figure 3.11 : Montage expérimental de la mesure vibratoire de la poutre uniforme	52
Figure 3.12 : Reproductibilité des mesures des poutres du lot N°1 (poutre 1-1).....	53
Figure 3.13 : Réponse fréquentielle des poutres du lot N°2.....	54
Figure 3.14 : Dépendance du module d'Young E avec le taux de cristallinité et la masse volumique du \diamond polyéthylène, \circ HPB linéaire, Δ 3S HPB, \square 4S HPB (symbole plein concerne les échantillons polydispersés) [38].....	56
Figure 3.15 : Module d'Young des modèles analytiques comparées aux mesures effectuées..	60
Figure 3.16 : Observation au microscope électronique à balayage de la liaison bille/LLDPE sans cavitation	62
Figure 3.17 : Schéma de la modification microstructurale induite mécaniquement afin de créer une décohésion : a) composite au repos, b) composite soumis à une contrainte uniaxiale, c) cavitation permanente créée autour du renfort.....	63
Figure 3.18 : Photos de la poutre 2-1 a) avant déformation et b) après déformation.....	64
Figure 3.19 : Section de la poutre 2-1 sur laquelle se sont produites des strictions (zone de striction en pointillés rouges)	64
Figure 3.20 : Exemple de rupture de la matrice sur la poutre 2-2	66
Figure 3.21 : Exemple de fissuration de la matrice sur la poutre 2-1	66
Figure 3.22 : Observation de cavitation sur la poutre 2-2 : a) avant traction et b) après traction	67
Figure 3.23 : Observation de cavitation sur la poutre 3-2 : a) avant traction et b) après traction	68

Figure 3.24 : Observation de la cavitation au microscope optique sur la tranche d'une poutre	68
Figure 3.25 : Réponse fréquentielle des poutres des lots N°2 et 3 après la création de cavitation	70
Figure 3.26 : Réponse fréquentielle d'une des poutres des lots N°2 et 3 avant et après la création de cavitation	71
Figure 3.27 : Comparaison des différents modèles analytiques permettant la prédiction du rapport E/ρ pour les composites à adhésion nulle	74
Figure 3.28 : Comparaison des différents modèles analytiques du module d'Young pour les matériaux poreux	77
Figure 3.29 : Vu en coupe du composite représentant les fractions surfaciques de renfort et de matrice	78
Figure 3.30 : Équivalence entre les sections des poutres	79
Figure 3.31 : Comparaison du modèle analytique simple avec les mesures et le modèle « optimisé » de Sato et Furukawa	80
Figure 4.1 : Perte par transmission des différents thermoplastiques purs pour une épaisseur de 4 mm	85
Figure 4.2 : Perte par transmission du composite LLDPE/billes d'acier en fonction de la fraction volumique de billes pour une épaisseur de 4 mm	85
Figure 4.3 : Perte par transmission du composite LLDPE/billes d'acier pour des fractions volumiques de 23.2% et 48% comparés à des éléments de la construction	86
Figure 4.4 : Spectre de bruit de véhicules a) poids lourds, b) véhicules légers [61]	87
Figure 4.5 : Exemple d'inconvénient de l'utilisation d'un écran antibruit réfléchissant (source [62])	88
Figure 4.6 : Écran acoustique PARAGLAS SOUNDSTOP®	89
Figure 4.7 : Perte par transmission de l'écran PARAGLAS SOUNDSTOP® et du composite LLDPE/billes d'acier avec une fraction volumique de 23.2% pour une épaisseur et une masse surfacique équivalentes	90
Figure 4.8 : Écran acoustique en polycarbonate de la société ECIB	91
Figure 4.9 : Perte par transmission du Polycarbonate et du composite LLDPE/billes d'acier avec une fraction volumique de 23.2%	91
Figure 4.10 : Perte par transmission de deux vinyles alourdis et du composite LLDPE/billes d'acier avec une fraction volumique de 23.2%	92
Figure 4.11 : Configuration des simulations plaque – air – plaque	94
Figure 4.12 : Perte par transmission du modèle de mur de Kinetics [70] (Référence) et des configurations équivalentes faites du composite LLDPE/billes	95
Figure 4.13 : Configuration des simulations plaque – absorbant – plaque	96

Figure 4.14 : Matériau absorbant utilisé a) laine de verre rigide pour les écrans de référence, b) polyester post-consommation pour les écrans « éco-acoustiques »	97
Figure 4.15 : Perte par transmission des écrans des configurations 1, 2 et 3 avec deux épaisseurs de polyester recyclé comparé à l'écran de référence équipé de laine de verre	98
Figure 4.16 : Configuration des simulations tôle perforée – absorbant – plaque.....	99
Figure 4.17 : Perte par transmission des différentes configurations d'écran acoustiques absorbants et de l'écran de référence	102
Figure 4.18 : Coefficient d'absorption (haut) et perte par transmission (bas) des différentes configurations simulées.....	104

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 : Propriétés et quelques domaines d'applications des thermoplastiques usuels	15
Tableau 2.2 : Principaux producteurs de thermoplastiques du Canada en 1998 [10]	18
Tableau 2.3 : Propriétés du Polyéthylène basse densité (LDPE)	19
Tableau 2.4 : Propriétés du Polyéthylène basse densité linéaire	20
Tableau 2.5 : Propriétés du Polyéthylène haute densité	21
Tableau 2.6 : Propriétés du Polypropylène.....	22
Tableau 2.7 : Évolution du module d'Young de composites à matrice LDPE et LLDPE en fonction de la concentration de cuivre [14].	27
Tableau 2.8 : Évolution du Module d'Young pour plusieurs fractions de poudre de fer mélangé avec du HDPE [16].....	28
Tableau 3.1 : Conditions de fabrication avec la presse chauffante	44
Tableau 3.2 : Caractéristiques moyennes mesurées des différentes poutres	52
Tableau 3.3 : Résultats des mesures sur les différents lots de composites LLDPE/billes d'acier	55
Tableau 3.4 : Tableau récapitulatif des déformations imposées aux poutres	65
Tableau 3.5 : Caractéristiques moyennes mesurées des poutres du lot N°2 et 3 après cavitation	69
Tableau 3.6 : Résultats des mesures sur les lots N°2 et 3 après cavitation	71
Tableau 3.7 : Variation du module d'élasticité et de la masse volumique en fonction de la déformation plastique imposé aux composites.....	72
Tableau 3.8 : Variation du module d'élasticité et en fonction du modèle de prédiction utilisé	81
Tableau 4.1 : Configurations testées	95
Tableau 4.2 : Configurations testées	97
Tableau 4.3 : Descriptions des murs existants et choix des caractéristiques du mur de référence	100
Tableau 4.4 : Configurations de murs équivalents en masse surfaciques au mur de référence	101

LISTE DES SYMBOLES

Symbole	Définition
E_m, E_p, E_c	Modules d'Young respectifs de la matrice, de la charge et du composite (Pa)
c_0	Célérité des ondes acoustiques (m/s)
D	Rigidité de flexion (Pa.m ³)
E	Module d'Young ou d'élasticité (Pa)
E_c	Module d'Young du composite (Pa)
E_m	Module d'Young de la matrice (Pa)
E_p	Module d'Young du renfort (Pa)
d	Diamètre de la charge (m)
η	Amortissement structural
f	Fréquence (Hz)
ν	Coefficient de Poisson
ω	Pulsation (rad/s)
ρ	Masse volumique (kg/m ³)
ρ_c	Masse volumique du composite (kg/m ³)
ρ_m	Masse volumique de la matrice (kg/m ³)
ρ_p	Masse volumique du renfort (kg/m ³)
ρ_0	Masse volumique de l'air (kg/m ³)
k	Nombre d'onde
k_f	Nombre d'onde de flexion
TL	Perte par transmission sonore ou <i>sound transmission loss</i> (dB)
c_b	Célérité des ondes de flexion (m/s)
h	Épaisseur du panneau (m)
I_i, I_r, I_t	Intensité acoustique incidente, réfléchie et transmise (W/m ²)
f_{coin}	Fréquence de coïncidence (Hz)
f_c	Fréquence critique (Hz)
p_i, p_r, p_t	Pression acoustique incidente, réfléchie et transmise (Pa)
TL_{diffus}	Perte par transmission d'un panneau en champ diffus (dB)
TL_0	Perte par transmission d'un panneau pour $\theta = 0$ (dB)
V	Vitesse vibratoire de la plaque infinie (m/s)
Z_s	Impédance de la plaque (Pa.rad ⁻¹ .m ⁻¹)
θ	Angle d'incidence de l'onde acoustique (degrés)

τ	Facteur de transmission acoustique
f_n	Fréquence de résonance du mode n (Hz)
ρ_L	Masse volumique du liquide (kg/m^3)
W_i, W_r, W_t	Puissance acoustique incidente, réfléchie et transmise (Watt)
S_h, S_b	Seuil d'écoulement haut et bas (N/m^2)
Δf_n	Largeur de la bande fréquentielle du mode n à -3dB (Hz)
L	Longueur de la poutre (m)
C_n	Coefficient $k_n L$ du mode n pour une poutre encastree – libre.
m_1	Masse de l'échantillon pesé dans l'atmosphère (kg)
m_2	Masse de l'échantillon pesé immergé dans un liquide (kg)
T_p	Température de chauffe de la presse chauffante ($^{\circ}\text{C}$)
t_m	Temps de chauffe du moule (heure)
P	Pression de la presse chauffante (MPa)
V_{max}	Fraction volumique maximale (%)
α	Taux de cristallinité (%)
ϕ	Fraction volumique de la charge (%)
ϕ_m	Fraction volumique de la matrice (%)
K_e	Coefficient d'Einstein
S	Section (m^2)
V_m	Fraction volumique de la matrice (%)
A, B, ψ	Termes associés au modèle de Nielsen
a_p, b_c, b_p	Termes associés au modèle de Boucher
ν_m, ν_p, ν_c	Coefficients de Poisson respectifs de la matrice, la charge et le composite
b	Largeur de la poutre (m)
w	Déplacement (m)
\hat{w}	Amplitude complexe du déplacement (m)
I	Moment de flexion de la poutre (N.m)
E_{cr}	Module d'Young de la phase cristalline (Pa)
E_a	Module d'Young de la phase amorphe (Pa)

LISTE DES ACRONYMES

Acronyme	Définition
HDPE	Polyéthylène Haute Densité (<i>High Density Polyethylene</i>)
LDPE	Polyéthylène Basse Densité (<i>Low Density Polyethylene</i>)
LLDPE	Polyéthylène Basse Densité Linéaire (<i>Linear Low Density Polyethylene</i>)
PE	Polyéthylène
PS	Polystyrène
PVC	Polychlorure de vinyle
PP	Polypropylène
PET	Polyéthylène Téréphtalate
TL	Perte par transmission (<i>Transmission Loss</i>)
ASTM	American Society for Testing and Material

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Contexte

L'activité qui règne au sein d'un site de construction routière fait intervenir une multitude de corps de métiers qui à leur tour utilisent de nombreuses machines diverses et variées : des bulldozers pour déplacer des montagnes de terre et de gravats, des pelles mécaniques pour creuser le sol, des camions bennes pour transporter et évacuer les matières. Il faut ajouter à cela des équipements plus petits mais non négligeables tels que des bétonnières pour réaliser le mélange, les compresseurs qui alimentent les marteaux-piqueurs en air comprimé ou bien des groupes électrogènes pour disposer d'électricité sur le chantier.

Mis à part leurs raisons de se trouver sur un site de construction, ces équipements ont aussi en commun le fait de générer beaucoup de bruit de par leur activité. Ceci pose de sérieux problèmes de bruit lorsque cette activité a lieu en zone urbaine ou résidentielle. En effet, les municipalités ont des responsabilités en ce qui concerne les plans de développement. En vertu des lois sur les cités et villes (article 410) et le code municipal du Québec (article 490 et 628), les municipalités disposent de moyens et de pouvoirs afin de contrôler certaines nuisances dont le bruit. Cela peut aussi se faire par un aménagement du territoire adéquat, tout ceci bien sûr en respectant les règlements d'urbanisme en vigueur.

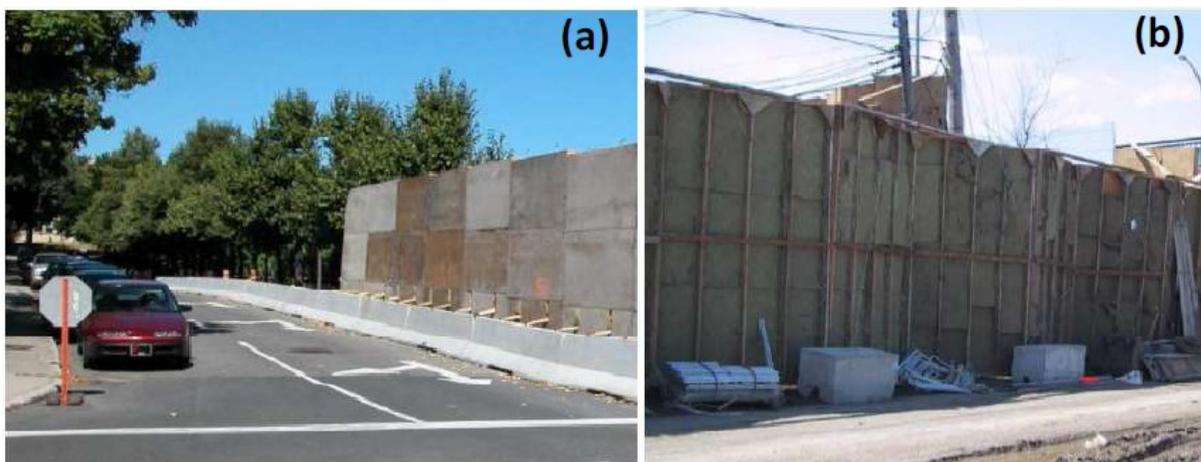


Figure 1.1 : Écran antibruit (a) côté habitation et (b) côté chantier

En ce qui concerne les chantiers et le bruit qui y règne, le Ministère des Transports du Québec (MTQ) utilise en bordure des zones de travaux des écrans acoustiques temporaires constitués de feuilles de contreplaqué du côté des habitations et de laine absorbante retenue par un treillis métallique du côté du chantier (Figure 1.1).

1.2 Problématique

Les écrans actuellement utilisés par le MTQ comportent beaucoup d'inconvénients : installation nécessitant une logistique lourde, forme des écrans pas toujours adaptée à la topologie du site, mais surtout faible durée de vie face aux agressions extérieures (e.g. pluie, neige, vent, sel, UV...). Actuellement, la durée de vie des écrans est un point crucial. En effet, ces derniers sont composés de laine de verre qui vieillit très mal en extérieur. L'orientation face au chantier l'expose à une multitude de souillures qui y sont générées telles que la poussière (e.g. terre, ciment, particules métalliques,...) et la boue. Les intempéries comme la pluie ou la neige affectent en plus l'intégrité physique de la laine. Il faut ajouter à cela que le stockage, certains comportements ou manipulations fréquentes en cas de déplacement du chantier, sont des facteurs de dégradations supplémentaires des écrans (Figure 1.2).

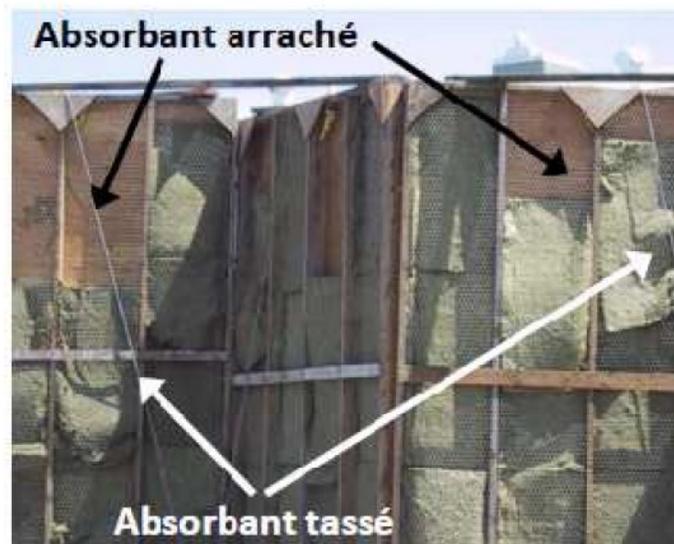


Figure 1.2 : Dégradations subies par les écrans temporaires

La plupart du temps, ces écrans ne sont utilisables que pendant la période du chantier. Le MTQ souhaite donc disposer de nouveaux écrans acoustiques utilisables en extérieur. De plus, dans l'optique d'une politique de développement durable, le MTQ demande que ces écrans soient réalisés entièrement ou en partie avec des matières recyclées et qu'en fin de vie, ils soient également recyclables. C'est à ce niveau que ce projet de recherche vient se greffer. Ce projet de recherche se focalise sur le développement d'un concept d'isolant acoustique qui composera la barrière antibruit. Celui-ci devra être réalisé avec des matières recyclées afin de répondre aux exigences de développement durable du MTQ.

1.3 Objectif de recherche

Ce projet de recherche vise le développement d'un isolant acoustique fait de matières recyclées/recyclables dans le but de les intégrer à des écrans antibruit routiers du MTQ. L'atteinte de cet objectif passe par quatre sous-objectifs. Tout d'abord, il s'agit de définir quels sont les paramètres qui permettent de caractériser un matériau de type coupe-son et quelles sont leurs influences sur les performances acoustiques de celui-ci.

Ensuite, un tour d'horizon des matières recyclables s'impose afin de définir leur disponibilité et de pouvoir faire un choix sur celles qu'il est envisageable d'utiliser pour notre application. Il est déjà clair que des matières plastiques seront utilisées et qu'elles seront de type thermoplastique à cause de leur recyclabilité. Il reste toutefois à passer en revue les différents thermoplastiques, leurs avantages et inconvénients afin de faire un choix éclairé sur les matières qui composeront l'isolant acoustique.

Suivra un état de l'art concernant la modification des propriétés mécaniques des thermoplastiques par l'ajout de différents types de matière. Celui-ci aura pour but de préciser quelles sont les propriétés mécaniques du thermoplastique affectées par la nature et la concentration de l'ajout. Enfin, une étude bibliographique sera aussi nécessaire afin de déterminer ce qui se fait actuellement avec des thermoplastiques dans le cadre de l'acoustique, et cela avec ou sans matières recyclées.

CHAPITRE 2 ÉTAT DE L'ART

2.1 Perte par transmission

La perte par transmission, aussi appelée indice d'affaiblissement acoustique ou encore *Transmission Loss* en anglais (TL), est l'indice qui caractérise l'efficacité de l'isolation acoustique d'un mur ou un élément structural (Figure 2.1). Il est utilisé dans des domaines d'application aussi variés que le bâtiment, l'aéronautique et l'automobile.

Cette grandeur est exprimée en Décibel (dB) et est le rapport de la puissance acoustique incidente (W_i) sur la puissance acoustique transmise (W_t).

$$TL = 10 \times \log\left(\frac{W_i}{W_t}\right) \quad (2.1)$$

La perte par transmission est mesurée suivant la norme ASTM E90-04 [1] et nécessite que l'échantillon soit placé entre deux chambres réverbérantes (Figure 2.2 (a)). L'une des deux chambres est utilisée pour réaliser l'émission acoustique; le champ sonore qui y est généré est diffus et est utilisé pour exciter la paroi à tester de manière uniforme.

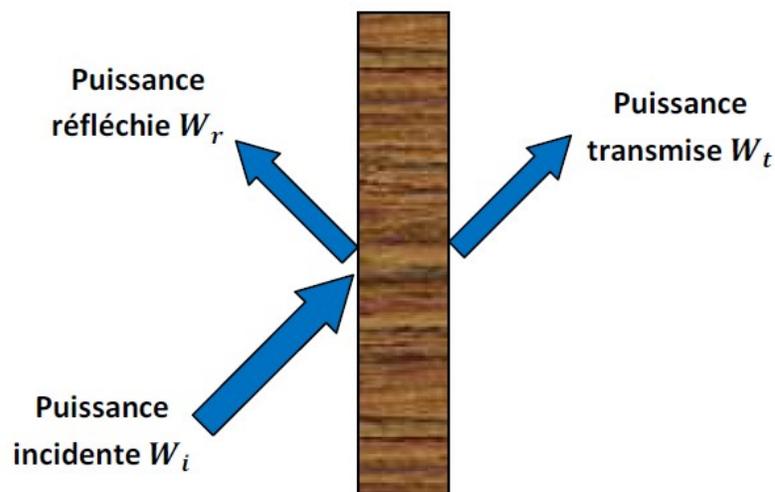


Figure 2.1 : Principe de la perte par transmission

L'intensité acoustique incidente (W/m^2) peut alors être déterminée par la formule suivante :

$$I_i = \frac{p_i^2}{4\rho_0 c_0} \quad (2.2)$$

avec :

p_i La pression acoustique dans la chambre réverbérante

ρ_0 La masse volumique de l'air (kg/m^3)

c_0 La célérité des ondes dans l'air (m/s)

L'intensité acoustique transmise est calculée de la même façon dans le local de réception à l'aide de la pression acoustique mesurée p_r . Il est possible que le local de réception soit une chambre sourde [2]. Dans ce cas, l'intensité acoustique est directement mesurée à l'aide d'une sonde intensimétrique (Figure 2.2 (b)). L'utilisation d'une chambre sourde en réception présente l'avantage de pouvoir faire des cartographies sonores de l'élément structural testé.

Sachant que la puissance acoustique est égale au produit de la surface excitée et de l'intensité acoustique qui la traverse, le facteur de transmission acoustique est directement calculé par la formule :

$$\tau = \frac{W_t}{W_i} = \frac{I_t}{I_i} \quad (2.3)$$

Mis à part les mesures, il existe des méthodes analytiques pour prédire le comportement d'une paroi infinie. En effet, dans ce projet il s'agit de parois de mur antibruit dont les dimensions sont relativement importantes par rapport aux longueurs d'onde et à l'épaisseur. Il est donc possible de poser, pour ces parois l'hypothèse de dimensions latérales infinies. Dans le paragraphe suivant, le comportement d'une telle paroi est détaillé.

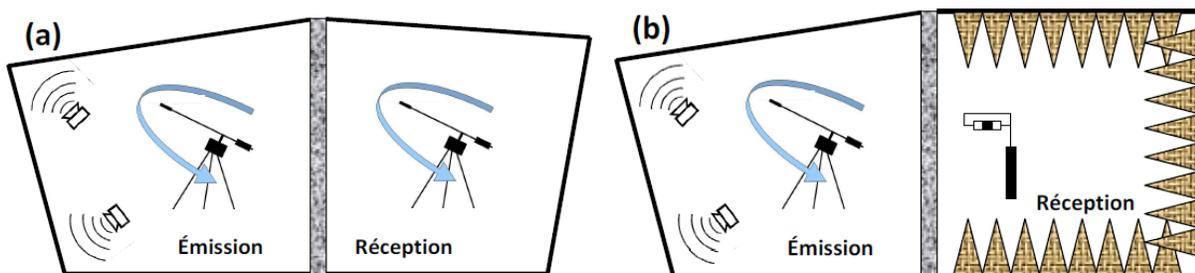


Figure 2.2 : Configuration pour la mesure du TL : (a) chambres réverbérantes et (b) chambre réverbérante / sourde

2.1.1 Perte par transmission d'une paroi simple infinie

La courbe typique d'une paroi simple peut être divisée en trois parties; la zone des basses fréquences, celle de la fréquence de coïncidence et enfin la zone des hautes fréquences (Figure 2.3). Notez qu'en champ diffus, cette même fréquence est appelée fréquence critique.

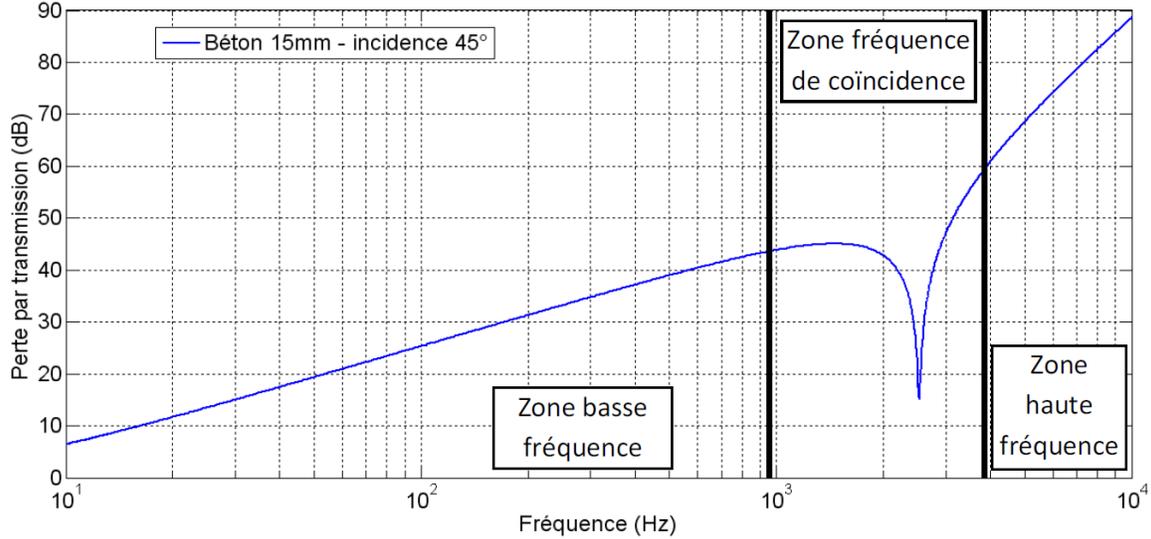


Figure 2.3 : Perte par transmission d'un mur de béton de 15cm d'épaisseur en incidence oblique - simulation NOVA [3]

Soit une paroi simple d'épaisseur h excitée par une onde plane d'incidence θ (voir Figure 2.4). On pose comme hypothèse simplificatrice que le milieu 1 et le milieu 2 sont identiques et sont de l'air [4]. La pression totale p_1 dans la zone 1 est composée de la pression incidente et de la pression réfléchiée. Elle peut s'écrire comme suit :

$$p_1 = (P_i e^{-ik(x.\cos\theta + z.\sin\theta)} + P_r e^{ik(x.\cos\theta - z.\sin\theta)}) e^{i\omega t} \quad (2.4)$$

où ω est la fréquence angulaire (rad/s) et $i = \sqrt{-1}$. La pression acoustique dans le milieu 2 est cependant uniquement constituée de la pression transmise :

$$p_2 = P_t e^{-ik(x.\cos\theta + z.\sin\theta)} e^{i\omega t} \quad (2.5)$$

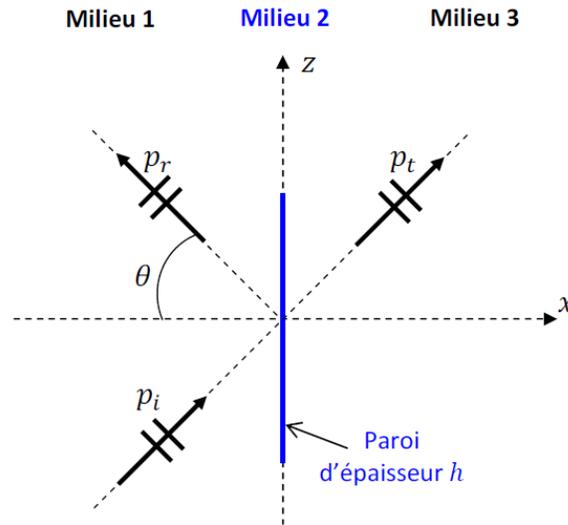


Figure 2.4 : Schématisation du problème d'une paroi simple soumise à une onde plane en incidence oblique

En ce qui concerne la plaque, l'équation du mouvement est :

$$Z_s \cdot V = \begin{cases} 0 & \text{si la source est éteinte} \\ p_1 - p_2 & \text{au centre de la paroi } (x = 0) \end{cases} \quad (2.6)$$

avec :

Z_s : Impédance de la plaque égale à $\left(-i\omega\rho h + \frac{i}{\omega} D k_f^4\right)$

ρ : Masse volumique de la paroi (kg/m^3)

k_f : Nombre d'onde de flexion égal à $k \cdot \sin \theta$

V : Vitesse vibratoire normale de la plaque (m/s)

D : Rigidité de flexion complexe égale à $\frac{E(1+i\eta)h^3}{12(1-\nu^2)}$

E : Module d'Young du matériau qui constitue la paroi (Pa)

ν : Coefficient de Poisson du matériau qui constitue la paroi

η : Coefficient d'amortissement structural de la paroi

L'écriture des équations de continuité du milieu sont nécessaires à la résolution du problème.

Pour le milieu 1 :

$$\frac{\partial p_1}{\partial x}(0, z, t) = \rho_0 \omega^2 w \quad (2.7)$$

Pour le milieu 3 :

$$\frac{\partial p_2}{\partial x}(0, z, t) = \rho_0 \omega^2 w \quad (2.8)$$

où w est le déplacement de la plaque suivant l'axe x . Son expression est de la forme

$$w = \widehat{w} e^{i(\omega t - z k_f)} \quad (2.9)$$

\widehat{w} représente l'amplitude complexe du déplacement. Les équations du mouvement sont alors remplacées dans les équations de continuité. En posant $P_i = 1$, il est possible d'obtenir une expression de P_t et P_r . La transparence acoustique τ est égale à $|P_t|^2 / |P_i|^2$ et en utilisant l'expression (2.1), la perte par transmission peut alors être calculée. Tout calcul fait, l'expression suivante est obtenue :

$$TL = 10 \times \log \left(\left(1 + \omega \eta \frac{\rho h \cos \theta}{2 \rho_0 c_0} \frac{f^2}{f_{coin}^2} \right)^2 + \omega^2 \left(\frac{\rho h \cos \theta}{2 \rho_0 c_0} \right)^2 \left(1 - \frac{f^2}{f_{coin}^2} \right)^2 \right) \quad (2.10)$$

avec f_{coin} la fréquence de coïncidence (Hz).

C'est à partir de cette expression qu'il est possible d'interpréter le comportement de la plaque dans les trois zones de la Figure 2.3.

Lorsque la fréquence est plus basse que la fréquence de coïncidence f_{coin} , la perte par transmission peut se réduire à l'expression suivante :

$$TL = 10 \times \log \left(1 + \omega^2 \left(\frac{\rho h \cos \theta}{2 \rho_0 c_0} \right)^2 \right) \quad (2.11)$$

L'expression (2.11) est appelée Loi de Masse car c'est la masse du panneau qui contrôle la perte par transmission. Plus le panneau est lourd, plus la perte par transmission sera importante. Le fait de doubler l'épaisseur d'un panneau (ou doubler sa masse surfacique) augmente la perte par transmission de 6dB.

Dans cette zone, la perte par transmission augmente avec une pente de 6dB par octave. La Figure 2.5 présente la perte par transmission de plusieurs épaisseurs de plaques d'acier. Cependant, l'augmentation de la masse d'une paroi engendre d'autres changements sur le spectre.

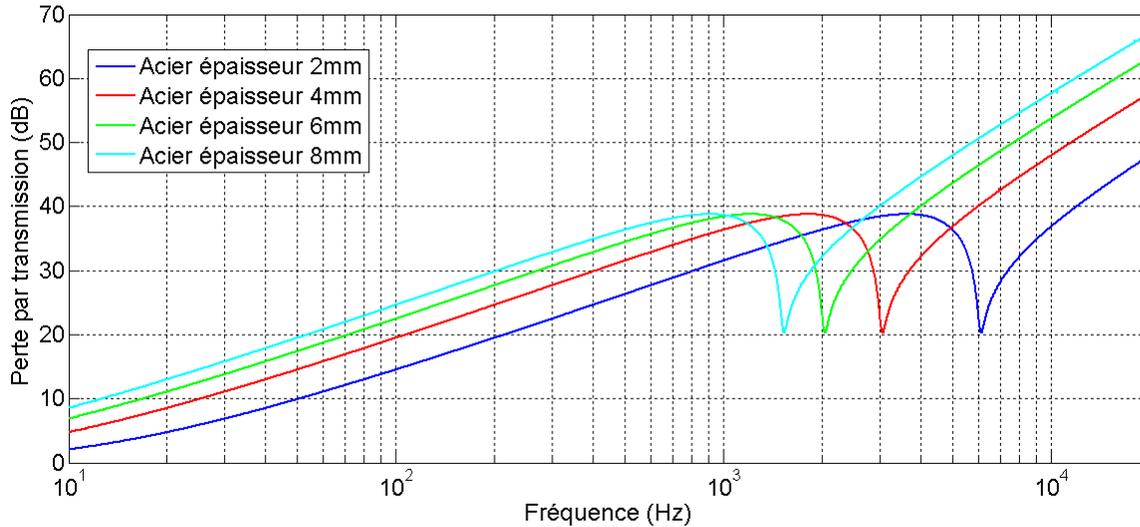


Figure 2.5 : Variation de la perte par transmission en fonction de la masse – simulation NOVA [3]

En effet, la zone de la fréquence de coïncidence marque une chute importante de la perte par transmission. Avec un angle d'incidence θ , l'onde acoustique exerce une déformation qui se propage avec une vitesse $c_0/\sin^2 \theta$ sur la surface du panneau. L'onde de flexion naturelle du panneau possède une vitesse c_b qui elle dépend de la fréquence. Pour un angle d'incidence donné, il existera une fréquence pour laquelle $c_b = c_0/\sin^2 \theta$ donnée par

$$f_{coin} = \frac{c_0^2}{2\pi \sin^2 \theta} \sqrt{\frac{\rho h}{D}} \quad (2.12)$$

À cette fréquence de coïncidence, l'isolation présente une chute importante. Quand l'angle d'incidence augmente, la fréquence de coïncidence diminue jusqu'à une valeur limite f_c appelée « fréquence critique ». Cette valeur correspond à un angle d'incidence θ de 90°

(incidence rasante) et pour laquelle $c_b = c_0$. Dans cette zone, la perte par transmission est donnée par la formule :

$$TL = 20 \times \log \left(1 + \omega_{coin} \eta \frac{\rho h \cos \theta}{2\rho_0 c_0} \right) \quad (2.13)$$

L'importance de la chute de la perte par transmission à la fréquence de coïncidence dépend de l'amortissement de la paroi. En effet, plus celui-ci est important, moins la chute est importante.

Enfin, dans la zone des hautes fréquences, la perte par transmission peut être exprimée par l'expression :

$$TL = 10 \times \log \left(1 + \left(\frac{Dk^4 \sin^4 \theta \cos \theta}{2\rho_0 c_0 \omega} \right)^2 \right) \quad (2.14)$$

Dans cette zone et d'après l'expression (2.14), c'est la rigidité qui gouverne la perte par transmission. Son augmentation est de 18 dB par octave.

Le comportement dans le cas du champ diffus est différent. Il ne reste que la fréquence critique f_c issue de la contribution de toutes les fréquences de coïncidence. Dans la zone de la Loi de Masse ($f < f_c$), il advient [5] :

$$TL_{diffus} = TL_0 - 10 \log(0.23TL_0) \quad (2.15)$$

où TL_0 est la perte par transmission de la paroi pour une incidence normale ($\theta = 0$). Dans la réalité, on considère que les ondes planes n'ont une influence que jusqu'à 78 degrés. La perte par transmission devient alors :

$$TL_{diffus} = TL_0 - 5 \text{ dB} \quad (2.16)$$

Dans la zone au dessus de la fréquence critique ($f > f_c$), la perte par transmission devient :

$$TL_{diffus} = TL_0 + 10 \log \left(\frac{2\eta f}{\pi f_c} \right) \quad (2.17)$$

Dans cette zone, la perte par transmission ne croît plus que de 9 dB par octave. Contrairement en incidence oblique, l'effet de l'amortissement, de la masse et de la raideur se manifeste sur les fréquences supérieures à f_c .

Le choix d'un matériau pour une isolation acoustique est donc un compromis à faire entre les effets de masse et la rigidité.

2.1.2 Perte par transmission d'une paroi simple finie

Dans le cas d'une plaque finie, la notion de conditions aux limites intervient causant d'importants changements de perte par transmission aux basses fréquences. De plus, les extrémités du panneau engendrent la présence de fréquences de résonances.

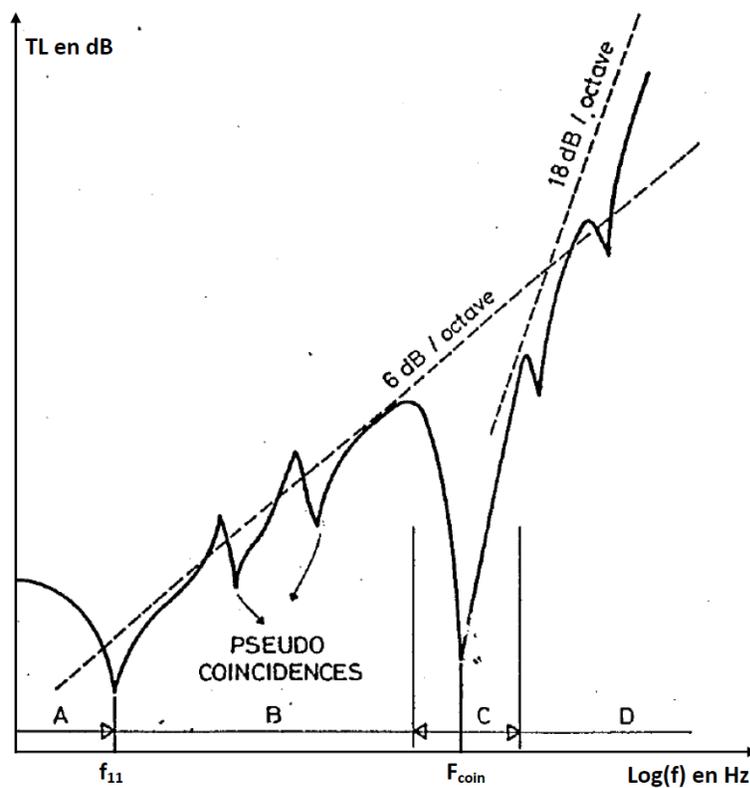


Figure 2.6 : Perte par transmission d'une plaque finie excitée par une onde plane [6]

La Figure 2.6 montre les quatre zones correspondantes à un spectre de perte par transmission d'une paroi finie en incidence oblique. Elles correspondent aux phénomènes suivants :

- La zone A est celle qui précède la première fréquence (f_{11}) de résonance de la paroi. Dans cette zone, c'est la rigidité qui gouverne l'isolation de la paroi et cette dernière décroît jusqu'à la première fréquence de résonance.
- La zone B est quant à elle contrôlée par la masse. On y observe des maxima et minima du TL dus aux fréquences de pseudo-coïncidence de la paroi. L'amortissement structural de la paroi ne joue aucun rôle sur le spectre.
- La zone C correspond à la zone de la fréquence de coïncidence de la paroi. De même que pour la paroi infinie, l'amortissement structural influence l'importance de la chute du TL.
- Enfin, la zone D est contrôlée par la rigidité du panneau et il y apparaît l'effet de modes résonants. Il est important de noter que l'amortissement structural a aussi une influence sur le spectre.

La modélisation du comportement de la perte par transmission d'une paroi simple finie ne peut se faire avec des méthodes analytiques. En effet, les différentes conditions aux limites possibles sur chacun des bords (i.e. encasturé, libre ou appui simple) ainsi que leurs combinaisons modifient le comportement aux basses fréquences. Il est donc nécessaire de recourir à des méthodes numériques. Il existe aussi d'autres méthodes telles que la méthode de Rayleigh-Ritz qui permet de solutionner de manière approchée les équations du mouvement pour des systèmes continus quelconques.

Il est utile de préciser que dans le cas d'une structure finie, la notion de basse ou haute fréquence dépend du rapport entre les dimensions de celle-ci et de la longueur d'onde. Plus précisément si la structure possède des dimensions 10 fois plus grande que la plus petite longueur d'onde, il est alors possible de négliger les effets des basses fréquences.

Sachant que ce projet consiste à étudier des panneaux anti-bruits dont les dimensions sont relativement importantes (hauteur pouvant aller jusqu'à 4m), on peut considérer la structure comme étant infinie.

2.2 Les thermoplastiques

2.2.1 Les différents thermoplastiques

Les thermoplastiques [7] font parti de la famille des polymères qui sont également composés des thermodurcissables et des élastomères. Les thermoplastiques représentent une partie très importante des matériaux plastiques utilisés pour une large gamme de produits. La propriété principale qui caractérise un thermoplastique est le fait qu'il puisse être fondu à partir d'une certaine température pour ensuite se solidifier en dessous de celle-ci, et cela à l'infini. Cette propriété est très importante car elle leur confère une grande recyclabilité. En effet, il est possible de remouler un thermoplastique d'une forme donnée, et ainsi lui donner une nouvelle forme, et par là-même une nouvelle fonction et une nouvelle vie. Ils s'opposent aux thermodurcissables qui à l'inverse, sont infusibles et ne font que se dégrader s'ils sont soumis à de hautes températures. Il est toutefois important de noter qu'il n'est pas possible de recycler un thermoplastique à l'infini. La répétition de cette étape peut altérer, au fil du temps, ses propriétés.

Il existe plusieurs variétés de thermoplastiques et chacune d'entre elles possède des caractéristiques spécifiques, et correspond donc à des applications bien précises : propriétés mécaniques, résistances aux produits chimiques, coût de production, stabilité à la chaleur et recyclabilité pour ne citer que celles-là.

Les plastiques sont souvent perçus comme des matériaux peu coûteux et donc peu performants. Ceci ne reflète pas la réalité car le coût de production et les performances peuvent considérablement varier. Parfois, la meilleure solution est la moins cher. Dans certaines applications, l'utilisation de plastique est plus adéquate que celle des métaux (e.g. contenants alimentaires).

Depuis plusieurs années, la recyclabilité est devenue un aspect important en termes de perception et d'impact sur la population. De plus, la législation contraint les fabricants à recycler leurs produits. Par exemple, dans l'automobile, les constructeurs doivent concevoir leurs véhicules afin qu'ils soient recyclables à hauteur de 80%. L'utilisation des thermoplastiques par rapport aux autres polymères est donc fort utile pour atteindre cet objectif.

Les thermoplastiques les plus répandus sont¹ :

- Les Polyéthylènes (LDPE, LLDPE et HDPE)
- Le polypropylène (PP)
- Le Polychlorure de vinyle (PVC)
- Le polystyrène (PS)
- Polyéthylène Téréphtalate (PET)

Le Tableau 2.1 présente quelques domaines d'applications de chacun d'entre eux.

Les thermoplastiques à l'état solide sont soit amorphes, c'est-à-dire dépourvus de présence d'organisation de la matière, ou soit cristallins. Cependant et étant donné la structure macromoléculaire des polymères, il est quasi impossible d'avoir un polymère totalement cristallin. En d'autres termes, il coexiste toujours dans ces polymères une phase amorphe et une phase cristalline. Ils sont dits semi-cristallins et sont caractérisés par un taux de cristallinité (i.e. pourcentage de cristaux). Ce dernier est très dépendant des conditions de fabrication, ce qui permet le contrôle des propriétés.

Tableau 2.1 : Propriétés et quelques domaines d'applications des thermoplastiques usuels

Thermoplastique	Particularités	Exemples d'application
LDPE, LLDPE	Transparence, flexibilité.	Films plastiques, sacs (de poubelle, d'épicerie), bouteilles.
HDPE	Opaque, rigide, inertie chimique.	Contenants, conserves, jouets, seaux, bouteilles de jus de fruits et lait.
PP	Rigide, résistant aux micro-ondes, chocs, froid.	Bacs, boîtes, contenants, pare-chocs, tubes, couvercles et bouchons de contenants, pot de yogourt.
PS	Transparent, opaque.	Emballage de <i>fast-food</i> , tasses de café, couvercles, bacs.
PVC	Transparent, rigide.	Matériaux de construction, fournitures (bancs, fenêtres, etc.), barrières, jouets.
PET	Transparent, résistant aux parfums, brillant, résistant aux chocs, obstacle aux gaz.	Boissons non-alcoolisées, huiles et bouteilles d'eau, flacons, pots, plateaux, films plastiques.

¹ Voir la liste des acronymes en page xv

Parmi les thermoplastiques amorphes, on compte le Polystyrène (PS), le Polycarbonate (PC), l'acrylonitrile butadiène styrène (ABS) et le polyméthacrylate de méthyle (Plexiglas ou PMMA). Le polyéthylène (PE), le polypropylène (PP) et le polyéthylène téréphtalate (PET) sont, quant à eux, généralement semi-cristallins. Le chlorure de polyvinyle (PVC) possède quant à lui un très faible taux de cristallinité et est généralement considéré comme amorphe.

Les thermoplastiques présentent une température caractéristique dite de transition vitreuse T_g . Cette dernière est toujours associée à la phase amorphe du matériau. En-dessous de cette température, le thermoplastique est dit vitreux, c'est-à-dire qu'il est rigide avec un module d'élasticité de quelques gigapascals. Au dessus de cette température, le thermoplastique présente un état caoutchoutique avec une chute de la rigidité. Cette chute est de 3 décades pour les polymères amorphes portant ainsi le module à quelques mégapascals, et de seulement une décade pour les polymères semi-cristallins.

2.2.2 Les thermoplastiques les plus utilisés

En Europe pour l'année 2008 [8], la production des résines thermoplastiques totale fut de 45.5 milliards de tonnes (Figure 2.7). Elle place le polyéthylène (LDPE, LLDPE et HDPE) comme étant le plus utilisé, ensuite suivent le polypropylène (PP) et le chlorure de polyvinyle (PVC). Il faut toutefois noter la production de LLDPE est deux fois plus grande que celle du LDPE en raison de ses très bonnes propriétés mécaniques. Tous ces thermoplastiques sont utilisés dans les secteurs d'activités présentés à la Figure 2.8.

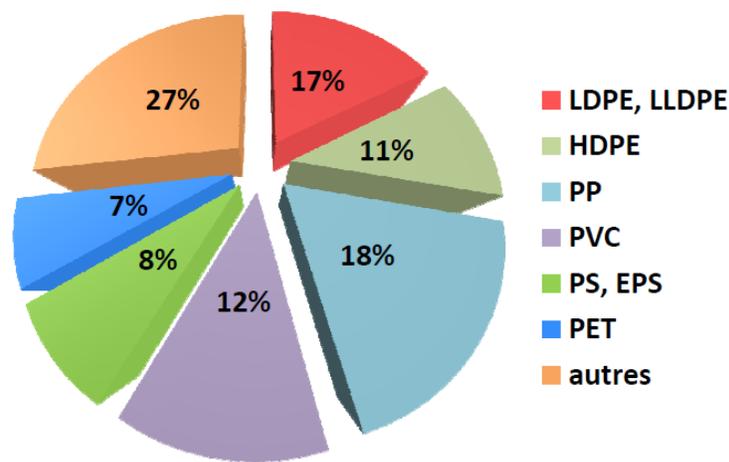


Figure 2.7 : Répartition de la demande en thermoplastiques en Europe en 2008 [8]

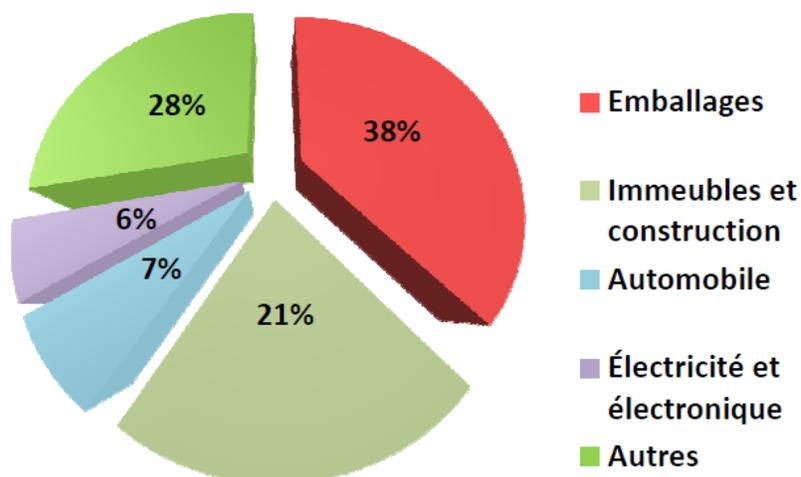


Figure 2.8 : Domaines d'applications des thermoplastiques en Europe en 2008 [8]

En ce qui concerne plus spécifiquement le Canada [9], l'industrie du traitement des plastiques représente 0.5% du produit national brut domestique, 0.5% des emplois du pays et 3.9% des emplois dans le secteur de la fabrication. Au niveau du Canada, la répartition dans les domaines d'application est assez similaire à celle de l'Europe (Figure 2.9).

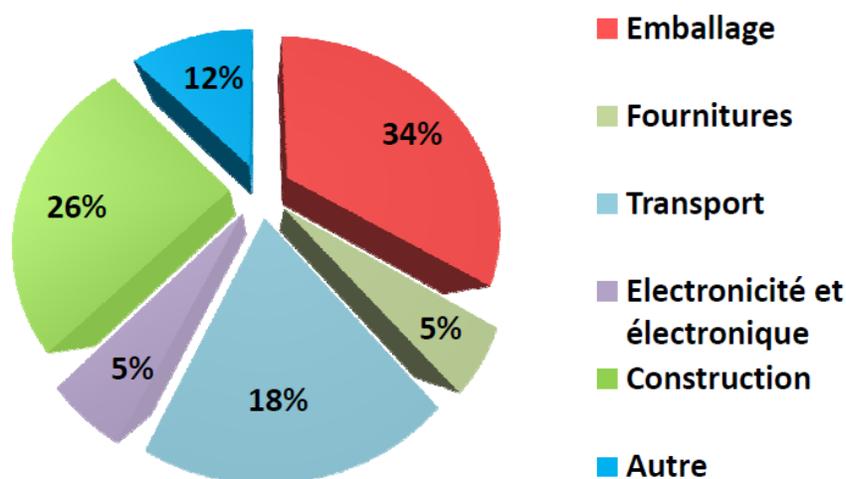


Figure 2.9 : Domaines d'applications des thermoplastiques au Canada [9]

L'industrie du plastique au Canada se répartit sur plusieurs provinces [10]; 27% des établissements sont au Québec, 11% en Colombie Britannique, 10% dans les Plaines et 2%

dans les provinces de l'Atlantique. En ce qui concerne les thermoplastiques, les différents lieux de productions sont présentés sur le Tableau 2.2.

Tableau 2.2 : Principaux producteurs de thermoplastiques du Canada en 1998 [10]

Thermoplastique	Fabriquant	Lieu
LDPE	AT Plastics Inc	Edmonton, AB
	Dow Chemicals Canada LTD	Sarnia, ON
	Nova Chemicals	Moore Township, ON
	Union Carbide	Prentiss, AB
LLDPE	Dow Chemicals Canada LTD	Fort Sask., AB
HDPE	Id.	Fort Sask., AB
	Imperial Oil	Sarnia, ON
	Nova Chemicals	Joffre, AB
	Id.	Moore Township, ON
	Id.	St. Clair River, ON
PP	Pétromont	Montréal est, QC
	Basell	Varenes, QC
PS	Id.	Sarnia, ON
	Dow Chemical Canada Ltd	Sarnia, ON
	Huntsman Chemical	Mansonville, QC
PVC	Nova Chemicals	Montreal, QC
	Royal Polymers	Sarnia, ON
	Oxyvinyls	Niagara Falls, ON
	Id.	Fort Sask., AB
PET	Eastman Chemical	Toronto, ON
	KOAC	Kingston, ON

2.2.3 Propriétés des thermoplastiques les plus utilisés

Cette partie a pour but d'exposer les caractéristiques, qu'elles soient mécaniques, thermiques ou autres, des thermoplastiques les plus employés dans la vie courante. Ceci permet aussi de connaître les propriétés des matériaux qui peuvent être potentiellement utilisés dans le cadre de cette étude. Les valeurs données dans ce paragraphe sont issues du logiciel CES, une banque de donnée de matériaux dont les polymères.

Polyéthylène basse densité (LDPE) :

Le polyéthylène basse densité (LDPE pour *low density polyethylene*) est le plus ancien thermoplastique produit industriellement. Il est également un des plus simples à fabriquer et des moins chers. C'est un thermoplastique semi-cristallin. Il est obtenu par polymérisation

radicalaire vinylique sous très haute pression, et possède une masse molaire de l'ordre de 200 000 à 500 000 g/mol (elle peut être beaucoup plus élevée selon les applications visées).

Le LDPE est un polymère ramifié présentant de longues branches. Il en résulte un taux de cristallinité et une masse volumique faible, une malléabilité et une résistance aux chocs élevée.

Ses principales applications sont des produits souples tels que les sacs poubelles, les films plastiques, les sachets d'épicerie, les récipients et contenants souples (e.g. ketchup, crèmes hydratantes) et les gants. En termes de recyclabilité, il porte l'indice 4 dans le code d'identification des résines. Ce code a été mis en place par la société du plastique du Canada pour rapidement identifier le thermoplastique et donc faciliter l'opération de tri et de recyclage. Le Tableau 2.3 suivant présente les principales caractéristiques du LDPE.

Tableau 2.3 : Propriétés du Polyéthylène basse densité (LDPE)

Polyéthylène basse densité (LDPE) – Propriétés mécaniques			
masse volumique (kg/m³)	917 - 932	Module d'Young (MPa)	172 – 283
Module en cisaillement (MPa)	59.4 – 97.7	Module de flexion (MPa)	241 – 330
Coefficient de Poisson	0.439 – 0.457	Amortissement structural	0.141 – 0.233
Limite élastique en traction (MPa)	8.96 – 14.5	Résistance à l'allongement (MPa)	13.3 – 26.4
Résistance à la compression (MPa)	10.8 – 17.4	Résistance à la flexion (MPa)	18.6 – 37
Polyéthylène basse densité (LDPE) – Propriétés thermiques			
Point de fusion (°C)	98 – 115	Température de transition vitreuse (°C)	-125 – -90
Conductivité thermique (W/m.°C)	0.322 – 0.348	Capacité de chaleur spécifique (J/kg.°C)	1.84e3 – 1.92e3
Température maximale d'utilisation (°C)	81 – 95	Température minimale d'utilisation (°C)	-68 – -58
Polyéthylène basse densité (LDPE) – Autres propriétés			
Taux de cristallinité (%)	≈ 43	Résistance électrique (μohm.cm)	3.3e24 – 3e25
Indice de réfraction	1.57	Transparence	Translucide

Polyéthylène linéaire basse densité (LLDPE) :

Le polyéthylène basse densité linéaire (LLDPE pour *Linear low-density polyethylene*) a été inventé pour remplacer le LDPE en 1970. Il est essentiellement linéaire avec un nombre

significatif de branches courtes. Le LLDPE diffère structurellement du LDPE en raison de l'absence de longues branches. De plus, sa distribution de masses moléculaires est plus étroite ce qui lui confère de bonnes propriétés mécaniques. Contrairement au LDPE, il est synthétisé via l'utilisation de catalyseur de type Ziegler ou Philips.

Comparativement au LDPE, le LLDPE présente une résistance à l'allongement et à l'impact plus importante. Il est de plus très flexible et présente une grande ductilité. Il a une bonne résistance à la déchirure et aux produits chimiques ainsi qu'aux rayons ultra-violet, et de bonnes propriétés électriques. C'est la catégorie de polyéthylène la plus utilisée dans la vie courante, pratiquement deux fois plus que le LDPE.

Dans la vie courante il est très utilisé pour faire des sacs plastiques ou des films étirables de très faibles épaisseurs ($\leq 25 \mu\text{m}$). Il sert également à faire des jouets, des couvercles, des tubes, des seaux, des contenants, des emballages souples et des enrobages de câbles. Le Tableau 2.4 suivant résume les principales caractéristiques du LLDPE.

Tableau 2.4 : Propriétés du Polyéthylène basse densité linéaire

Polyéthylène basse densité linéaire (LLDPE) – Propriétés mécaniques			
masse volumique (kg/m³)	918 – 940	Module d'Young (MPa)	262 – 517
Module de cisaillement (MPa)	91 – 180	Module de flexion (MPa)	275 – 722
Coefficient de Poisson	0.43 – 0.448	Amortissement structural	0.0774 – 0.153
Limite élastique en traction (MPa)	9.65 – 19.3	Résistance à l'allongement (MPa)	13.1 – 27.6
Résistance à la compression (MPa)	11.6 – 23.2	Résistance à la flexion (Mpa)	18.3 – 38.6
Polyéthylène basse densité linéaire (LLDPE) – Propriétés thermiques			
Point de fusion (°C)	122 – 124	Température de transition vitreuse (°C)	-125 – -90
Conductivité thermique (W/m.°C)	0.155 – 0.162	Capacité de chaleur spécifique (J/kg.°C)	1.84e3 – 1.91e3
Température maximale d'utilisation (°C)	77 – 97	Température minimale d'utilisation (°C)	-79 – -69
Polyéthylène basse densité linéaire (LLDPE) – Autres propriétés			
Taux de cristallinité (%)	≈ 60%	Résistance électrique (μohm.cm)	3.3e24 - 3e25
Indice de réfraction	1.5 - 1.52	Transparence	Translucide

Polyéthylène haute densité (HDPE) :

Le polyéthylène haute densité (HDPE pour *high-density polyethylene*) a été synthétisé par le chimiste allemand Karl Ziegler en 1953. Le HDPE est très peu ramifié (petites branches), ce qui lui donne une structure plus linéaire facilitant ainsi la cristallisation. Il présente une plus grande ductilité et rigidité par rapport au LDPE. Il est aussi assez résistant aux hautes températures (i.e. 120 °C pour de courtes durées, 110 °C en continu).

Tableau 2.5 : Propriétés du Polyéthylène haute densité

Polyéthylène haute densité (HDPE) – Propriétés mécaniques			
masse volumique (kg/m³)	947 – 955	Module d'Young (MPa)	915 – 961
Module de cisaillement (MPa)	322 – 338	Module de flexion (MPa)	859 – 1200
Coefficient de Poisson	0.413 – 0.43	Amortissement structural	0.0416 – 0.0437
Limite élastique en traction (MPa)	19.3 – 26.9	Résistance à l'allongement (MPa)	17.2 – 29.6
Résistance à la compression (MPa)	23.2 – 32.3	Résistance à la flexion (Mpa)	24.1 – 41.4
Polyéthylène haute densité (HDPE) – Propriétés thermiques			
Point de fusion (°C)	125 – 135	Température de transition vitreuse (°C)	-125 – -90
Conductivité thermique (W/m.°C)	0.191 – 0.198	Capacité de chaleur spécifique (J/kg.°C)	1.75e3 – 1.81e3
Température maximale d'utilisation (°C)	110 – 130	Température minimale d'utilisation (°C)	-82 – -72
Polyéthylène haute densité (HDPE) – Autres propriétés			
Taux de cristallinité (%)	Jusqu'à 95%	Résistance électrique (μohm.cm)	3.3e24 – 3e25
Indice de réfraction	1.53 – 1.55	Transparence	Translucide

Les principales qualités du HDPE sont sa résilience même à basse température, sa résistance aux produits chimiques, sa faible sensibilité à l'eau, son imperméabilité à la vapeur d'eau et ses excellentes propriétés électriques. Tout ceci en font un matériau de choix dans les applications les plus variées comme l'extrusion-soufflage de corps creux, l'injection d'articles les plus divers, l'extrusion de films, tubes et câbles pour ne citer que les plus importantes. Il sert également à produire des contenants plastiques résistants, des pistes de glisse pour patinoires, des emballages de produits détergents et de lait, des rondelles de hockey, des bidons d'essence, des arrosoirs, des tables et des chaises pliantes, des abris de jardins et même des

implants mammaires. En termes de recyclabilité, il porte l'indice 2 dans le code d'identification des résines. Le Tableau 2.5 détaille les principales caractéristiques du HDPE.

Polypropylène (PP) :

Le polypropylène (PP) est un thermoplastique semi-cristallin obtenu par polymérisation du propylène. Il est inodore et non toxique, résiste bien à la flexion, à l'abrasion et à la fatigue. C'est également un bon isolant électrique et il est hydrophobe. Il est donc beaucoup utilisé pour faire des revêtements extérieurs, par exemple autour des piscines et des golfs miniatures. Par contre, il est sensible aux rayons ultra-violets, s'oxyde plus facilement que le polyéthylène et possède une température de transition vitreuse assez haute (environ -10°C à 0°C) ce qui peut le rendre cassant à température ambiante. C'est l'un des thermoplastiques les plus répandus. Il est utilisé pour fabriquer des contenants pour aliments. D'ailleurs sa température de fusion élevée, environ 160°C , lui permet de ne pas fondre dans un lave-vaisselle, comme cela pourrait être le cas pour le polyéthylène. Il est aussi utilisé pour fabriquer des pare-chocs de voitures ainsi que des tableaux de bord. En termes de recyclabilité, il porte l'indice 5 dans le code d'identification des résines. Le Tableau 2.6 suivant détaille les principales caractéristiques du polypropylène.

Tableau 2.6 : Propriétés du Polypropylène

Polypropylène (PP) – Propriétés mécaniques			
masse volumique (kg/m^3)	899 – 908	Module d'Young (MPa)	1340 – 1590
Module de cisaillement (MPa)	512 – 525	Module de flexion (MPa)	1310 – 1630
Coefficient de Poisson	0.405 – 0.413	Amortissement structural	0.0267 – 0.0281
Limite élastique en traction (MPa)	32.9 – 36.4	Résistance à l'allongement (MPa)	33 – 42.9
Résistance à la compression (MPa)	40.5 – 42.6	Résistance à la flexion (Mpa)	29.9 – 60.2
Polypropylène (PP) – Propriétés thermiques			
Point de fusion ($^{\circ}\text{C}$)	161 – 170	Température de transition vitreuse ($^{\circ}\text{C}$)	-14 – -6
Conductivité thermique ($\text{W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$)	0.205 – 0.213	Capacité de chaleur spécifique ($\text{J/kg}\cdot^{\circ}\text{C}$)	$1.67\text{e}3$ – $1.7\text{e}3$
Température maximale d'utilisation ($^{\circ}\text{C}$)	104 – 124	Température minimale d'utilisation ($^{\circ}\text{C}$)	-17 – -3

Polypropylène (PP) – Autres propriétés			
Taux de cristallinité (%)	≈ 65%	Résistance électrique (μohm.cm)	9.9e23– 1.01e24
Indice de réfraction	1.48 – 1.5	Transparence	Translucide

2.2.4 Thermoplastiques et charges

Une charge (renfort) est une substance inerte chimiquement qui ajoutée à un polymère (matrice) permet d'améliorer ses propriétés [11]. Dans le cas présent, le polymère est un thermoplastique. On compte parmi les différentes charges :

- Le carbonate de calcium (CaCO_3);
- Les céramiques;
- La silice (SiO_2);
- Le kaolin ou kaolinite ($\text{Si}_2\text{O}_5\text{Al}_2(\text{OH})_4$);
- Le sulfate de baryum (BaSO_4);
- Le talc (silicate de magnésium +eau de constitution);
- Le mica (silicates complexes);
- Les charges métalliques.

Ces renforts se présentent le plus souvent sous forme de poudre. Il faut aussi compter sur d'autres types de renforts tels que les fibres (de verre, de carbone, minérales, métalliques, naturelles), mais dans cette étude nous nous limiterons au développement de matériaux coupe-sons isotropes (donc des charges ponctuelles et non fibreuses).

Avant de réaliser un mélange, différents éléments sont à contrôler. Par exemple la compatibilité de la charge avec la résine (non-toxicité, neutralité chimique, pas d'instabilité avec la matrice) ou encore vérifier que le renfort n'endommagera pas le matériel (extrudeuse). La qualité du renfort est aussi importante car elle joue un rôle non négligeable dans l'amélioration des propriétés de la matrice. D'autres paramètres tels que la mouillabilité et les coûts de fabrication sont à prendre en compte [12]. [12] À noter toutefois que dans bien des cas, le renfort en poudre est bien moins cher que la matrice et son ajout permet de réduire le coût du produit final.

Charges minérales

Le carbonate de calcium ($\rho = 2700$ à 2900 kg/m^3) est un mélange de calcite et d'aragonite et ses particules sont très fines. Il est très utilisé avec le PVC et est de plus en plus employé avec le polyéthylène et le polypropylène. Ajouté au polystyrène ou au polypropylène, le carbonate de calcium améliore l'aptitude à l'emboutissage et la transparence de ces polymères.

La silice ($\rho = 2200 \text{ kg/m}^3$) mélangée à un polymère permet d'améliorer les propriétés diélectriques et la résistance thermique. La rigidité augmente ainsi que la température de transition vitreuse et la résistance à la compression.

L'ajout de talc ($\rho = 2750 \text{ kg/m}^3$) améliore l'isolation thermique et la résistance à l'eau. Il facilite également le moulage. Il est la charge la plus utilisée dans les thermoplastiques. Il leur donne une meilleure résistance au fluage ainsi qu'une plus grande rigidité. Il est très utilisé pour renforcer le PP à des concentrations massiques d'environ 40% et le HDPE et le PS à des concentrations de 20 à 30%.

Le kaolin ($\rho = 2580 \text{ kg/m}^3$) est une argile blanche qui permet d'améliorer les propriétés électriques et d'écoulement à l'état fondu des polymères. Il est par contre relativement difficile de le mélanger correctement avec une matrice. C'est une charge qui est très employée dans l'industrie, notamment pour l'isolation des câbles.

Le mica ($\rho = 2700 \text{ kg/m}^3$) est quant à lui utilisé pour améliorer les propriétés électriques et thermiques ainsi que la résistance aux produits acides et basiques.

Le sulfate de baryum ($\rho = 4450 \text{ kg/m}^3$) est un minerai qui se présente sous la forme de poudre blanche. Sa principale fonction est d'augmenter la masse volumique de la matrice. Il est très utilisé dans l'industrie du caoutchouc. Il leur confère aussi de bonnes propriétés d'isolant acoustique et améliore également la résistance aux produits chimiques, au frottement ainsi que l'opacité aux rayons X.

Les microbilles de céramique ($\rho = 2540 \text{ kg/m}^3$) ont une dimension de l'ordre de 1 à $3000 \mu\text{m}$. Leur ajout permet d'améliorer la résistance aux chocs et à la compression des polymères. Les microbilles de verre sont aussi utilisées pour augmenter le module en compression. Elles s'emploient indifféremment avec les thermoplastiques et les thermodurcissables.

Charges métalliques

Les charges métalliques se présentent sous forme de poudre ou de paillettes mais depuis quelques temps sous forme de flocons. Elles sont principalement utilisées pour améliorer la conduction électrique et thermique. Les principales charges métalliques utilisées dans l'industrie sont le cuivre, le zinc, le nickel, l'aluminium et le fer. Le plomb était également autrefois utilisé mais pour des raisons de toxicité, il est aujourd'hui banni.

De manière générale, outre la conductivité thermique et électrique, l'aluminium améliore également la résistance au choc et rend plus facile l'usinage du composite. Il en est de même pour le cuivre sauf en ce qui a trait à la résistance aux chocs. Le fer permet l'amélioration de la résistance à l'abrasion tandis que le zinc améliore la résistance à la corrosion.

2.3 Les mélanges thermoplastiques / métaux

Tel que spécifié dans la section précédente (§ 2.2.4), l'utilisation de poudre métallique en tant que renfort permet principalement d'améliorer la conductivité thermique et électrique. Cependant, un certain nombre d'études ont portées sur l'influence de la poudre métallique sur les propriétés mécaniques du composite. Tel que mentionné précédemment, le module d'Young a un impact sur la position de la fréquence de coïncidence, fréquence à laquelle il y a une importante perte de l'isolation acoustique. Il est donc important d'observer l'évolution de ce paramètre avec l'ajout de renfort métallique.

2.3.1 Influence de la charge sur le module d'Young

Lorsque le renfort métallique se présente sous forme de poudre (particules), le module d'Young a tendance à augmenter avec la concentration en renfort. Cependant, cette augmentation peut varier suivant la nature du métal utilisé, le type de plastique et la taille des particules métalliques.

Brostow et al. [13] ont analysé l'évolution du module d'élasticité du LDPE en réalisant différents mélanges avec du nickel, de l'aluminium et de l'argent. Il est apparu que pour de faibles concentrations ($\leq 5\%$ massique), le module d'Young décroît. Au-delà, une augmentation plus ou moins importante suivant le type de métal est observée (Figure 2.10). Cependant, il apparaît qu'à 10% de concentration, le module d'élasticité du composite est encore inférieur à celui LDPE pur. Pour expliquer ce phénomène, deux hypothèses sont avancées par les auteurs : une mauvaise adhésion interfaciale et/ou une baisse de la cristallinité.

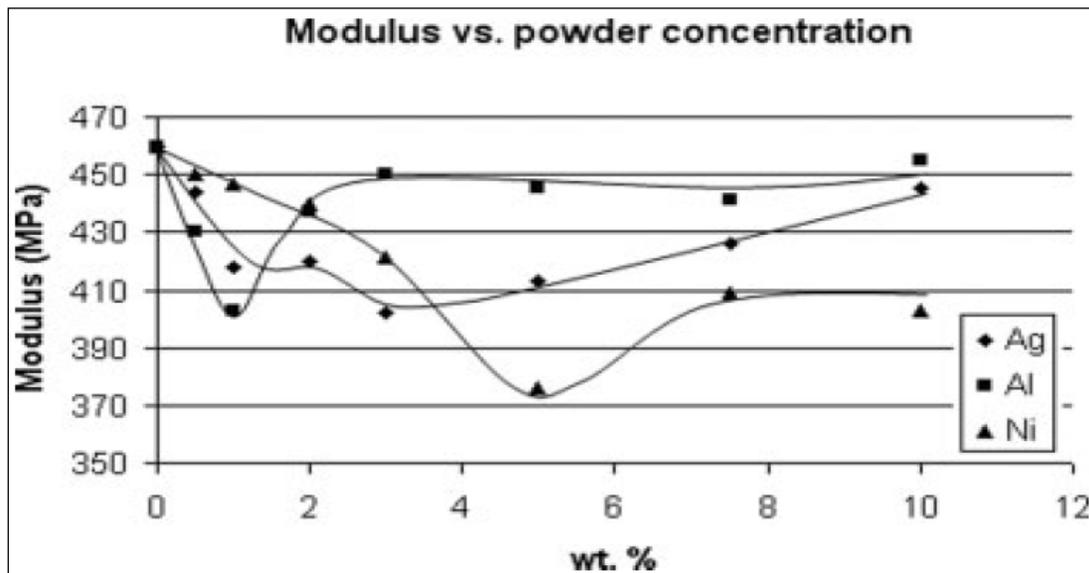


Figure 2.10 : Évolution du Module d'Young du LDPE en fonction de la concentration massique des différents renforts métalliques [13]

Le composite qui présente la plus forte augmentation du module d'Young est celui contenant de l'aluminium. Il se trouve que c'est le renfort qui a la plus petites taille de particules. À pourcentage identique, les particules pour ce renfort sont plus nombreuses ce qui a pour effet de gêner la mobilité des chaînes. Ce point sera abordé un peu plus loin dans ce chapitre.

Luyt et al. [14] ont également étudié l'évolution des propriétés mécaniques de mélanges de LDPE / poudre de cuivre et de LLDPE/ poudre de cuivre. Les concentrations sont comprises entre 2 et 18% de fraction volumique. Le Tableau 2.7 présente les résultats obtenus.

Tableau 2.7 : Évolution du module d'Young de composites à matrice LDPE et LLDPE en fonction de la concentration de cuivre [14].

Concentration (Vol. % Cu)	LDPE		LLDPE	
	E (MPa)	Augmentation (%)	E (MPa)	Augmentation (%)
0	94.8 ± 3.1	0	118.4 ± 4.7	0
2	95.9 ± 1.6	+1.16	104 ± 3.6	-12.16
3	94.0 ± 1.9	-0.84	114 ± 1.5	-3.72
4	98.0 ± 2.7	+3.38	114 ± 5.0	-3.72
5	99.4 ± 4.0	+4.85	122 ± 6.0	+3.04
12	120.0 ± 1.1	+26.59	135 ± 1.5	+14.02
16	123.0 ± 6.3	+29.75	142 ± 3.4	+19.93
18	140.0 ± 7.0	+47.68	153 ± 7.5	+29.22

Il apparaît que les valeurs du module d'Young du LLDPE et de ses composites sont toutes supérieures à celle du LDPE. Ceci provient du fait que le LLDPE cristallise plus facilement que le LDPE. En outre, il est à noter que pour les composites LLDPE/Cu à faibles concentrations en cuivre le module d'Young décroît. Ceci provient de la faible interaction entre le LLDPE et le cuivre. Toutefois, les auteurs n'abordent pas l'influence de la taille et la distribution des particules.

Nurazreena et al. [15] ont réalisé des mélanges de HDPE avec du fer, du cuivre et de l'aluminium pour des fractions volumiques allant jusqu'à 55%. Pour les trois types de poudres métalliques (Figure 2.11), il y a une augmentation constante du module d'Young, mais il apparaît que celle du composite renforcé d'aluminium est bien plus importante que les autres. La forme de flocons (*flakes*) des particules d'aluminium explique ce phénomène. En effet, cette forme confère une surface spécifique plus importante qu'avec une forme sphérique par exemple.

Enfin, Gungot [16] a réalisé des mélanges de HDPE et de poudre de fer pour des fractions volumiques de 5, 10 et 15%. Pour de petites fractions volumiques (Tableau 2.8), le module d'Young présente une augmentation relativement importante puisqu'elle approche les 50% pour une concentration de 15%.

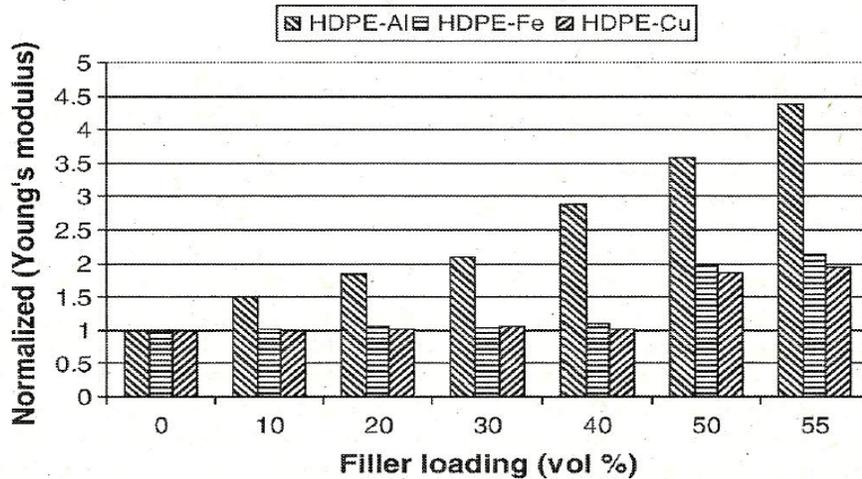


Figure 2.11 : Module d'Young normalisé des composites à matrice HDPE en fonction des renforts d'aluminium, de fer et de cuivre [15].

Tableau 2.8 : Évolution du Module d'Young pour plusieurs fractions de poudre de fer mélangé avec du HDPE [16]

Concentration volumique de fer (%)	0%	5%	10%	15%
Module d'Young E (MPa)	284.43	373.95	388.36	420.95
Augmentation du module d'Young par rapport au HDPE pur (%)	x	31.5%	36,5%	48%

2.3.2 Influence de la taille des particules du renfort

Au regard des études précédentes, il apparaît que la taille des particules a un effet important sur l'évolution du module d'Young. Ainsi, Shao-Yun et al. [17] ont démontré expérimentalement que le diamètre moyen de microbilles de verre influence de manière non négligeable la rigidité d'un composite à matrice époxy. Les résultats obtenus montrent que pour les grandes fractions volumiques (30, 40 et 46%), le module d'Young diminue légèrement avec l'augmentation de la taille des particules (Figure 2.12).

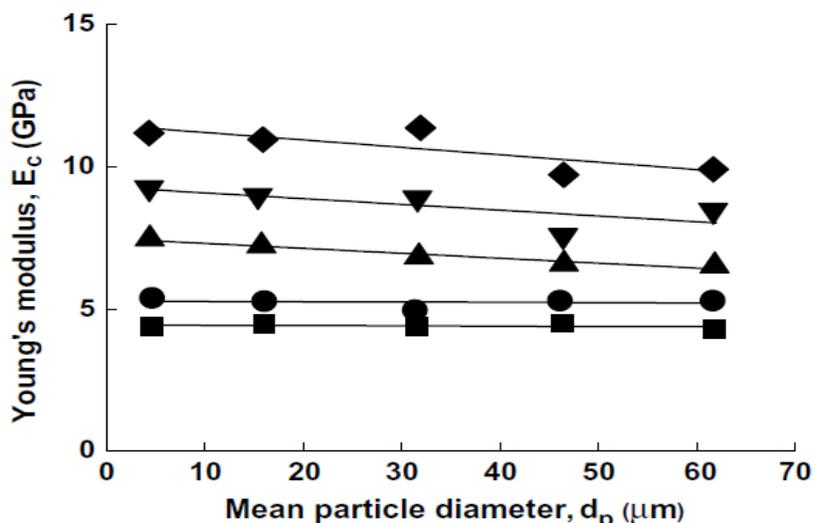


Figure 2.12 : Influence de la taille des particules sur le module d'Young pour plusieurs concentrations (■ 10%, ● 18%, ▲ 30%, ▼ 40% et ◆ 48%) [17].

Sur le même modèle, Vollenberg et Heikens [18] ont réalisé des composites microbilles de verre et polystyrène (PS) ou polypropylène (PP). Différentes tailles de microbilles ont été testées; 0.035, 0.4, 4, 30 et 100 μm . Il s'est avéré que, là encore, l'augmentation du module d'Young est limitée par l'augmentation de la taille des microbilles (Figure 2.13)

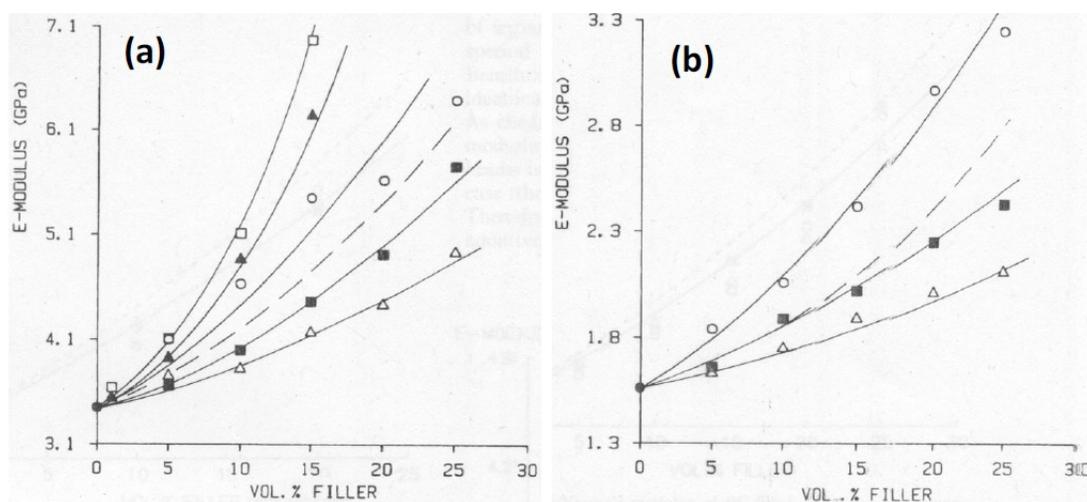


Figure 2.13 : Influence de la taille des particules sur le module d'Young en fonction de la fraction volumique avec (a) une matrice de PS et (b) une matrice de PP [18].
(□ 0.035 μm , ▲ 0.4 μm , ○ 4 μm , ■ 30 μm , △ 100 μm)

2.4 Thermoplastiques et renforts : applications dans l'acoustique

2.4.1 Produits du commerce

Tel que spécifié précédemment dans ce mémoire, la masse volumique est un paramètre important pour un matériau acoustique de type coupe son. L'isolation acoustique est apportée par l'effet de masse du matériau (loi de masse). Il y a encore quelques années, le plomb était utilisé pour alourdir les matériaux utilisés pour des applications acoustiques. Bien évidemment, il n'est plus utilisé de nos jours pour des raisons de toxicité. Ainsi, l'industrie s'est tournée vers d'autres renforts tels que le sulfate de baryum. Ce minéral présente l'intérêt d'être peu coûteux et de se trouver en très grande quantité dans de nombreux pays, dont le Canada. Les applications les plus connues dans le domaine de l'acoustique sont les vinyles alourdis pour lesquels les concentrations peuvent atteindre 80%.

Parmi ce qui est disponible dans le commerce, on compte le *Barymat* ou le *Model KNM* de *Kinetics* [19] qui se présentent sous forme de rouleaux. Un autre type de produit tel que celui proposé par *Insultec* [20] est réalisé sur mesure par le fabricant et épouse totalement la forme de la structure dont le bruit doit être réduit (Figure 2.14 (a)). Ce type de produit peut aussi se coupler à un absorbant acoustique.

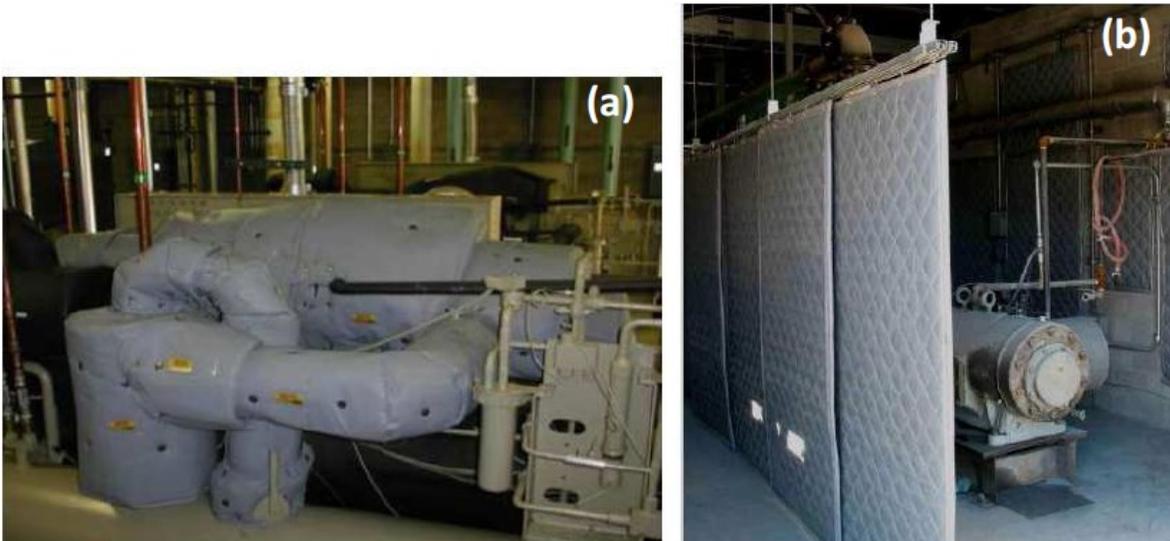


Figure 2.14 : (a) Isolant acoustique épousant la forme de la source de bruit et (b) sous forme de rideau

Il existe également la version « rideau » de ce produit (annexe 3) proposé par *Unger Technologies Inc.* Il s'agit d'une toile lourde tendue ou suspendue par une structure métallique (Figure 2.14 (b)). C'est pour ainsi dire la version souple d'un mur antibruit mais qui présente l'énorme intérêt de pouvoir être monté et démonté sans nécessiter une logistique lourde. Là encore, ce produit se présente sous la forme d'un absorbant couplé à un vinyle alourdi.

En ce qui concerne les produits d'isolation acoustique issus du recyclage, on compte quelques constructeurs de murs anti-bruits. Parmi eux, *Harder Luckey & Hargrave* [21] propose un écran fixe mais dont le substrat interne est réalisé entièrement avec du PVC recyclé. Ce dernier existe en deux versions; une creuse et une autre contenant un bloc de polystyrène à l'intérieur augmentant ainsi la perte par transmission de l'écran. Ce produit baptisé « Tuf-Barrier » (Figure 2.15) à une durée de vie de 40 ans et est entièrement recyclable. Sa masse surfacique est de 20.2 kg/m^2 mais son utilisation se limite aux grands axes routiers.



Figure 2.15 : Écran Tuf Barrier de Harder Luckey & Hargrave

En termes de matière première, la résine Keldax® [22] est un polymère à base d'éthylène (thermoplastique) qui est employée pour des applications d'isolation acoustique dans l'automobile (e.g. isolation du tableau de bord, sous-couche de tapis de sol, passage de roues, fond du coffre arrière, enrouleur de la ceinture, intérieur de la portière) (Figure 2.16). Elle peut

être utilisée en extrusion ou en injection pour la fabrication de pièces de différentes formes. Elle présente l'avantage d'être facile à mouler, possède une importante masse volumique (1900 kg/m^3) et peut être utilisée dans des espaces restreints et compacts. Une fois chauffée, cette résine peut aussi adhérer à d'autres surfaces telles que des absorbants acoustiques ou des isolants vibratoires, et cela sans l'utilisation de colles ou d'adhésifs. Enfin, cette résine est entièrement recyclable pour de nouvelles utilisations.

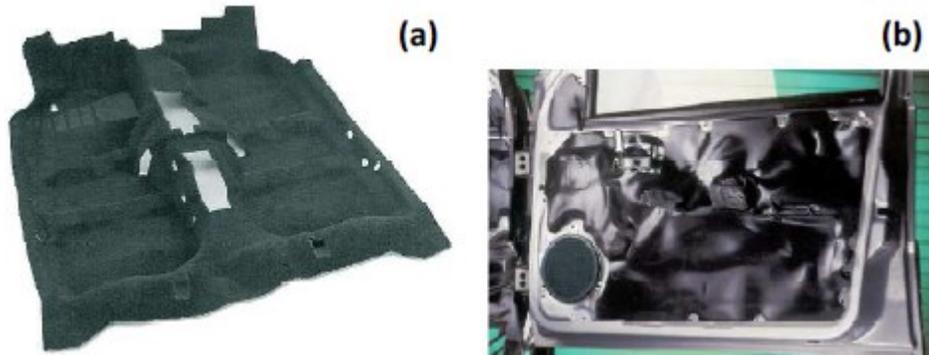


Figure 2.16 : Exemples d'utilisation de la résine Keldax® : (a) tapis de sol et (b) intérieur de portière

2.4.2 Études acoustiques

Dans la littérature, il y a beaucoup de références à l'utilisation de thermoplastiques (recyclés ou non) pour des applications d'absorbants acoustiques [23 - 28]. En revanche, peu de travaux scientifiques ont été dédiés aux isolants acoustiques en tant que tels. La revue de la littérature permet toutefois de distinguer 2 études intéressantes.

Ainsi, Lu et al. [29] ont analysé la perte par transmission de composites constitués de fibre de verre et de résine de polyuréthane (PU) en faisant varier le taux de silice. Trois échantillons ont été réalisés avec la même structure multicouche mais le premier échantillon (A1) contenant 0% de silice, le second (A2) 7% et le dernier 14%. Pour chacun des trois échantillons, la quantité de résine de PU a été ajustée pour avoir la même masse volumique.

Il apparaît d'après les résultats de la Figure 2.17 que la perte par transmission est sensiblement équivalente pour les trois échantillons sauf dans la zone fréquentielle 1250-4000 Hz où il semble que ce soit l'échantillon A2 qui est le plus performant. Toutefois, il n'y a pas dans

cette publication d'explications précises ou de lien avec les caractéristiques mécaniques mesurées pour expliquer les résultats.

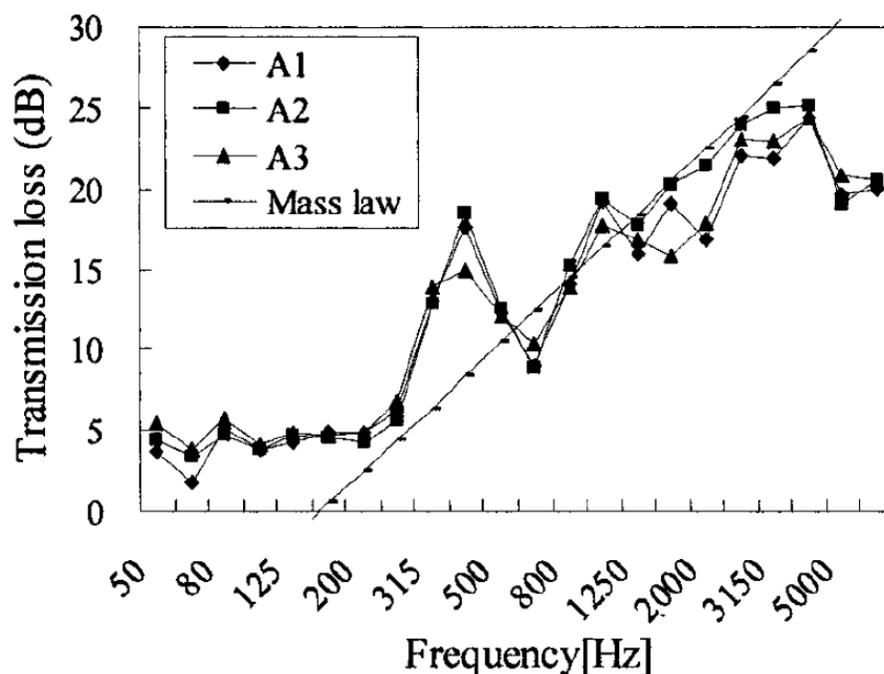


Figure 2.17 : Comparaison de la perte par transmission de composites de PU avec variation du taux de concentration de silice (A1=0%; A2=7%; A3=14%) [29]

Choi et Hwang [30] ont, quant à eux, évalué la perte par transmission de composites composés de poudre de carbonate de calcium (CaCO_3) mélangée avec une matrice de PE ou de PP. Ces mélanges ont été réalisés avec de concentrations de CaCO_3 de 0, 20, 40, 60 et 80%. Deux tailles différentes de poudre ont été utilisées, à savoir 0.7 et 35 μm . Il ressort de cette étude que la taille de la poudre influence peu les résultats de la perte par transmission sur la plage fréquentielle 0-5 kHz (Figure 2.18). De plus, il apparaît clairement qu'à partir de 315 Hz la perte par transmission augmente avec la masse volumique du composite. L'autre point intéressant est le fait que pour une masse volumique équivalente, le polyéthylène s'avère être un peu plus isolant que le polypropylène à partir de 2500Hz (Figure 2.19).

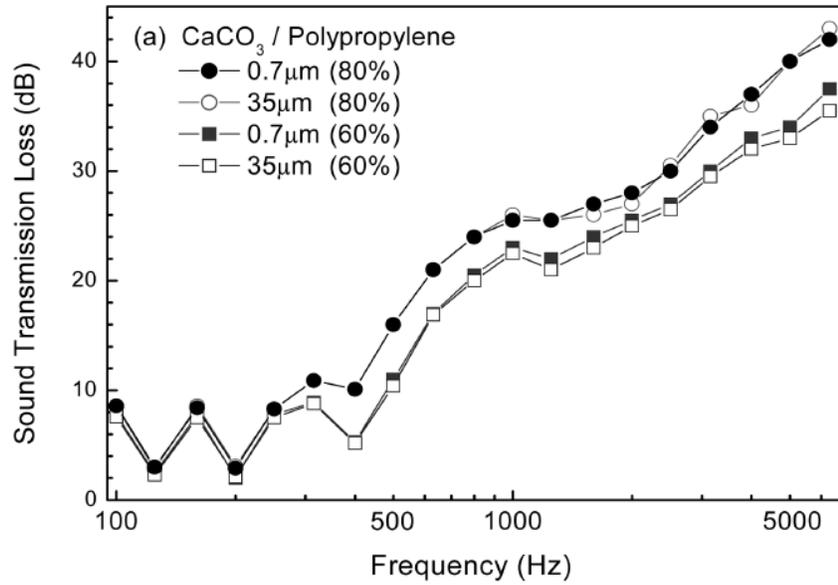


Figure 2.18 : Comparaison de la perte par transmission de PP chargé de CaCO_3 à 60% et 80% [30]

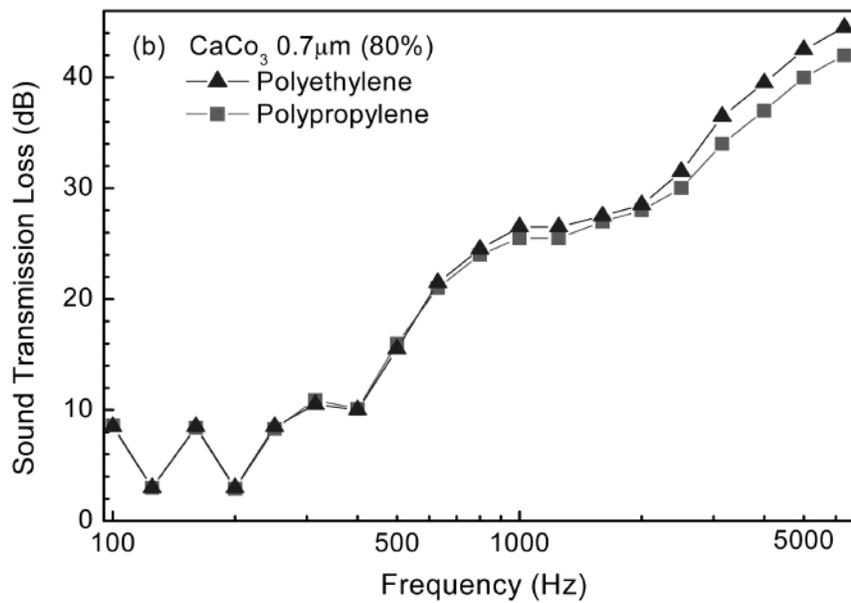


Figure 2.19 : Comparaison de la perte par transmission de PP et de PE chargés de CaCO_3 à 80% [30]

Le type de courbe n'influence pas le calcul du module d'Young. Pour cela, il est nécessaire de calculer la pente en prenant la tangente à l'origine de la courbe mesurée. La norme ISO 527-2 [33] indique que le module d'Young peut aussi être calculé en prenant le coefficient directeur de la droite passant par les deux points à 0.25 et 0.5% de déformation. Cependant, cela nécessite un échantillonnage très important au voisinage de l'origine. La Norme ASTM précise que les caractéristiques contrainte/déformation des plastiques dépendent de beaucoup de paramètres (e.g. température et vitesse de sollicitation) et précise que cette méthode de mesure est discutable. Il existe cependant une autre méthode pour déterminer le module d'Young. Celle-ci est présentée dans la section suivante.

Cette norme permet également la mesure du coefficient de Poisson. La même méthode expérimentale est utilisée à la différence près que la déformation transversale est aussi mesurée simultanément avec les deux autres grandeurs.

2.5.2 Norme de mesure ASTM E756-04

Cette norme de mesure permet l'obtention du module d'Young et de l'amortissement structural [34]. Ce dernier évalue le degré de dissipation de l'énergie vibratoire. Cette norme se base sur la théorie de la poutre encastrée – libre. D'un point de vue expérimental, il y a plusieurs configurations de poutres possibles (Figure 2.21).

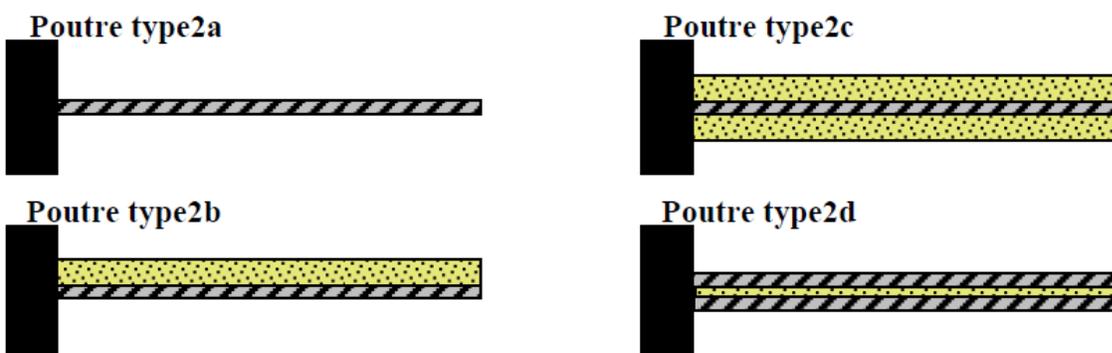


Figure 2.21 : Configurations possibles pour la mesure de l'amortissement structural

Le choix d'une configuration ou d'une autre dépend en grande partie du type de matériau (viscoélastique, matériaux souples tels que le vinyle alourdis) et de sa tenue mécanique. Dans le cas présent, les thermoplastiques, à la différence des élastomères, ont tous une rigidité suffisante pour ne considérer que la poutre uniforme, c'est-à-dire le type 2a.

Pour réaliser la mesure; la poutre est montée en conditions aux limites encastrée-libre. Un signal vibratoire sinusoïdal est généré à la base de la poutre par un excitateur magnétique. Celui-ci doit être bien placé au centre de la poutre par rapport à la largeur pour éviter l'introduction d'un moment dans celle-ci. À l'extrémité de la poutre, la vitesse vibratoire est mesurée avec un vibromètre laser et la fonction de transfert vitesse/force est calculée. À partir de la mesure de la fonction de transfert, l'amortissement structural est déterminé par la formule :

$$\eta = \frac{\Delta f_n}{f_n} \quad (2.18)$$

avec :

Δf_n Largeur de la bande fréquentielle du mode n à -3dB (en Hz)

f_n Fréquence de résonance du mode n (en Hz)

Le module d'Young se calcule quant à lui avec la formule :

$$E = \frac{12\rho L^4 f_n^2}{C_n^2 h^2} \quad (2.19)$$

avec :

ρ masse volumique de la poutre (kg/m^3)

L Longueur de la poutre (m)

h Épaisseur de la poutre (m)

C_n Coefficient du mode n pour une poutre encastrée - libre

Il est important de noter qu'en termes de précision et pour la détermination de E , cette méthode de mesure est plus fiable qu'un essai de traction. Ce dernier permet principalement de déterminer d'autres grandeurs telles que la résistance maximale à l'allongement, la limite

d'élasticité ou le coefficient de Poisson. Son utilisation pour la mesure du module d'Young est plutôt d'ordre pratique.

2.5.3 Mesure de la masse volumique

La mesure de la masse volumique est régie par la norme ASTM D1505 - 10 [35]. Cependant, elle est longue à mettre en place. Ainsi dans cette étude, la méthode qui sera utilisée fait intervenir la poussée d'Archimède. Pour cela, il est nécessaire de disposer d'une balance précise dont le plateau est relié à un portique permettant une pesée dans l'air et dans un liquide approprié (Figure 2.22). Le béccher contenant le liquide en question ne doit pas être en contact avec la balance. Tout d'abord l'échantillon est placé sur le plateau 1 et la masse m_1 est notée. Ensuite, le même échantillon est déposé sur le plateau 2 et la masse m_2 est notée.

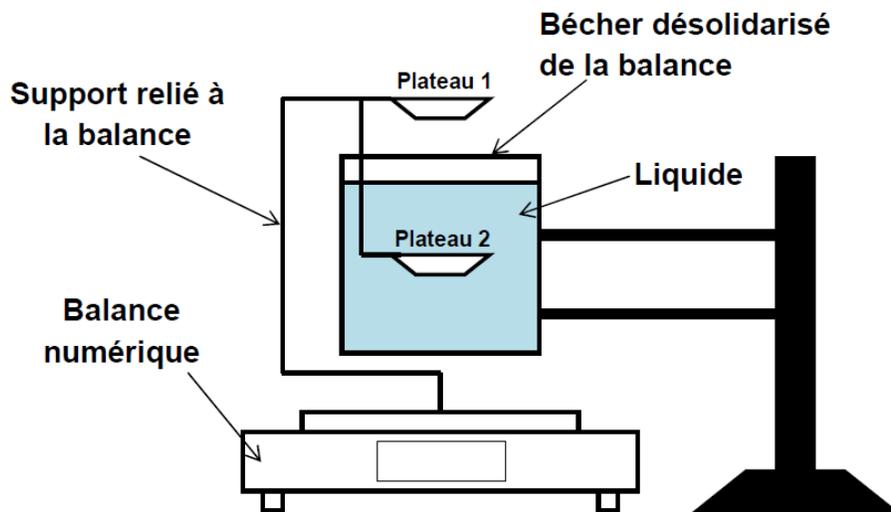


Figure 2.22 : Montage pour la mesure de la masse volumique

La masse volumique est alors obtenue avec la relation suivante :

$$\rho_m = \frac{m_1 \rho_L}{m_1 - m_2} \quad (2.20)$$

Avec :

ρ_L	Masse volumique du liquide (kg/m^3)
ρ_m	Masse volumique du matériau testé (kg/m^3)
m_1	Masse mesurée sur le plateau 1 (kg)
m_2	Masse mesurée sur le plateau 2 (kg)

Cette méthode présente l'avantage d'être rapide et relativement précise. Cependant, elle n'est pas normalisée.

Le choix du liquide dépend du matériau testé. En effet, pour effectuer la mesure il faut que l'échantillon testé soit plus dense que le liquide, c'est-à-dire qu'il coule complètement. Pour un plastique, la masse volumique est généralement plus faible que celle de l'eau. Il faut alors se tourner vers des liquides tels que l'éthanol (789 kg/m^3).

CHAPITRE 3 ÉLABORATION ET MESURE DES PROPRIÉTÉS MÉCANIQUES DES COMPOSITES

3.1 Méthodologie

Au regard de l'état de l'art, plusieurs points importants ressortent en ce qui a trait à la perte par transmission. Il apparaît ainsi que la paroi idéale doit avoir :

- une masse volumique ρ importante pour avoir une perte significative de la perte par transmission aux basses fréquences (cf. loi de masse § 2.1.1),
- un module d'Young E faible afin de déplacer vers les hautes fréquences le phénomène de coïncidence et donc de perte d'efficacité de la paroi (voir § 2.1.1).

Compte tenu de l'importance de ces deux paramètres, le rapport E/ρ , appelé rigidité spécifique, sera utilisé pour évaluer les performances acoustiques des composites qui seront réalisés. Idéalement, la rigidité spécifique devra être la plus faible possible.

En ce qui concerne la caractérisation des performances acoustiques des parois, elle s'effectue généralement dans des plages fréquentielles inférieures à 10 kHz. Il est donc raisonnable de fixer comme objectif que la fréquence de coïncidence soit supérieure à 10 kHz afin d'obtenir des parois aux performances comparables à celles actuellement utilisées dans la construction (e.g. béton, verre, gypse).

La revue de la littérature concernant les polyoléfinés (i.e. PP, HDPE, LDPE et LLDPE) a mis en exergue leur grande disponibilité en tant que matières recyclables et leurs performances mécaniques. Parmi ces 4 thermoplastiques, le LDPE et le LLDPE sont ceux qui ont les plus faibles modules d'élasticité (i.e. environ 400 MPa) et les plus utilisés. Ils sont donc potentiellement très avantageux pour les applications acoustiques visées. Néanmoins, leur faible masse volumique (i.e. inférieure à 1000 kg/m³) est un handicap. Ainsi, pour pouvoir utiliser ces matériaux dans la fabrication de murs coupe-sons, il faudra incorporer des charges dans la matrice LDPE ou LLDPE et donc élaborer un composite ayant:

- a) une masse volumique ρ très nettement supérieure à celle de la matrice pure; soit environ 1000 kg/m^3 et,
- b) un module d'Young E inférieur ou égal à celui de la matrice pure; soit environ 600 MPa

À première vue, il est évident que l'ajout, dans une matrice LDPE ou LLDPE de charges telles que des particules métalliques permet d'augmenter significativement la masse volumique. En revanche, en ce qui a trait à la rigidité, le résultat n'est pas aussi évident. L'augmentation du module d'Young dépend de plusieurs paramètres et certains d'entre eux peuvent être utilisés pour la limiter. Vollenberg [18] et Shao-Yun [17] ont clairement montré que l'utilisation de particules de grande taille (i.e. diamètre $>$ à $100 \mu\text{m}$) permet d'atteindre cet objectif. Ainsi, les conclusions de cette étude laissent présager que l'ajout de particules métalliques, de taille adéquate, dans une matrice LDPE ou LLDPE permettrait d'élaborer des composites avec une faible rigidité spécifique.

Ainsi dans le cadre de cette étude la matrice utilisée sera du polyéthylène basse densité linéaire (LLDPE) étant donné sa très grande disponibilité. Des billes métalliques telles que des roulements en acier seront utilisées en tant que charge du composite. Le diamètre de billes utilisées sera spécifié un peu plus loin dans ce chapitre. Ici, les billes de roulement ont été choisies pour des aspects pratiques (facile à obtenir et contrôle de la géométrie). Bien entendu, des billes ou des particules sphériques issues du recyclage de métaux pourraient éventuellement être étudiées.

3.2 Élaboration des composites

3.2.1 Géométrie des échantillons

L'élaboration de composites LLDPE/particules métalliques à différentes concentrations en charge peut être réalisée soit par extrusion ou moulage-compression :

- L'extrusion permet d'élaborer de mélanges homogènes mais nécessite l'utilisation de grandes quantités de matière. En outre, et à moins de disposer d'une filière plate en sortie d'extrudeuse, la réalisation d'éprouvettes aux dimensions adéquates pour la

caractérisation mécanique nécessitera inévitablement le passage par une étape de moulage-compression;

- Le moulage-compression implique l'utilisation de peu de matière première et permet directement l'obtention d'éprouvettes aux dimensions voulues. Toutefois, la fabrication de mélanges homogènes est généralement plus difficile.

Dans le cadre de cette étude, le moulage compression a été, dans un premier temps, privilégié pour des raisons pratiques (i.e. peu de matière première, fabrication en une seule étape des mélanges et des éprouvettes tests) et pour l'élaboration de mélanges à répartition ou distribution des billes contrôlée.

La géométrie des éprouvettes qui seront testées est imposée par les essais de traction conventionnels et de la poutre uniforme en vibration permettant la détermination du module d'Young, du coefficient de Poisson et de l'amortissement structural (cf. 2.5). Toute analyse faite (cf. annexe A), il en ressort que les éprouvettes seront de forme rectangulaire aux dimensions suivantes :

- Largeur de 25 mm
- Longueur de 200 mm
- Épaisseur de 4 mm

Suite à ces spécifications, un moule en acier rectangulaire de dimensions intérieures de $210 \times 95 \times 4$ mm a été usiné (Figure 3.1). La partie femelle contiendra le LLDPE sous forme de granules et la partie mâle servira à les comprimer lorsqu'elles seront à l'état liquide pour évacuer les bulles d'air.

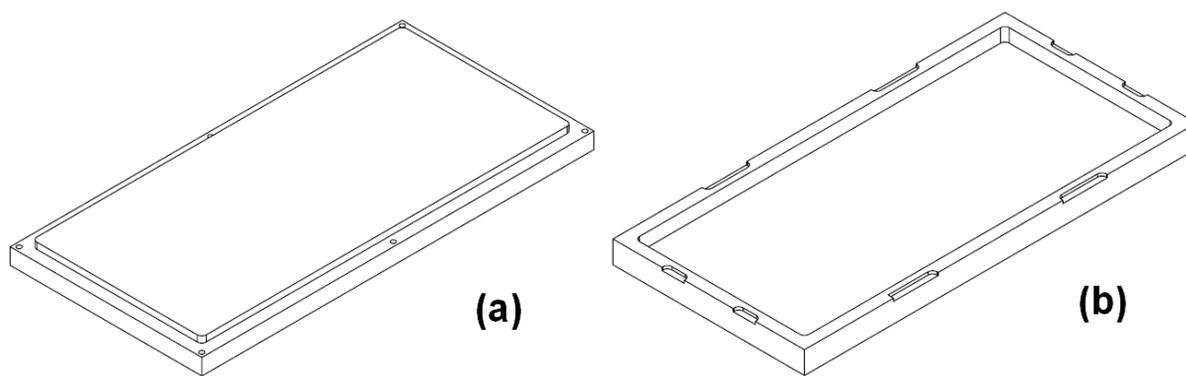


Figure 3.1 : Moule pour la fabrication des échantillons : a) partie mâle et b) partie femelle

Les dimensions des futurs échantillons étant connues, il est possible de déterminer le diamètre des billes de roulement qui seront utilisées. Après avoir observée la disponibilité de celles-ci dans le commerce, le choix s'est portée sur des billes d'acier de 3.175 mm (1/8^{ème} de pouce) de diamètre.

3.2.2 Procédure de fabrication des échantillons de LLDPE (lot N°1)

Les paramètres de fabrication à optimiser pour le moulage par compression sont :

- la température optimale de la presse, T_p ;
- le temps de maintien, t_m , des mélanges portés à la température T_p ;
- la pression de maintien P ;
- les conditions de refroidissement.

Afin de déterminer les conditions optimales de fabrication permettant l'obtention de plaques exemptes de tous défauts, des essais préliminaires ont été effectués (cf. annexe B). Le Tableau 3.1 résume les conditions de moulage optimales déterminées.

Tableau 3.1 : Conditions de fabrication avec la presse chauffante

Température de presse, T_p (°C)	260
Temps de maintien, t_m (h)	>5h
Pression de maintien, P (MPa)	28
Conditions de refroidissement	moule refroidi dans la presse

En ce qui concerne les échantillons qui seront testés, trois lots seront réalisés :

- un premier lot sera entièrement composé de LLDPE. Ce lot fixera les propriétés mécaniques de référence, c'est-à-dire celles auxquelles les autres composites seront comparées;

- Un second lot qui sera un composite LLDPE/billes d'acier. Il sera élaboré de telle manière que la masse volumique soit deux fois plus importante que celle du LLDPE seul;
- Un troisième lot qui sera également un composite LLDPE/billes d'acier. Pour celui-ci, le but sera d'atteindre la concentration maximale que permettra le procédé de fabrication.

La fabrication de la première plaque composée uniquement de LLDPE est effectuée en respectant les conditions de fabrication indiquées au Tableau 3.1. La fabrication se déroule en deux étapes :

- La première consiste à disposer le moule dans la presse qui a atteint la température T_p avec l'assemblage spécifié dans la Figure 3.2a. Il s'agit de disposer la quantité requise de LLDPE en granules dans le moule tout en disposant dans le fond et sur le dessus une feuille de téflon pour faciliter le démoulage;
- Cinq minutes après que la température soit revenue à la valeur T_p , la pression P est appliquée au moule (Figure 3.2b). Après 15 minutes, le chauffage de la presse est interrompu et le moule est laissé sous la presse jusqu'à refroidissement complet de celui-ci;

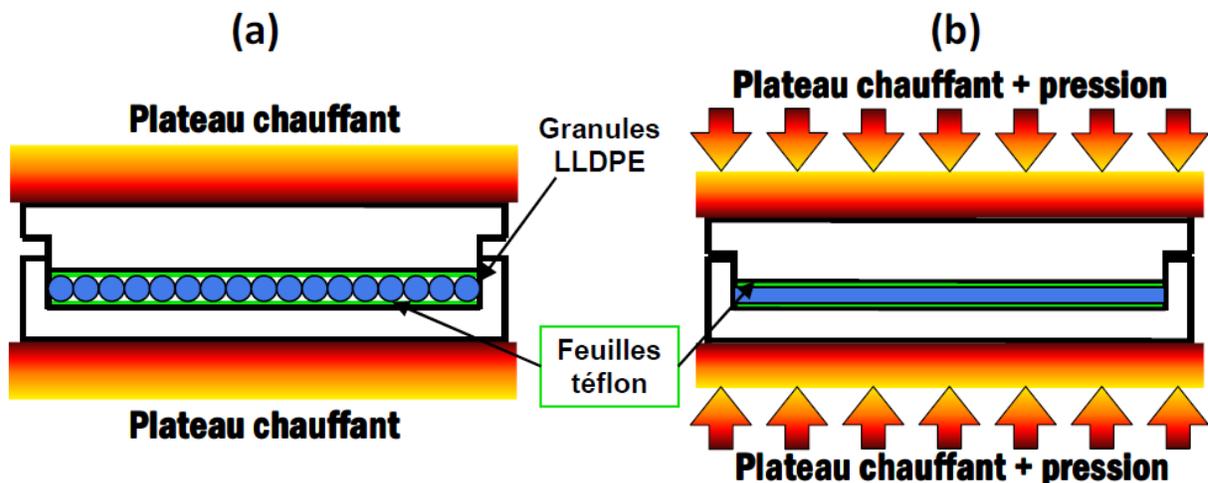


Figure 3.2 : Étapes de la fabrication de la plaque de LLDPE : a) étape 1 et b) étape 2

La plaque de LLDPE est ainsi réalisée afin d'y prélever trois poutres pour les essais de caractérisation (Figure 3.3). La découpe est réalisée avec une scie à ruban et le lissage des bords après la découpe est effectué par polissage



Figure 3.3 : Plaque de LLDPE réalisée pour les essais mécaniques

3.2.3 Procédure de fabrication des composites LLDPE/billes d'acier (lot N°2)

En ce qui concerne la fabrication du deuxième lot, le procédé de fabrication sera différent. Tout d'abord, il est prévu de disposer les billes de fer avec une distribution aléatoire. Cela peut perturber les ondes acoustiques mais en les disposant avec un espacement entre chacune d'elles inférieur à 34 mm (la plus petite longueur d'onde de la plage fréquentielle 0 – 10 kHz), il est possible de l'éviter. En effet, la longueur d'onde étant systématiquement plus grande, la répartition aléatoire des billes n'est pas perceptible par les ondes acoustiques.

Ensuite, du fait qu'il n'est pas possible d'extruder un mélange LLDPE/billes métalliques, les billes seront introduites manuellement. Cette contrainte dans la réalisation du composite conduit irrémédiablement à une modification non pas des conditions, mais plutôt des étapes du processus de fabrication.

Une première étape consiste à produire deux plaques de LLDPE de 2 mm d'épaisseur suivant le processus de fabrication qui a été utilisé pour réaliser le premier lot. Une seconde étape

consiste à disposer une des deux plaques dans la partie inférieure du moule et de placer l'ensemble sous la presse à la température à laquelle les plaques sont réalisées (T_p). Une fois que la plaque de LLDPE est fondue, les billes sont alors réparties aléatoirement sur la surface (Figure 3.4). La viscosité de la surface fait que les billes adhèrent à la plaque de LLDPE fondue. Le moule est alors sorti de la presse afin que la plaque de LLDPE puisse se solidifier tout en fixant les billes. Cette étape est indispensable pour contrôler la position des billes.

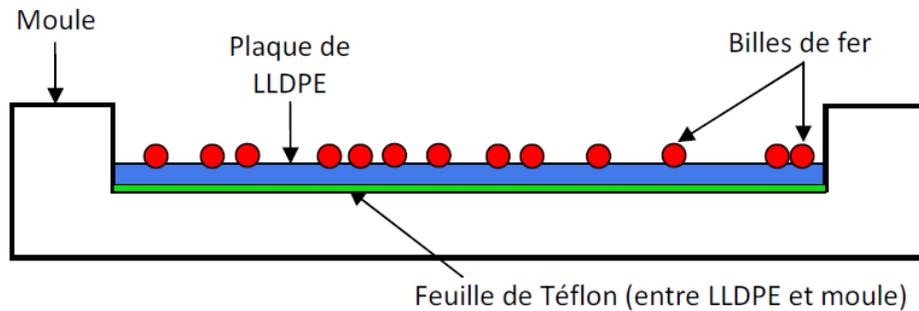


Figure 3.4 : Fixation des billes à la plaque inférieure de LLDPE

L'étape suivante consiste à venir placer la seconde plaque de LLDPE au dessus et la partie supérieure du moule. Le moule est ensuite disposé dans la presse chauffante qui à atteint la température T_p .

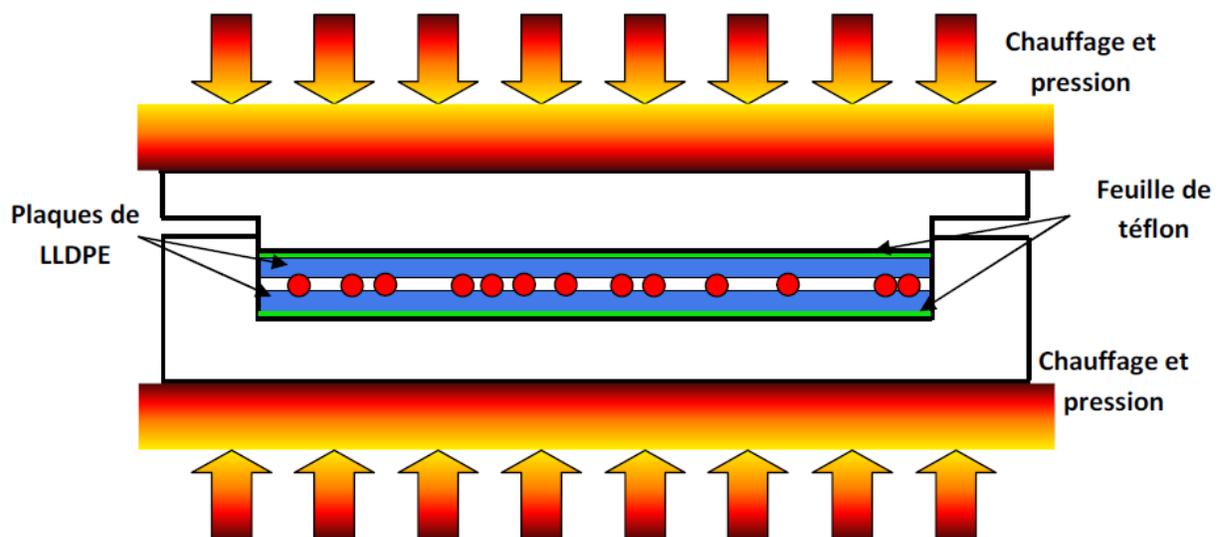


Figure 3.5 : Assemblage pour la fabrication du composite alourdi

Cinq minutes après que le moule ait atteint la température d'équilibre, le moule est comprimé (Figure 3.5) dans un premier temps avec une pression de 3.5 MPa puis celle-ci est augmentée jusqu'à 28 MPa pour que l'excédent de LLDPE puisse s'écouler du moule. Le moule est ensuite laissé sous presse jusqu'à la solidification du composite. La plaque est par la suite démoulée et trois poutres sont extraites de celle-ci (Figure 3.6).

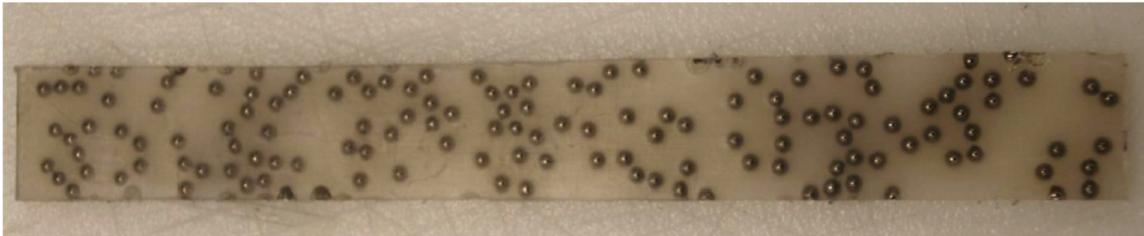


Figure 3.6 : Photo d'une éprouvette du composite LLDPE/Billes métalliques

Une fois la plaque démoulée, il a été constaté que :

- les billes ne se trouvaient pas au centre des deux plaques de LLDPE mais dans le fond de la plaque réalisée. Cela indique que la viscosité du LLDPE n'était pas suffisante pour empêcher les billes de tomber par gravité dans le fond (Figure 3.7);
- La présence de billes sur le passage de la scie lors de la découpe des échantillons a engendré des variations de la largeur sur la longueur des poutres. Chaque échantillon a dû être repris par un polissage sur les côtés pour atténuer cette variation.

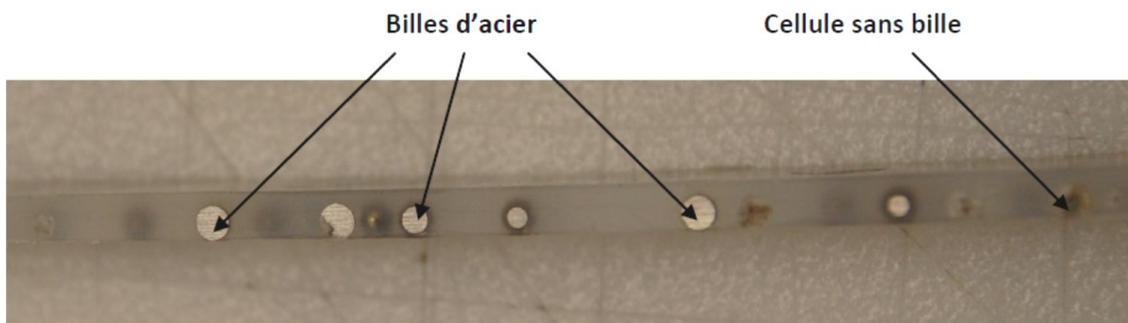


Figure 3.7 : Tranche d'une des poutres LLDPE alourdie avec des billes d'acier après polissage

3.2.4 Procédure de fabrication des composites LLDPE/billes d'acier à teneur maximale en billes (lot N°3)

Dans l'optique de réaliser un lot d'échantillon avec la concentration maximale de billes d'acier ϕ_{max} , il est utile de la déterminer théoriquement en utilisant les dimensions de chacun des constituants. Tout d'abord, considérons le cas d'un empilement compact en deux dimensions de type hexagonal (Figure 3.8).

Sur une surface rectangulaire élémentaire $S = H_1 \times H_2$, il se trouve l'équivalent de 4 sphères complètes. Le volume élémentaire associé à la surface S peut s'exprimer en fonction du diamètre d des billes en utilisant le calcul du triangle reliant le centre de trois billes voisines. De là, le volume élémentaire V_e associé à la surface S est calculé en posant que h est l'épaisseur de la plaque :

$$V_e = h(2h_1 \times 2h_2) = 2hd^2\sqrt{3} \quad (3.1)$$

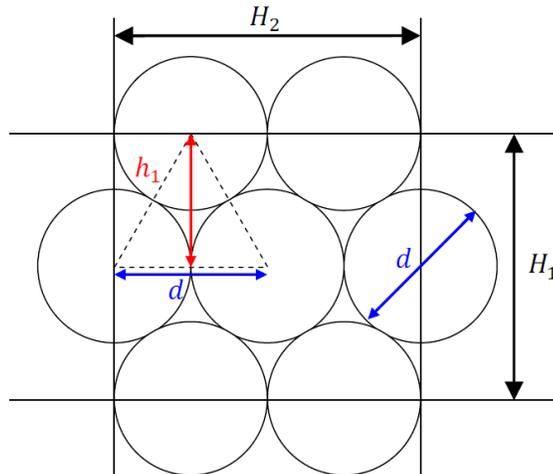


Figure 3.8 : Empilement de billes en deux dimensions de type hexagonal

L'expression de la fraction volumique maximale de billes en pourcent (pour un empilement hexagonal) est donnée par la formule suivante :

$$V_{max} = \frac{100\pi d}{3h\sqrt{3}} \quad (3.2)$$

Pour une plaque de 4 mm d'épaisseur et des billes de 3.175 mm de diamètre, la fraction volumique maximale ϕ_{max} qu'il est possible d'atteindre est de 48%.

Pour la réalisation du 3^{ème} lot d'échantillons, la même procédure que pour la fabrication du lot N° 2 est utilisée en portant un soin particulier à la disposition des billes. En effet, lors du dépôt des billes sur la plaque inférieure fondue, un patron en téflon est utilisé pour disposer les billes dans une largeur correspondant à celle des échantillons.

Tout comme la première plaque alourdie réalisée, les billes ont migré vers le fond du moule. Un autre phénomène est clairement apparu sur cette plaque : il s'agit du déplacement des billes lors de la fabrication. Plus précisément, les billes de la plaque démoulée sont moins proches les unes des autres par rapport au moment où elles ont été disposées sur la plaque inférieure. Ceci provient du procédé de fabrication.

En effet, lorsque les deux plaques de LLDPE sont comprimées, de la matière vient s'introduire entre les billes et avec les efforts dus à la pression, les billes s'écartent les unes des autres (Figure 3.9). Théoriquement, les forces autour des billes devaient s'équilibrer et les billes ne pas bouger. Cependant cela implique que les deux plaques de LLDPE soient parfaitement plates et que la pression soit exercée uniformément sur toute la surface, ce qui n'est pas le cas dans la réalité. De plus, le LLDPE excédentaire s'écoulant par les bords du moule, les forces autour des billes ne peuvent pas s'équilibrer.

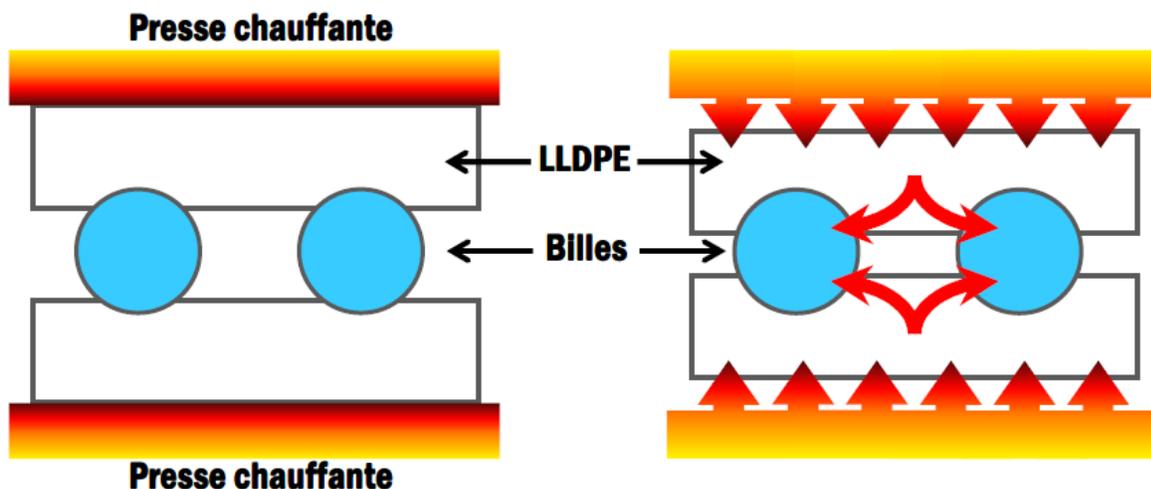


Figure 3.9 : Illustration du phénomène de migration des billes

Pour cette plaque, deux échantillons ont été produits et extraits (Figure 3.10). Malgré le fait que les billes se soient déplacées, la grande majorité d'entre elles se trouvent sur les deux poutres.

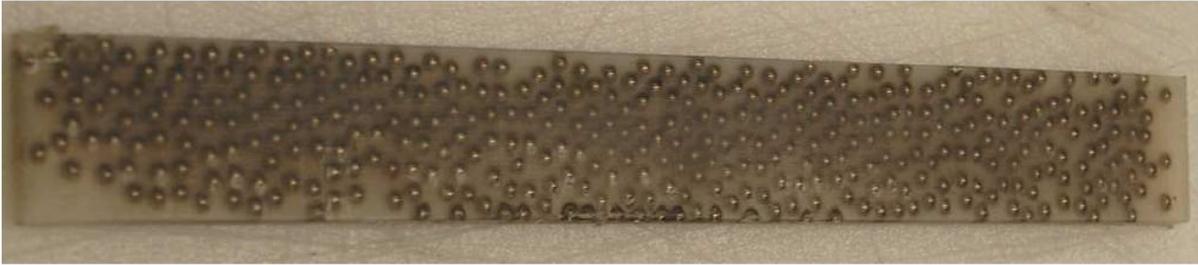


Figure 3.10 : Photo d'un des échantillons du 3^{ème} lot

3.3 Caractérisation des échantillons

3.3.1 Réalisation des essais

Les poutres ayant été extraites, il est nécessaire à présent de bien connaître leurs dimensions, en particulier les plaques alourdies par les billes d'acier. Afin de bien prendre en compte les possibles variations de dimensions, spécialement en largeur, onze points de mesures équidistants sont définis sur chacune des poutres. À chacun de ces points de mesures, la largeur et l'épaisseur sont mesurées pour obtenir par la suite les valeurs moyennes. Le tableau 3.2 résume les résultats moyens obtenus.

Il apparaît que l'épaisseur des deux poutres du troisième lot est plus importante que celle des autres. En effet, malgré le fait que le moule ait refroidi sous la presse pendant plus de 5 heures, l'excédent de LLDPE était trop important pour qu'il puisse s'échapper totalement de celui-ci. Donc pour réaliser des plaques de LLDPE avec une fraction importante de renfort à l'épaisseur du moule, il est nécessaire de réduire l'épaisseur des deux plaques de LLDPE.

Tableau 3.2 : Caractéristiques moyennes mesurées des différentes poutres

		Longueur (mm)	Largeur (mm)	Épaisseur (mm)	Masse (g)
Lot N°1	Poutre 1-1	195.0	25.36	4.08	18.9
	Poutre 1-2	195.0	25.49	4.10	19.2
	Poutre 1-3	195.0	25.50	4.08	19.1
Lot N°2	Poutre 2-1	200.5	24.96	4,07	36.8
	Poutre 2-2	200.5	24.00	4.02	36.3
	Poutre 2-3	200.0	24.66	4.08	33.8
Lot N°3	Poutre 3-1	208.5	25.09	4.82	65.0
	Poutre 3-2	201.5	25.10	4.76	64.2

En tout premier lieu, le coefficient d'amortissement η et le module d'Young E sont mesurés en appliquant la méthode de la norme ASTM E756-04 (cf. § 2.5.2). Le schéma expérimental de l'essai est donné sur la Figure 3.11.

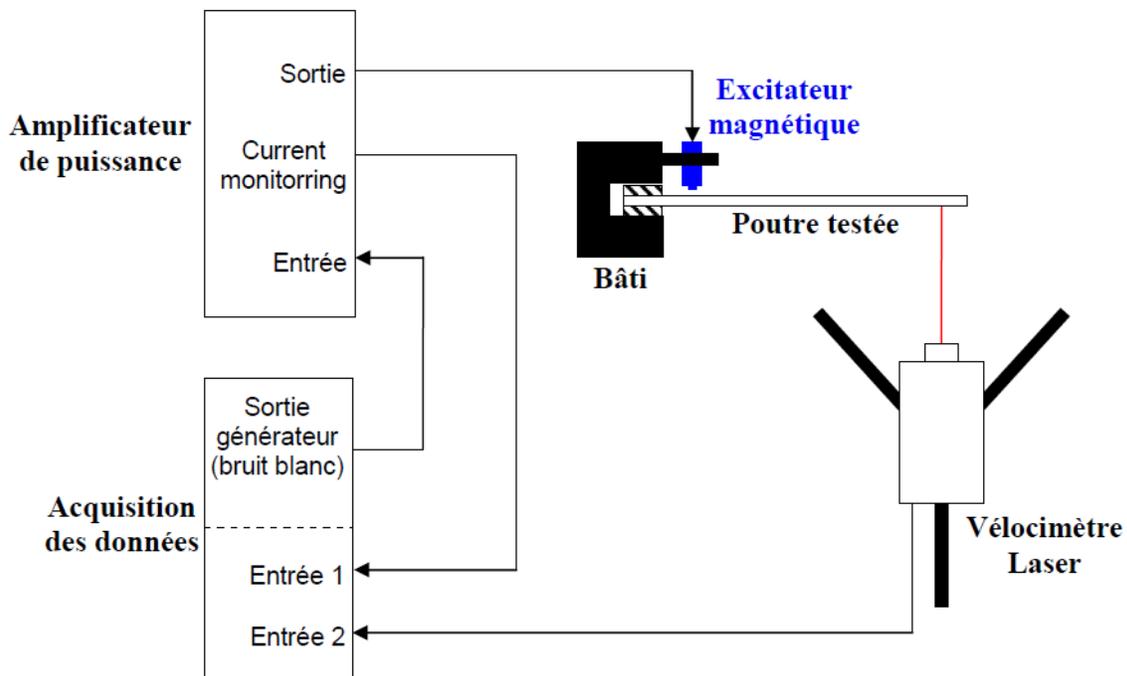


Figure 3.11 : Montage expérimental de la mesure vibratoire de la poutre uniforme

Trois mesures sont réalisées sur chacune des poutres avec à chaque fois un démontage et un remontage de l'éprouvette testée. Ceci permet d'observer l'influence du montage sur les résultats des mesures, c'est à dire la reproductibilité des résultats. Pour les lots N°2 et 3, la répartition des billes d'acier étant aléatoires, ces échantillons sont testés dans les deux sens afin de contrôler l'influence de la disposition des billes. Pour résumer, chacune des poutres du lot N°1 est testé trois fois et chacune des poutres du lot N°2 et 3 est mesurée six fois.

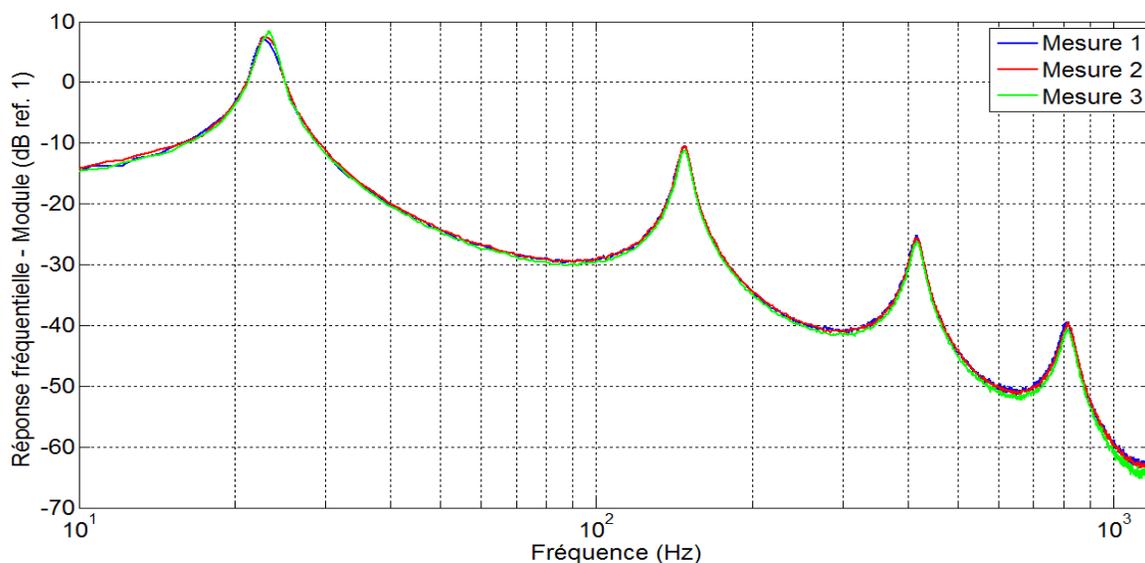


Figure 3.12 : Reproductibilité des mesures des poutres du lot N°1 (poutre 1-1)

Les mesures sont bien reproductibles pour une même poutre. L'exemple est donné avec une des poutres du lot N°1 (Figure 3.12). Le comportement est le même avec les poutres des lots 2 et 3. Par contre, en comparant les poutres du lot N°2 entre-elles, il apparaît que la poutre 2-2 présente une double résonance dans son spectre entre 600 et 700 Hz qui n'est pas due aux conditions aux limites du montage (Figure 3.13). Ce phénomène apparaît sur toutes les mesures, même lorsque la poutre est mesurée dans les deux sens. Cette fréquence est en réalité due à un effet de torsion. En effet, la poutre 2-2 a une largeur inférieure aux poutres 2-1 et 2-3. Or, sur le montage, l'excitateur magnétique est fait pour être placé au centre de la poutre si celle-ci respecte la dimension de 25 mm de largeur. La largeur de la poutre 2-2 étant inférieure d'un millimètre par rapport à cette valeur, l'excitateur magnétique n'est pas centré par rapport à l'axe de la poutre et vient générer un mouvement de torsion dans cette dernière en plus de

celui de flexion. La fréquence qui apparaît alors est une des fréquences propres en torsion de la poutre (cf annexe C).

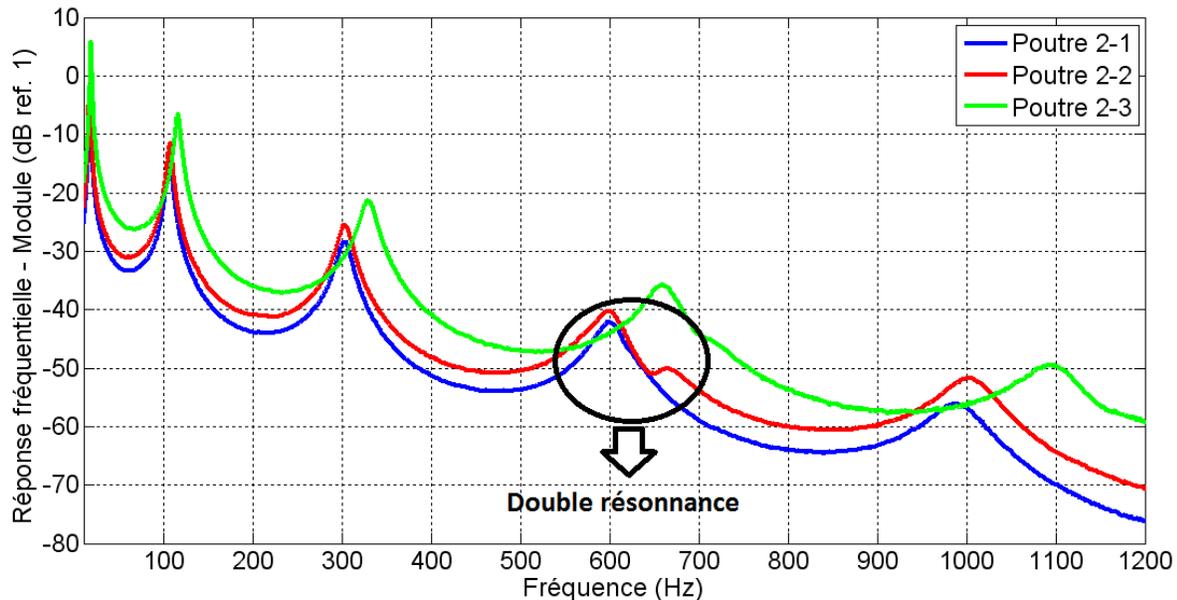


Figure 3.13 : Réponse fréquentielle des poutres du lot N°2

Suite aux essais de vibration sur les différentes poutres, des essais de traction ont été réalisés pour déterminer le coefficient de Poisson de chacune d'entre elles. Il s'est cependant avéré que cette mesure ne soit pas possible pour des raisons matérielles et de non respect de la norme de mesure. Pour cette raison, le coefficient de Poisson n'a pas été mesuré. Au lieu de cela, une valeur fixe sera utilisée pour les simulations numériques acoustiques effectuées dans le cadre de ce mémoire. Le choix de cette valeur se fera à partir des valeurs des composants du composite, à savoir l'acier et le LLDPE. Pour le LLDPE, elle oscille entre .43 et 0.448 (cf. Tableau 2.4) et pour l'acier, elle est de 0.3. Le coefficient de Poisson du composite sera entre ceux des deux matériaux qui le compose, soit entre 0.3 et 0.448. Ne pouvant le mesurer, il est préférable de choisir une valeur qui sera la plus défavorable pour la perte par transmission. En effet, il est préférable de sous-estimer la perte par transmission du composite que de la surévaluer.

Le coefficient de Poisson intervient dans l'expression de la rigidité de flexion D qui intervient elle-même dans l'équation (2.12) de la fréquence de coïncidence f_{coin} . Lorsque le coefficient

de Poisson augmente, la rigidité de flexion augmente également et la fréquence de coïncidence diminue. La valeur la plus élevée étant la plus défavorable (à savoir 0.448), elle sera choisie pour les simulations acoustiques.

Pour finir la campagne de mesures sur les échantillons, la mesure de la masse volumique a été effectuée selon la méthode décrite dans le chapitre 2.5.3. Il faut toutefois préciser que pour les mesures des poutres en LLDPE pur (lot N°1), il a été nécessaire d'utiliser de l'éthanol pour que les échantillons soient parfaitement immergés.

3.3.2 Résultats et discussion

Les résultats des mesures sont présentés au Tableau 3.3, et sont accompagnés des rigidités spécifiques normalisées par rapport à la moyenne du lot N°1. Les moyennes pour chacun des lots sont également indiquées.

Tableau 3.3 : Résultats des mesures sur les différents lots de composites LLDPE/billes d'acier

	Fraction Volumique ϕ (%)	Module d'Young E (MPa)	Amortissement structural η	Masse volumique (kg/m³)	Rigidité spécifique normalisé E/ρ
Poutre 1-1	0	702	0.054	922.4	1
Poutre 1-2	0	692	0.051	922.1	1
Poutre 1-3	0	683	0.056	921.5	1
Moyenne Lot N°1	0	693	0.054	922	1
Poutre 2-1	13.2	857	0.054	1821	0.626
Poutre 2-2	14.1	878	0.054	1884	0.618
Poutre 2-3	10.9	847	0.055	1678	0.671
Moyenne Lot N°2	12.7	861	0.054	1792	0.638
Poutre 3-1	24.0	1029	0.053	2561	0.534
Poutre 3-2	23.7	971	0.056	2544	0.507
Moyenne Lot N°3	23.8	1000	0.055	2553	0.521

La toute première remarque qui peut être faite concerne le module d'Young des poutres du lot N°1. Les valeurs mesurées excèdent celles données dans le Tableau 2.4. Ceci peut s'expliquer par le fait que le refroidissement très lent utilisé favorise la cristallinité et permet une réorganisation de la phase amorphe ce qui conduit à une augmentation de la masse volumique et de la rigidité du matériau [36 -[38]. Toutefois, l'augmentation du module d'Young reste assez faible par rapport au constat de ces études et aux calculs prédictifs de l'annexe A. L'observation de l'augmentation de la masse volumique du LLDPE confirme cela. En effet, les échantillons de LLDPE pur ont une masse volumique de 924 kg/m^3 tandis que celle des granules est de 922 kg/m^3 . D'après la courbe établie par Crist et al. (Figure 3.14), une augmentation de 2 kg/m^3 correspondrait approximativement à une augmentation de 13% du taux de cristallinité [38]. Le procédé de fabrication n'augmente alors que faiblement le taux de cristallinité du LLDPE.

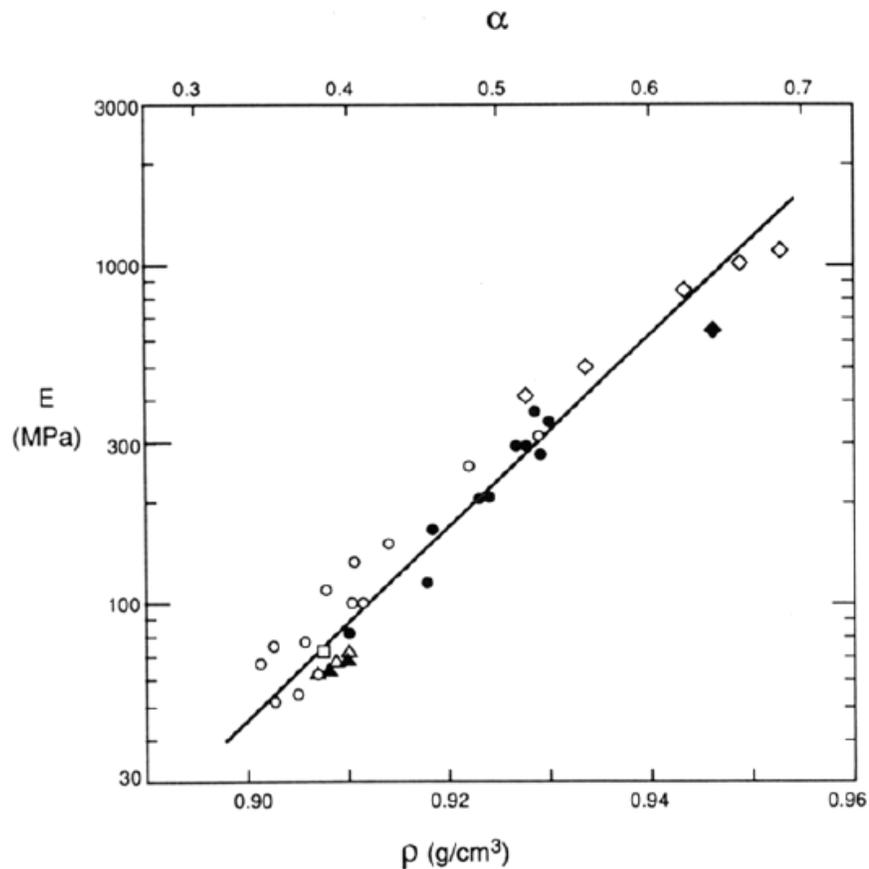


Figure 3.14 : Dépendance du module d'Young E avec le taux de cristallinité et la masse volumique du \diamond polyéthylène, \circ HPB linéaire, Δ 3S HPB, \square 4S HPB (symbole plein concerne les échantillons polydispersés) [38]

En ce qui concerne les poutres du lot N°2, l'ajout des billes a quasiment doublé la masse volumique. Tel que prévu, le module d'Young augmente avec l'accroissement de la fraction volumique de billes. Par rapport au LLDPE, le module d'Young a augmenté de 24.1% pour une augmentation moyenne de la masse volumique de 94%. Cela donne un rapport E/ρ de 0.625 contre 1 pour le LLDPE pur.

Pour les poutres du lot N°3, la fraction volumique de billes atteinte est de 24.7% pour une masse volumique moyenne de 2553 kg/m^3 . Là encore, le module d'Young augmente pour dépasser le gigapascal. Par rapport au LLDPE, le module d'Young a augmenté de 44.3% et la masse volumique de 176.9%. Ceci donne un rapport E/ρ plus faible que pour le lot N°2 (0.521 contre 0.625). Donc l'augmentation de la fraction volumique a un effet plus important sur la masse volumique que le module d'Young.

Au regard des résultats, on constate que la rigidité spécifique diminue avec l'incorporation de billes. Cette diminution est essentiellement attribuable à une augmentation significative de la masse volumique. Toutefois l'accroissement du module d'Young a limité la diminution du rapport E/ρ . Cette augmentation de rigidité est attribuable à la cohésion interfaciale matrice/billes.

Donc, la question qui se pose présentement est la suivante : peut-on expérimentalement diminuer la rigidité du composite ? Dans un premier temps, il apparaît utile de pouvoir prévoir l'augmentation du module d'Young avec la fraction de billes d'acier. C'est le sujet qui sera abordé dans la section suivante. Par la suite, il sera exposé une méthode qui aura pour but de réduire le module d'Young des composites LLDPE/billes d'acier.

3.3.3 Modèles de prédiction du module d'Young

Cette partie a pour but de comparer les différents modèles de prédictions du module d'Young pour le mélanges de polymères avec des charges de type particules. Seuls les modèles de prédiction considérant deux phases et des renforts de type particules seront évoqués dans cette section.

Un des modèles les plus utilisés pour rendre compte l'effet d'un renfort de type particule dans une matrice est le modèle d'Einstein. Il repose sur la théorie des particules rigides dans une matrice non-rigide (visqueuse) et considère une adhésion parfaite entre la matrice et la particule [39].

$$E_c = E_m(1 + K_e\phi) \quad (3.3)$$

avec :

E_c , Module d'Young du composite (GPa);

E_m : Module d'Young de la matrice (GPa);

ϕ : Fraction volumique de particules dans la matrice (%);

K_e : Coefficient relatif à la forme des particules (2.5 pour une particule sphérique).

Kerner [40] a également proposé un modèle prédisant le module d'Young pour un composite constitué de particules sphériques présentant une adhésion parfaite avec une matrice expansible.

$$E_c = E_m \left(1 + \frac{\phi}{\phi_m} \frac{15(1 - \nu_m)}{8 - 10\nu_m} \right) \quad (3.4)$$

avec :

ν_m : Coefficient de Poisson de la matrice;

ϕ_m : Fraction volumique de la matrice (%).

Thomas [41] a proposé une amélioration de modèle empirique établi par Guth & Smallwood [42 - 43] qui lui-même est basé en partie sur le modèle d'Einstein.

$$E_c = E_m(1 + K_e\phi + \beta\phi^2 + a \times \exp(b\phi)) \quad (3.5)$$

avec $a = 0.00273$, $b = 16.6$ et $\beta = 10.05$.

Le modèle de Lewis et Nielsen [44 - 45] est supposé prédire le comportement d'un polymère chargé avec des particules de formes quelconques :

$$E_c = E_m \left(\frac{1 + AB\phi}{1 - B\psi\phi} \right) \quad (3.6)$$

avec :

$$A = K_e - 1; \quad B = \frac{f - 1}{f + A}; \quad f = \frac{E_p}{E_m}; \quad \psi = 1 + \phi \left(\frac{1 - \phi_{max}}{\phi_{max}^2} \right);$$

avec E_p le module d'Young du renfort (GPa). Cette expression se base sur deux paramètres qui sont ϕ_{max} et K_e . Ce dernier est souvent utilisé comme étant la constante d'Einstein qui varie suivant la forme de la particule (2.5 pour une sphère). En ce qui concerne ϕ_{max} , il s'agit de la fraction volumique maximale soit dans notre cas, 48%.

Le modèle de Hashin et Shtrikman [46] a été établi pour un composite à inclusions sphériques noyées dans une matrice également sphérique. Il est très utilisé dans le domaine des bétons. Il est valide pour toutes les fractions volumiques et des rapports de rigidité E_p/E_m élevés. Ce modèle définit une plage de valeurs dans laquelle le module d'Young du composite sera comprise pour une fraction volumique donnée. Dans notre cas, seule la limite basse sera considérée. Elle est donnée par les relations suivantes :

$$E_c^- = \frac{9K^-G^-}{3K^- + G^-}; \quad E_c^+ = \frac{9K^+G^+}{3K^+ + G^+} \quad (3.7)$$

avec :

$$K^- = K_m + \frac{\phi}{\frac{1}{K_p - K_m} + \frac{3\phi_m}{3K_m + 4G_m}}; \quad K^+ = K_p + \frac{\phi_m}{\frac{1}{K_m - K_p} + \frac{3\phi}{3K_p + 4G_p}}$$

$$G^- = G_m + \frac{\phi}{\frac{1}{G_p - G_m} + \frac{6\phi_m(K_m + 2G_m)}{5G_m(3K_m + 4G_m)}}; \quad G^+ = G_p + \frac{\phi_m}{\frac{1}{G_m - G_p} + \frac{6\phi_p(K_p + 2G_p)}{5G_p(3K_p + 4G_p)}}$$

K : Module de compressibilité (GPa);

G : Module de cisaillement (GPa);

+, - : Signe pour respectivement la limite haute et basse du modèle.

Le dernier modèle présenté a été établi par Sato et Furukawa [47] pour prédire le module d'élasticité d'élastomères chargés de particules rigides et sphériques dispersées uniformément. Ce modèle analytique a l'avantage de tenir compte de l'adhésion entre la matrice et la charge

par un paramètre χ . Il considère la déformation de la matrice menant à la formation d'une cavité elliptique autour du renfort.

$$E_c = E_m \left\{ \left(1 + \frac{1}{2} \frac{\gamma^2}{1-\gamma} \right) \left(1 - \frac{\gamma^3 \chi}{3} \left(\frac{1+\gamma-\gamma^2}{1-\gamma+\gamma^2} \right) \right) - \frac{\gamma^2 \chi}{3(1-\gamma)} \left(\frac{1+\gamma-\gamma^2}{1-\gamma+\gamma^2} \right) \right\} \quad (3.8)$$

avec $\gamma = \phi^{1/3}$. Le terme d'adhésion χ varie entre 0 et 1 (0 pour adhésion parfaite et 1 pour absence d'adhésion).

La figure 3.16 présente les résultats obtenus en utilisant les différents modèles décrits précédemment pour une fraction volumique variant de 0 à 30% et une matrice de LLDPE. Les résultats obtenus sont présentés en utilisant la rigidité spécifique E/ρ et sont comparés aux résultats expérimentaux (lots N°2 et 3). Pour le calcul de la masse volumique, la loi des mélange est utilisée :

$$\rho_c = (\phi \times \rho_p) + ((1 - \phi) \times \rho_m) \quad (3.9)$$

avec respectivement ρ_p et ρ_m la densité du renfort et de la matrice (kg/m^3).

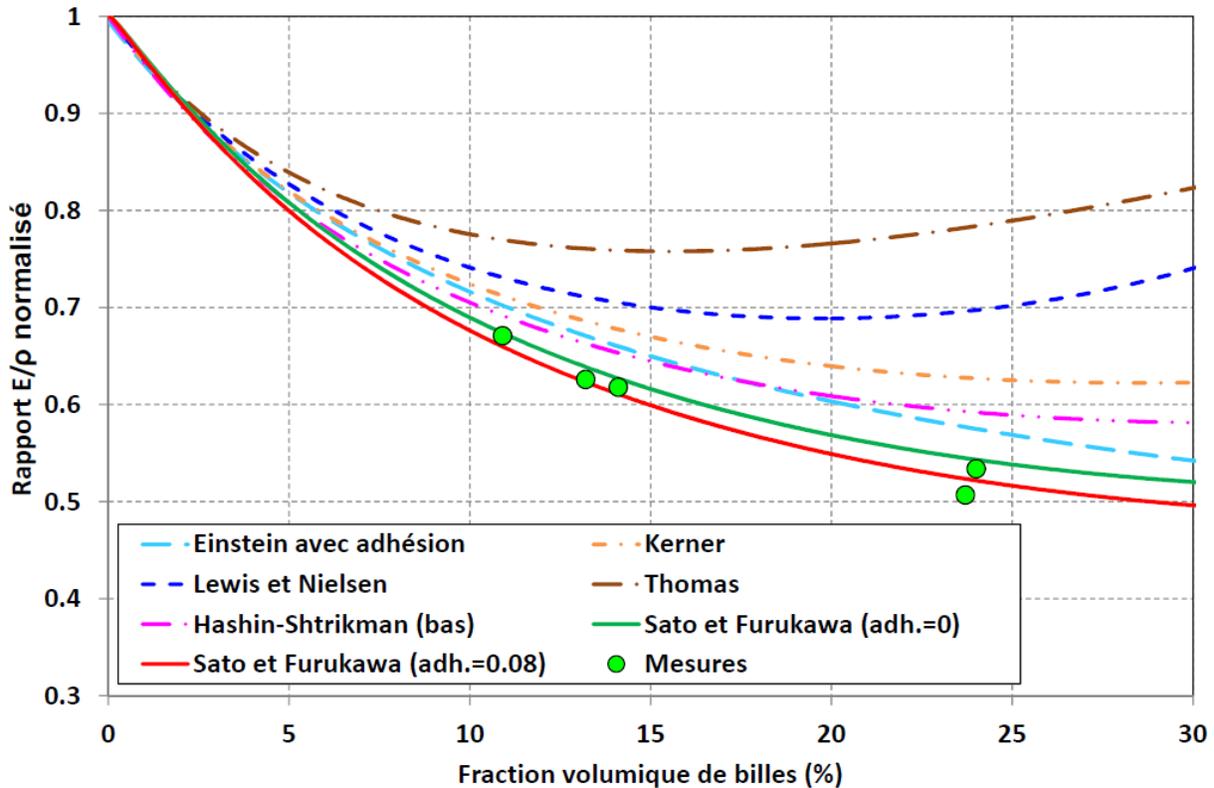


Figure 3.15 : Module d'Young des modèles analytiques comparées aux mesures effectuées

Il apparaît que la plupart des modèles décrits précédemment (i.e. Einstein, Kerner, Thomas, Lewis-Nielsen, Hashin-Shtrikman) donnent des modules d'élasticités supérieurs aux composites réalisés. Cependant, pour une adhésion parfaite, le modèle de Sato et Furukawa présente une courbe légèrement supérieure mais très proches des données expérimentales. En ajustant le facteur d'adhésion χ à 0.08, le modèle rend compte plus fidèlement du comportement des composites produits.

Le chapitre 3.3.2 a montré que l'ajout des billes d'acier dans la matrice de LLDPE augmente le module d'Young des composites fabriqués. Le chapitre 3.3.3 a comparé les mesures à différents modèles analytiques de prédiction du module d'Young. Il s'avère que le modèle de Sato et Furukawa avec un facteur d'adhésion de 0.08 (0 étant l'adhésion parfaite et 1 la non adhésion) se rapproche fortement des résultats expérimentaux. Il apparaît toutefois que les valeurs expérimentales sont toutes en dessous de celles issues des modèles. En ajoutant à cela qu'un facteur d'adhésion de 0.08 ne représente pas scrupuleusement une adhésion totale, on est en droit de se poser la question si l'adhésion entre la bille et la matrice est si parfaite qu'il n'y parait. Afin de vérifier cela, une observation au microscope électronique à balayage a été réalisée sur une partie de la poutre 3-1 (Figure 3.16).

Il apparaît qu'il y a des espaces entre la bille et la matrice dans certains endroits. Ceci confirme que l'adhésion entre le LLDPE et les bille d'acier n'est pas parfaite mais partielle. Cette observation confirme que le choix d'une bille sphérique de grande dimension limite bien l'augmentation du module d'Young. Cependant, il sera encore plus profitable pour le projet d'accroître la non-adhérence entre la matrice et la bille.

Dans la section suivante, on s'attarde à présenter une méthode expérimentale permettant de diminuer le module en modifiant la microstructure du composite et la cohésion interfaciale LLDPE/billes.

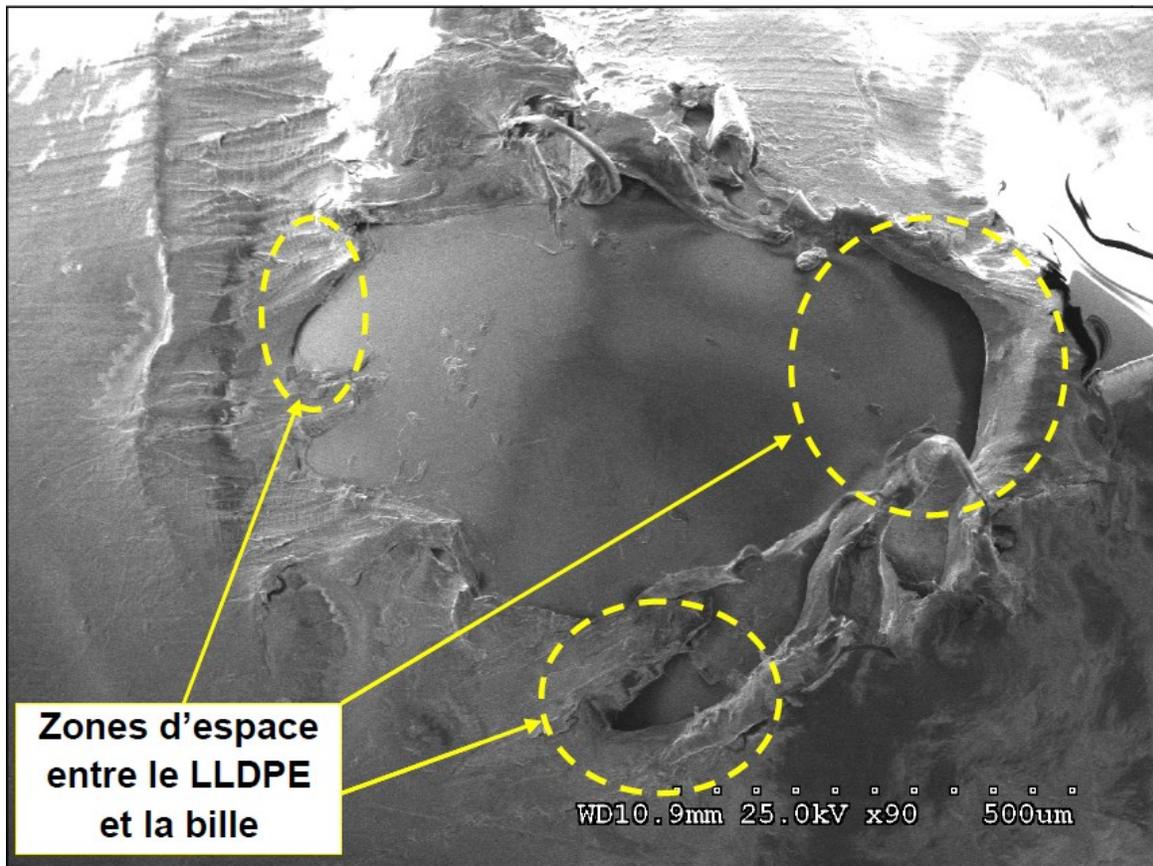


Figure 3.16 : Observation au microscope électronique à balayage de la liaison bille/LLDPE sans cavitation

3.4 Modification microstructurale : diminution du rapport E/ρ

3.4.1 Procédure

Les résultats expérimentaux et de simulation ont clairement montré qu'une certaine cohésion existe entre la matrice LLDPE et les billes. Une manière de diminuer la rigidité du composite est de créer des décohésions à l'interface matrice/billes [48 - 51]. Pour ce faire, les éprouvettes de composites ont subi des sollicitations uniaxiales dans le but de rompre l'adhésion interfaciale et de créer des cavités dans lesquelles les billes se trouvent piégées et libres de se mouvoir (figure 3.17).

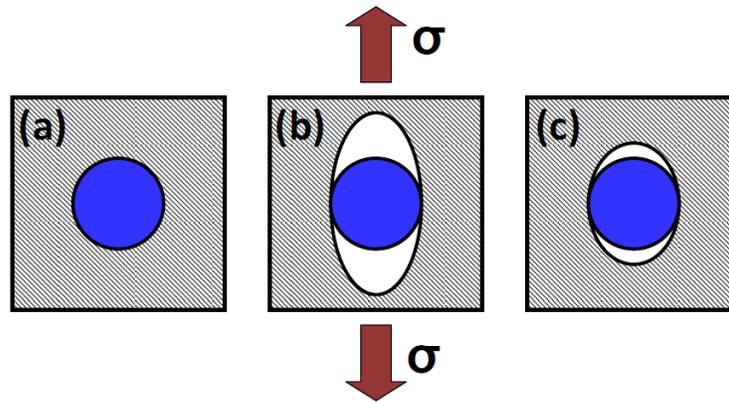


Figure 3.17 : Schéma de la modification microstructurale induite mécaniquement afin de créer une décohésion : a) composite au repos, b) composite soumis à une contrainte uniaxiale, c) cavitation permanente créée autour du renfort

3.4.2 Réalisation de la cavitation et observations

La toute première poutre à être soumise à l'essai de traction en vue de la cavitation est la poutre 2-1 (lot N°2). Afin d'éviter de briser la poutre, l'allongement de cette poutre s'est fait progressivement en quatre fois :

- Un premier essai avec un allongement imposé de 7 mm;
- Un second essai avec un allongement imposé de 10 mm;
- Un troisième essai avec un allongement imposé de 14 mm;
- Un quatrième essai avec un allongement imposé de 30 mm.

Au terme de ces essais, la poutre a présenté une déformation permanente de 6 mm soit 4% de la portion soumise aux essais de traction. Visuellement, la poutre présente un aspect différent par rapport à celui qu'elle pouvait avoir avant les essais de traction. La Figure 3.18 montre une section de la poutre 1 avant l'essai de traction et une autre section de la même poutre après traction.

Il est à noter qu'il n'a pas été possible d'allonger au-delà de 30 mm les poutres car de la striction apparaissait dans des zones où les billes sont plus proches les unes des autres (Figure 3.19).

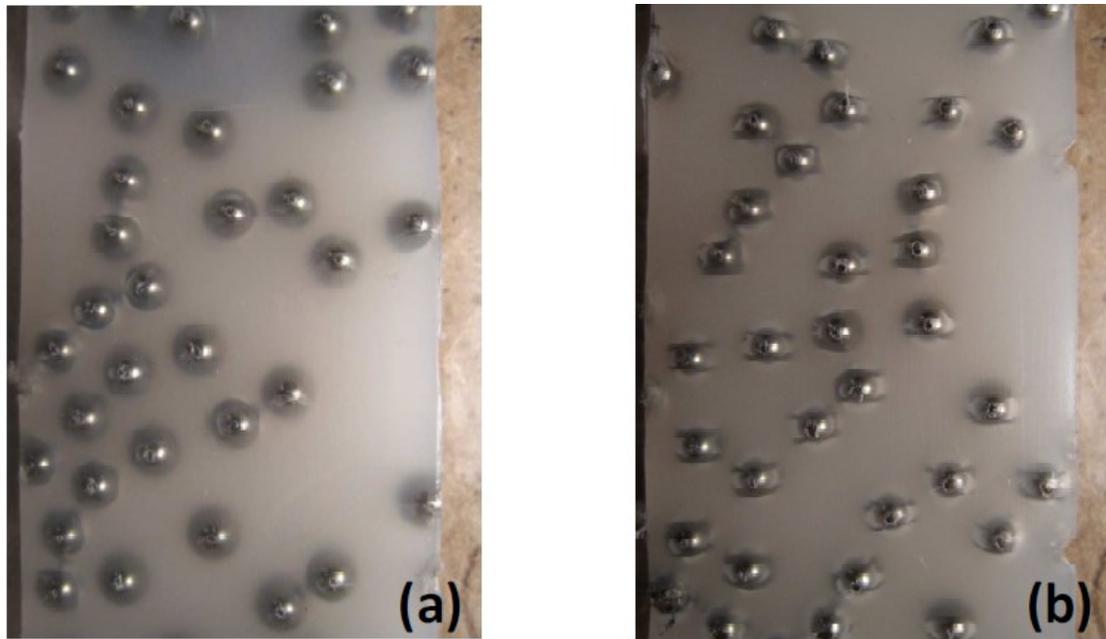


Figure 3.18 : Photos de la poutre 2-1 a) avant déformation et b) après déformation

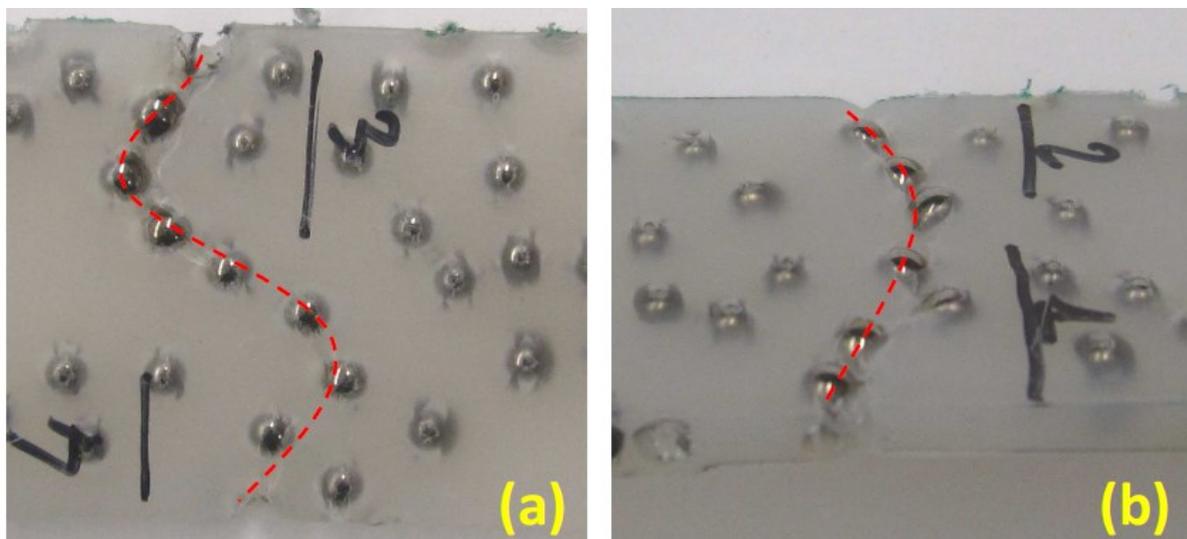


Figure 3.19 : Section de la poutre 2-1 sur laquelle se sont produites des strictions (zone de striction en pointillés rouges)

Le Tableau 3.4 expose les résultats des essais de traction sur les autres poutres en précisant pour chaque essai la déformation imposée à la poutre et la déformation plastique permanente

relative à l'essai (dimension initiale comme référence). Ces résultats incluent ceux de la poutre 2-1.

Tableau 3.4 : Tableau récapitulatif des déformations imposées aux poutres

Poutre	N° de l'essai	Déformation imposée lors de l'essai de traction (%)	Déformation permanent cumulée (%)
Poutre 2-1	1	4.7	0.3
	2	6.6	1
	3	9.2	1.3
	4	19.7	4
Poutre 2-2	1	15.3	2
Poutre 2-3	1	13.3	1.3
Poutre 3-1	1	13.2	1.8
	2	19.5	2.3
Poutre 3-2	1	24.5	3

Des phénomènes intéressants sont ressortis de ces essais de traction. Tout d'abord, il a été plus facile d'aller loin en termes d'allongement avec les poutres du lot N°3 qu'avec celles du lot N°2. En effet, durant les essais de traction des poutres du lot N°2, il est apparu assez rapidement des zones où les contraintes étaient plus importantes qu'ailleurs. Ceci s'est traduit dans les zones concernées par l'apparition de striction. En y regardant de plus près, il y a eu également fissuration de la matrice au niveau des billes.

Les zones où se sont produites les strictions présentent deux facteurs communs qui ont favorisé la concentration des contraintes :

- Une cellule (avec ou sans bille) qui se trouve être coupée par le bord de la poutre;
- Une série de billes proches les unes des autres.

Les Figure 3.20 et Figure 3.21 illustrent ce phénomène; les zones contenues dans les cadres en pointillé cumulent ces deux conditions. Il s'en est suivi une fissuration de la surface de la matrice thermoplastique lors de l'opération de traction.

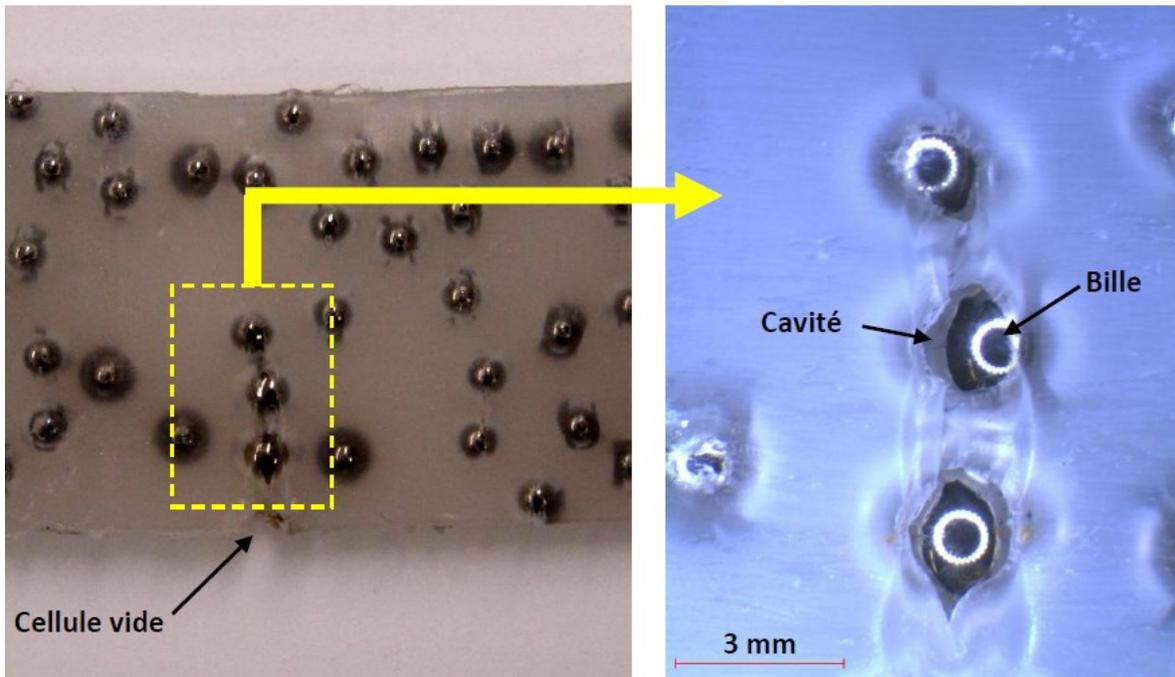


Figure 3.20 : Exemple de rupture de la matrice sur la poutre 2-2

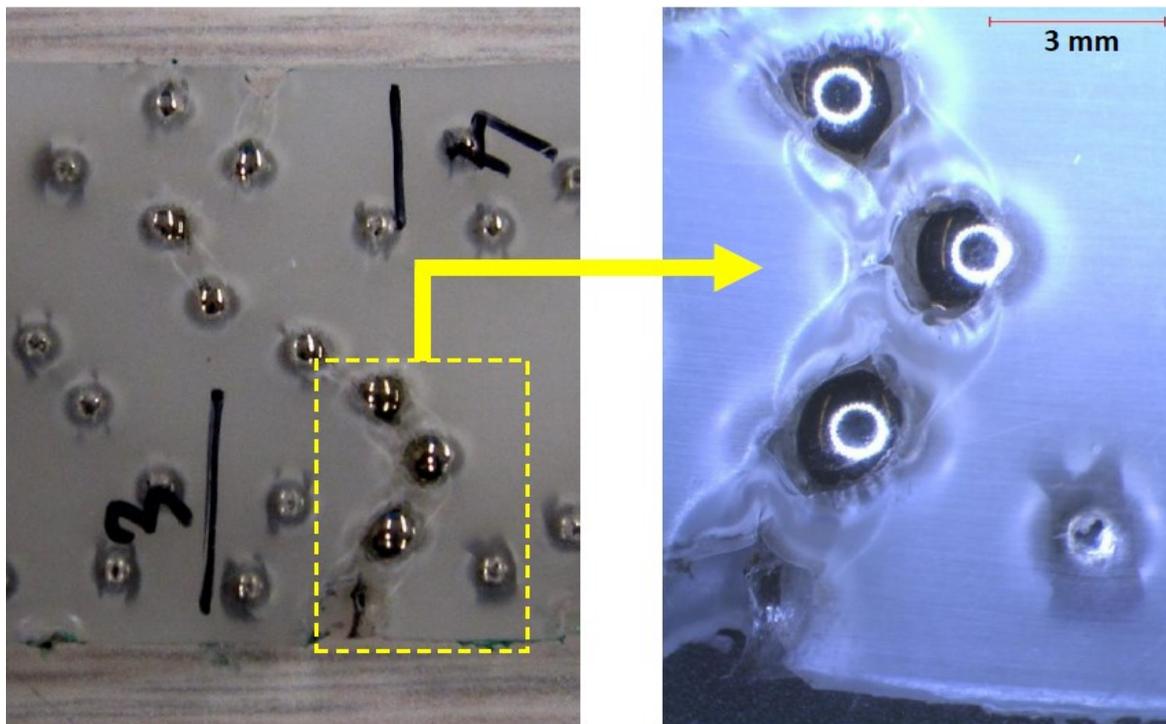


Figure 3.21 : Exemple de fissuration de la matrice sur la poutre 2-1

En revanche, cela n'a pas été le cas avec les poutres du lot N°3. Ceci s'explique par la fraction volumique élevée. En effet, elle impose que les billes sont très proches les unes des autres et donc quasiment équidistantes les unes par rapport aux autres. À l'inverse des poutres du lot N°2, il n'y a pas de zone privilégiée pour la concentration des contraintes et les efforts sont répartis équitablement dans le matériau.

Là où il ne s'est pas produit de striction et de déchirure de la matrice, il est possible d'observer au voisinage des billes des zones blanchâtres dues à la cavitation. Il est également possible d'observer qu'au niveau de la bille, il y a eu une déformation un peu plus importante de la matrice (Figure 3.22 et Figure 3.23). Cela est dû au fait que l'épaisseur de LLDPE est plus fine qu'ailleurs à cet endroit précis.

Il est possible d'observer la déformation plastique de la cellule entourant la bille sur la Figure 3.24. Il s'agit d'une bille présente sur un bord de la poutre 3-2. On y voit clairement sur la droite de la bille une zone d'ombre correspondant à la cellule. D'après les mesures du diamètre de la bille et de la longueur de la cellule, elle s'est déformée d'environ 5%.

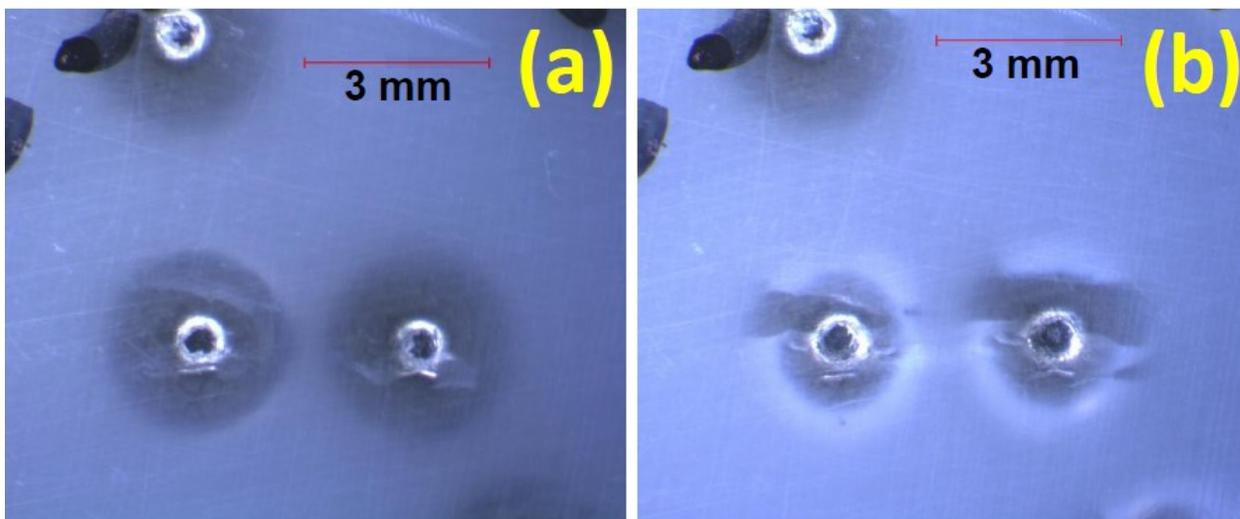


Figure 3.22 : Observation de cavitation sur la poutre 2-2 : a) avant traction et b) après traction

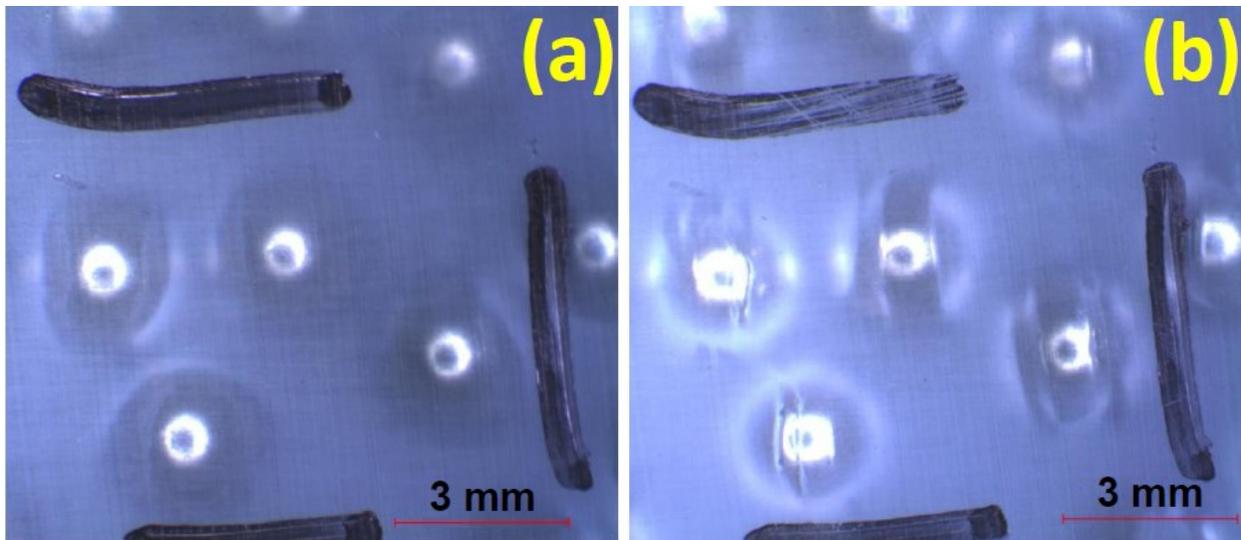


Figure 3.23 : Observation de cavitation sur la poutre 3-2 : a) avant traction et b) après traction

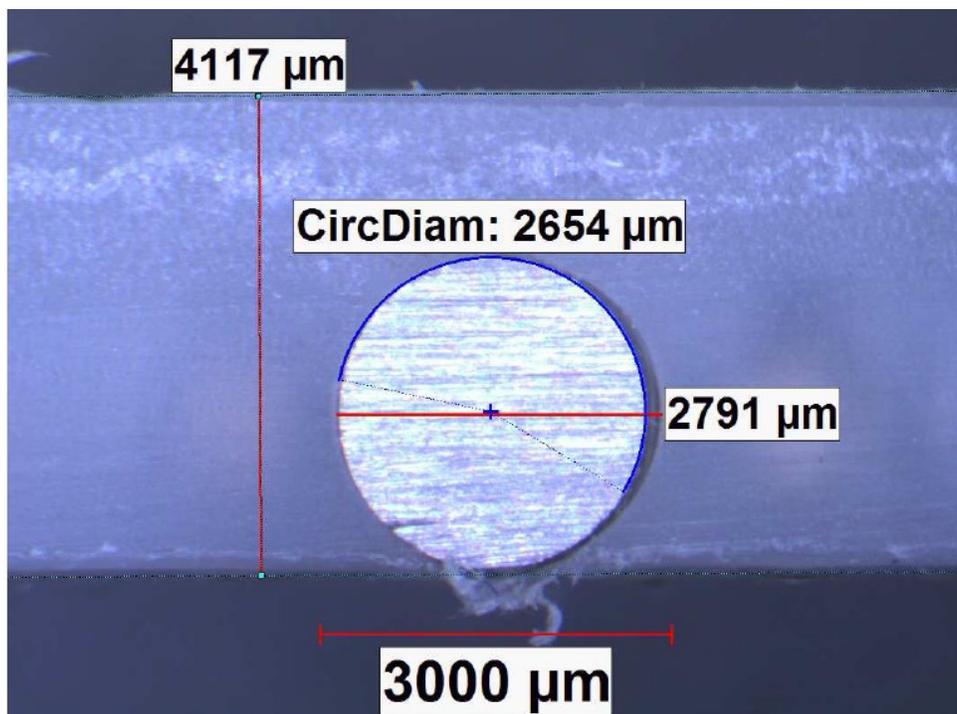


Figure 3.24 : Observation de la cavitation au microscope optique sur la tranche d'une poutre

3.4.3 Essais mécaniques après cavitations et résultats

Suite aux déformations plastiques imposées, les dimensions des poutres ont été modifiées. Elles ont donc été remesurées avant la campagne d'essais. Le Tableau 3.5 détaille les dimensions mesurées pour chacune des poutres des lots N°2 et 3.

En comparaison des dimensions avant la traction (Tableau 3.2), il y a une légère diminution de la largeur et de la longueur. Cependant, certaines poutres montrent une diminution de la masse. Celle-ci s'explique par le fait qu'initialement, les poutres avaient sur les bords des cellules coupées avec des billes. Lors de l'essai de traction, les cavités se sont agrandies et certaines billes se sont alors délogées de celles-ci. Il en résultera nécessairement une diminution de la masse volumique des échantillons.

Tableau 3.5 : Caractéristiques moyennes mesurées des poutres du lot N°2 et 3 après cavitation

		Longueur (mm)	Largeur (mm)	Épaisseur (mm)	Masse (g)
Lot N°2	Poutre 2-1	206.5	24.84	4.07	36.2
	Poutre 2-2	203.5	23.92	4.01	36.3
	Poutre 2-3	202	24.71	4.08	33.8
Lot N°3	Poutre 3-1	212	24.98	4.82	64.8
	Poutre 3-2	206	25.06	4.75	64.1

La Figure 3.25 montre la réponse fréquentielle en fonction de la fréquence pour les poutres des lots 2 et 3 respectivement. Les tests ont été effectués tel que décrit au chapitre 3.3.1.

Les mesures sont relativement homogènes pour une même poutre testée dans les deux sens. Cependant entre elles, il y a des différences dans le comportement de la réponse fréquentielle. Les poutres du lot N°2 ont des réponses très différentes entre-elles alors que celles du lot N°3 sont relativement proches. Ceci provient du fait que les poutres du lot N°2 présentent de nombreuses strictions créant des inhomogénéités dans la rigidité des poutres. C'est principalement la poutre 2-1 qui a été touchée par ce phénomène, ce qui crée également à partir de 850 Hz une zone où le spectre est incohérent avec une poutre homogène.

En ce qui concerne les poutres du lot N°3, elles ont présenté un allongement inférieur à celui du lot N°2 en raison du fait qu'il ne s'est pas produit de striction. En effet, les poutres du lot N°3 comportent tellement de billes qu'elles sont presque à la même distance les unes des autres. Les efforts à l'intérieur du matériau se répartissent uniformément, ce qui réduit la possibilité d'apparition de zones de faiblesses.

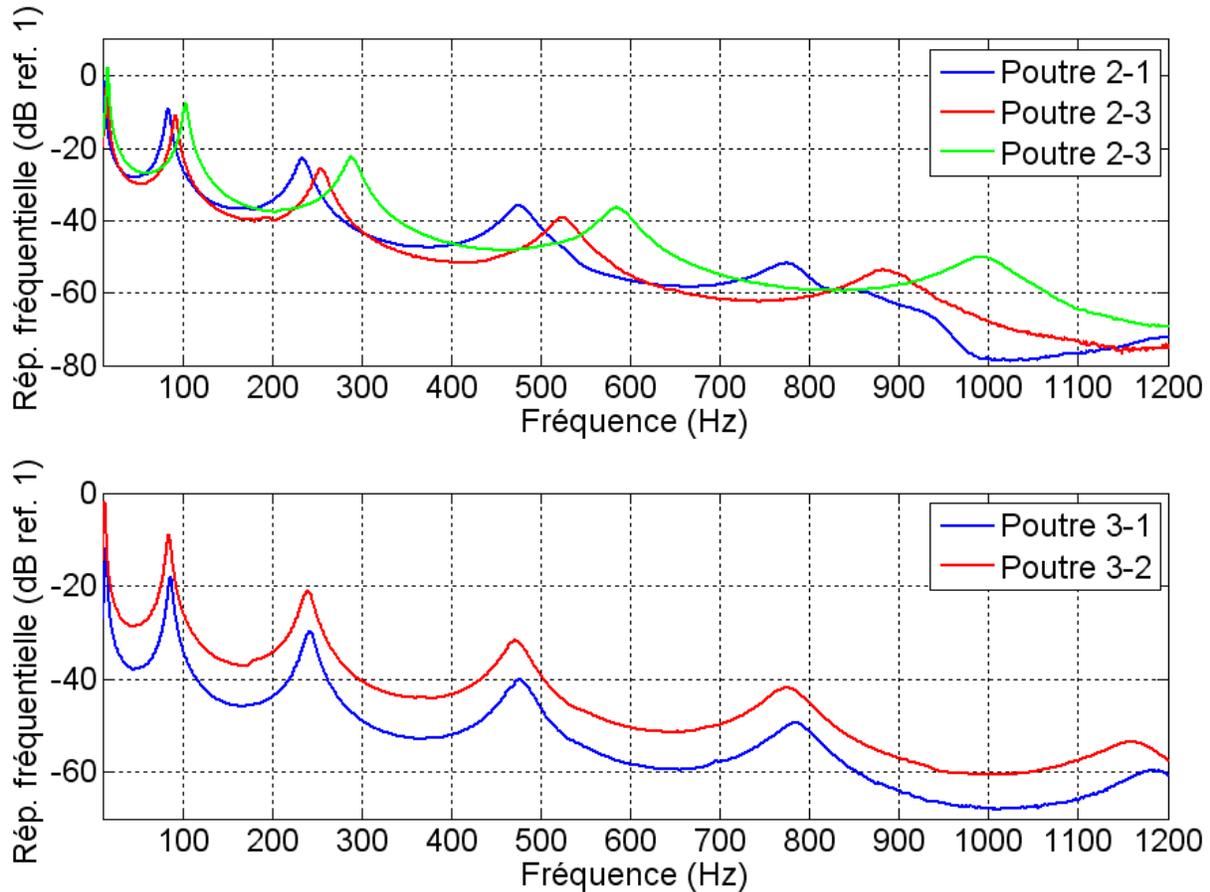


Figure 3.25 : Réponse fréquentielle des poutres des lots N°2 et 3 après la création de cavitation

À présent, les réponses fréquentielles sont comparées pour une même poutre avant et après cavitation. Il apparaît un décalage fréquentiel des modes de résonances des poutres (Figure 3.26). Ce décalage vers les basses fréquences des résonances laisse présager une baisse du module d'Young. En effet, d'après la formule permettant de calculer la position des fréquences de résonance (cf. Annexe A, formule A-6), le module d'Young est la seule grandeur qui peut significativement faire baisser cette valeur.

Le Tableau 3.6 récapitule les résultats en termes de module, d'amortissement structural, de masse volumique et de rigidité spécifique obtenus après déformation pour les poutres des lots 2 et 3 respectivement.

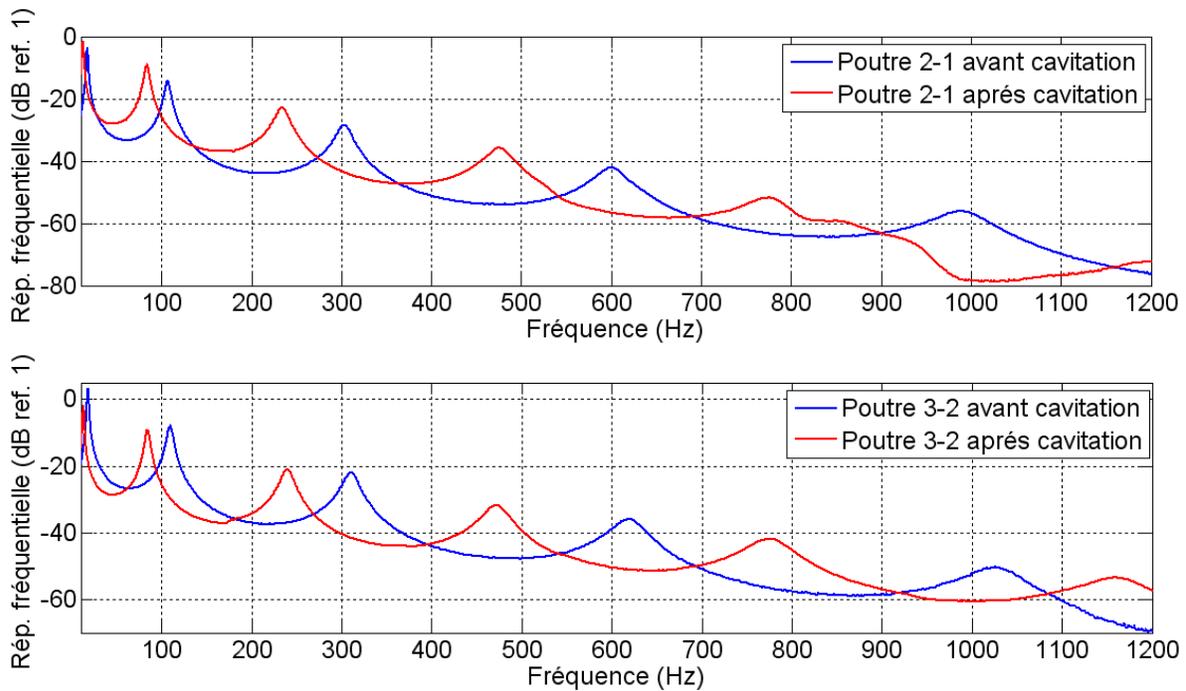


Figure 3.26 : Réponse fréquentielle d'une des poutres des lots N°2 et 3 avant et après la création de cavitation

Tableau 3.6 : Résultats des mesures sur les lots N°2 et 3 après cavitation

	Fraction Volumique (%)	Module d'Young E (MPa)	Amortissement structural η	Masse volumique (kg/m^3)	Rapport E/ρ
Poutre 2-1	12.4	556	0.064	1768	0.418
Poutre 2-2	13.8	606	0.057	1865	0.432
Poutre 2-3	10.9	651	0.054	1666	0.519
Moyenne Lot N°2	12.3	604	0.058	1766	0.456
Poutre 3-1	23.4	619	0.057	2525	0.326
Poutre 3-2	23.0	594	0.060	2489	0.318
Moyenne Lot N°3	23.2	607	0.059	2507	0.322

On constate que la valeur du module d'Young pour chacune des poutres des lots 2 et 3 est inférieure à celui du LLDPE seul, à savoir 693 MPa. L'objectif de diminuer le module d'élasticité est donc clairement atteint. En ce qui concerne l'amortissement structural, il y a une légère augmentation par rapport au LLDPE seul mais cette variation est non représentative. La discussion qui suivra ne concernera que le module d'Young et la masse volumique.

Tableau 3.7 : Variation du module d'élasticité et de la masse volumique en fonction de la déformation plastique imposé aux composites

	Fraction volumique (%)	Déformation plastique (%)	Variation de E (%)	Variation de ρ (%)	Variation de E/ρ (%)
Poutre 2-1	12.4	4	-35.12	-2.91	-33.2
Poutre 2-2	13.8	2	-31	-1.01	-30.1
Poutre 2-3	10.9	1.3	-23.1	-0.72	-22.6
Poutre 3-1	23.4	1.8	-39.8	-1.41	-38.9
Poutre 3-2	23.2	2.3	-38.8	-2.16	-37.3

Le Tableau 3.7 affiche les réductions apportées au module d'Young, à la masse volumique et au rapport de ces deux grandeurs. Celles-ci sont très significatives. Tout d'abord, la diminution du module d'Young augmente à mesure que la déformation plastique augmente. Ceci est confirmé par les résultats du lot N°2. Cependant, les résultats du lot N°3 montrent aussi qu'il existe une valeur de la déformation plastique au-delà de laquelle l'amélioration apportée n'est plus aussi significative. Une valeur de 2% apparaît être un bon compromis pour ne pas trop diminuer la masse volumique tout en créant suffisamment de cavitation dans le matériau. Il est important de noter que la réduction de la rigidité spécifique dépend aussi de la fraction volumique. En effet, cela est logique car plus il y a de billes, plus la masse volumique augmente et plus il y a possibilité de réaliser de la cavitation.

Ceci constitue un résultat très important et très intéressant puisqu'il revient à dire que plus le matériau est alourdi, plus la diminution du module d'Young sera importante. C'est d'ailleurs ce phénomène qui explique le fait que les valeurs du module d'Young obtenues par les poutres du lot N°3 sont quasiment équivalentes à celles du lot N°2.

Il faut toutefois noter que lors des essais de traction, la cavitation créée dans les poutres, spécialement sur les tranches, a permis à certaines billes de se détacher du composites. Ceci fait que la fraction volumique d'une même poutre avant et après cavitation n'est pas exactement la même (plus faible après la cavitation). Ceci à inévitablement généré quelques erreurs dans les mesures, spécialement de la masse volumique et donc dans le rapport E/ρ . Il serait alors judicieux lors de la conception d'un tel composite qu'il n'y ait pas de billes sur les bords.

3.5 Modèles analytiques de prédiction avec cavitation

3.5.1 Modèles des composites sans adhésion du renfort

En ce qui concerne les modèles de prédiction du module d'élasticité des composites, il en existe peu qui prennent en compte la qualité de l'adhésion de la matrice avec la charge. Ce chapitre s'attache à les présenter et les comparer aux mesures obtenues.

Un de ceux-là est le modèle d'Einstein [39] qui s'inspire directement de la formule (3.3) du paragraphe 3.3.3. Dans le cas d'une non-adhésion de la charge à la matrice, la formule se réduit à :

$$E_c = E_m(1 + \phi) \quad (3.10)$$

Le modèle suivant est celui de Sato et Furukawa [47] qui a déjà présenté au paragraphe 3.3.3. Pour une adhésion nulle de la charge à la matrice, le terme χ de la formule (3.8) doit prendre la valeur 1.

Plusieurs auteurs ont par la suite établi un modèle se basant sur une relation commune [52] :

$$E_c = E_m(1 - a\phi^b) \quad (3.11)$$

Ce modèle comporte deux paramètres a et b . La constante a est liée à la contrainte et à l'adhésion tandis que la constante b tient compte de la géométrie de la charge.

Pour des particules sphériques n'ayant pas d'adhésion avec la matrice et comportant des fissures aléatoires, Nicolais et al. [53] ont établi que l'équation (3.11) se réduit à :

$$E_c = E_m(1 - 1.21\phi^{2/3}) \quad (3.12)$$

Dans le cas d'une adhésion partielle de la charge avec la matrice (adhésion partielle ou faible), il est possible de considérer qu'il y a une couche entre le renfort et la matrice et celle-ci peut transmettre une partie des efforts lorsqu'ils sont faibles. L'augmentation des efforts entrainera le décollement total du renfort. À partir de l'observation du processus du décollement, Liang et Li [54] ont établi la relation suivante :

$$E_c = E_m(1 - 1.07\phi^{2/3}) \quad (3.13)$$

Les différents modèles sont utilisés pour modéliser les composites avec cavitation et les résultats sont présentés sur la Figure 3.27.

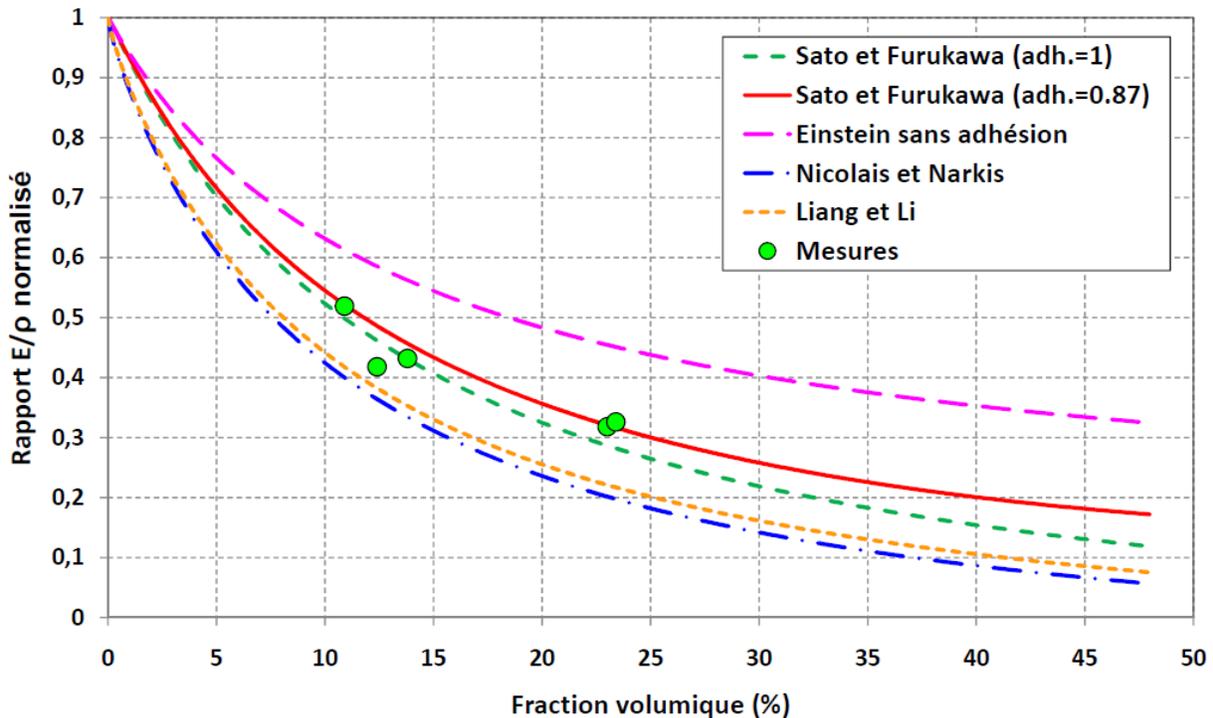


Figure 3.27 : Comparaison des différents modèles analytiques permettant la prédiction du rapport E/ρ pour les composites à adhésion nulle.

Au regard des résultats, il apparaît qu'une fois de plus le modèle de Sato et Furukawa donne de très bon résultats en considérant l'adhésion comme étant nulle. Il est toutefois possible de

raffiner ce modèle en faisant varier le facteur d'adhésion χ afin de mieux se rapprocher des mesures. Une valeur de 0.87 est le meilleur compromis pour cela. Cette valeur étant assez proche de 1, ceci implique que l'adhérence entre les billes et le LLDPE est très faible et que les efforts de traction ont effectivement réussi à les rompre en majeure partie. Mis à part le modèle d'Einstein sans adhésion, les autres modèles surestiment l'effet de la non-adhérence des billes à la matrice. Il est utile de noter qu'en ce qui concerne les mesures, le point à 12.4% de fraction volumique est plus bas que les deux autres. Ce point est relatif à la poutre 2-1 qui a manifesté deux sévères strictions lors de son essai de traction (Figure 3.19), ce qui ne fut pas le cas pour les autres poutres du même lot. Ceci explique que ce point de mesure soit en marge des autres.

3.5.2 Modèles de matériaux poreux

Pour la modélisation d'un composite dont la charge ne présente aucune adhésion avec la matrice, une autre approche peut être utilisée. En effet, la bille d'acier n'ayant plus de contact avec la matrice et ne transférant aucun effort mécanique à celle-ci, il est possible de considérer le composite comme étant poreux. Il est donc intéressant de comparer les différents modèles de prédiction du module d'élasticité des matériaux poreux.

Rusch [55] a développé un modèle pour les mousses à haute densité comme un système composé de particules (bulles d'air) ayant un module de cisaillement nul. Il a alors obtenu la relation suivante :

$$E_c = E_m \left(\frac{12\phi_m}{23 - 11\phi_m} \right) \quad (3.14)$$

Moore et al. [56] ont comparé les données expérimentales de quatorze différents matériaux poreux avec différents autres modèles. Le modèle de Lederman [57] a donné des correspondances proches des mesures mais celui-ci exige des paramètres ajustables difficiles à obtenir. Ils ont alors établi la relation empirique suivante qui donne de très bons résultats pour les mousses à base de thermoplastiques :

$$E_c = E_m \left(\frac{\rho_f}{\rho_m} \right)^2 \quad (3.15)$$

avec :

ρ_f : Masse volumique du matériau poreux (kg/m³)

ρ_m : Masse volumique de la matrice (kg/m³)

Suite à l'analyse de la déflexion de poutres sandwich, Ogorkiewicz et Sayigh [58] ont modélisé la structure poreuse comme un matériau cubique ayant un pore également cubique. En posant l'hypothèse que les efforts le long de chaque section normale à la direction de l'effort de traction sont constants, le module d'élasticité devient :

$$E_c = E_m \left(1 - \frac{\phi}{1 - \phi^{1/3} + \phi^{2/3}} \right) \quad (3.16)$$

Gibson et Ashby [59] ont posé l'hypothèse qu'une cellule unitaire est assimilable à un assemblage cubique de plaques reliées par des forces pour former une seule et même cellule. La formule générale est de la forme :

$$E_c = E_m \left[\phi_m^2 \left(\frac{\rho_f}{\rho_m} \right)^2 + (1 - \phi) \frac{\rho_f}{\rho_m} + \frac{p_o}{E_m} \frac{1 - 2\nu_f}{1 - \rho_f/\rho_m} \right] \quad (3.17)$$

avec :

p_o : Pression interne du gaz présent dans les pores (Pa)

ν_f : Coefficient de Poisson du matériau poreux

En admettant que le gaz interne soit à la pression atmosphérique et que le module d'élasticité de la matrice soit largement supérieur à p_o , l'équation (3.17) peut se réduire à :

$$E_c \approx E_m \left[\phi_m^2 \left(\frac{\rho_f}{\rho_m} \right)^2 + (1 - \phi) \frac{\rho_f}{\rho_m} \right] \quad (3.18)$$

La figure 3.29 présente les résultats obtenus via l'utilisation de ces différents modèles analytiques pour matériaux poreux.

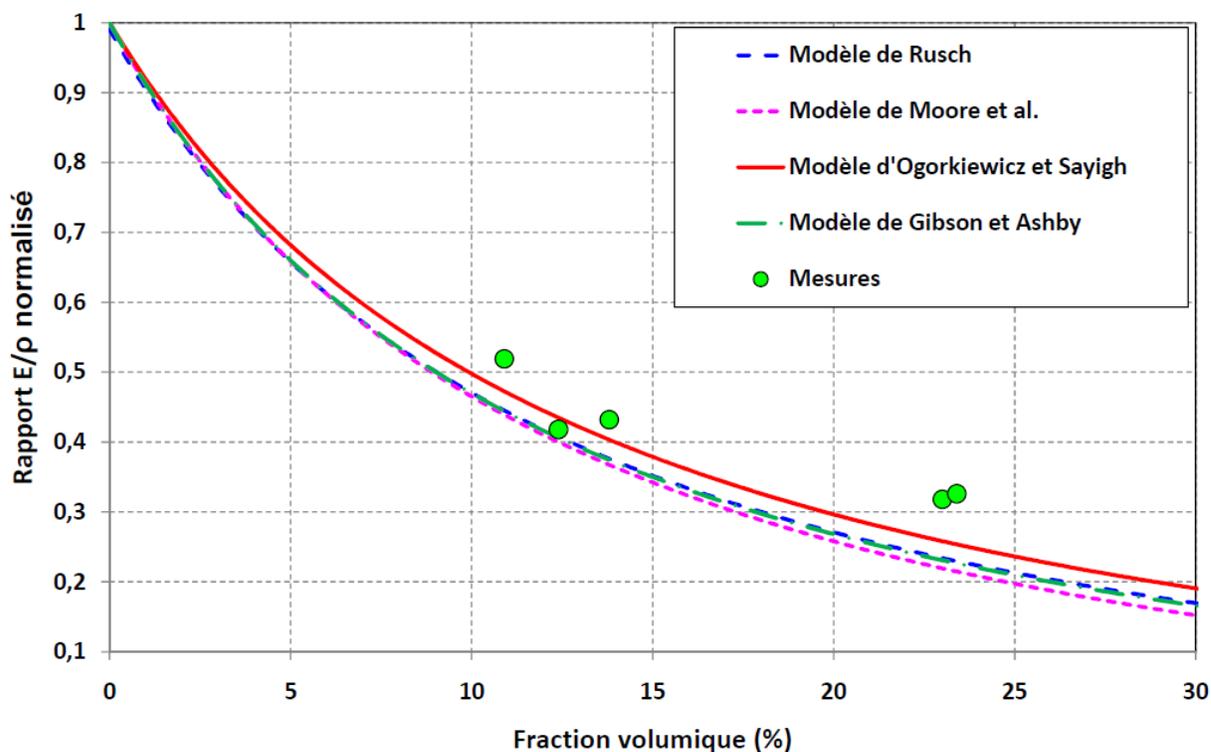


Figure 3.28 : Comparaison des différents modèles analytiques du module d'Young pour les matériaux poreux

Deux remarques peuvent être faites sur les résultats de la Figure 3.28. Tout d'abord, les modèles donnent des résultats très proches comparativement à ceux des modèles de composites sans adhésion. Le modèle d'Ogorkiewicz et Sayigh se détache légèrement du lot pour finalement être le modèle de matériaux poreux qui se rapproche le plus des résultats expérimentaux pour la fraction volumique de 12.5%. Au-delà, il y a divergence des résultats par une sous-estimation du module d'Young.

Dans tous les modèles de matériaux poreux présentés, il n'est toujours pas fait état de la dimension de la cellule creuse. La plupart des matériaux poreux ont des pores petits (diamètre inférieur au millimètre) alors que dans notre cas il est de l'ordre du millimètre. Il y a nécessairement une influence des dimensions des pores sur les caractéristiques mécaniques du matériau. Le chapitre suivant se propose de définir un modèle simple tenant compte de cela.

3.5.3 Modèle analytique géométrique

Le modèle suivant se base sur l'expression de la rigidité de flexion D égale au produit du module d'Young E par le second moment d'inertie d'une poutre I .

Soit une poutre comportant des inclusions sphériques creuses. Cette poutre est considérée comme homogène de telle manière que pour une section donnée, il y a une fraction de vide égale à ϕ_s . Cette fraction est représentative de la fraction volumique de renfort du composite considéré. La problématique étant ramenée à un problème à deux dimensions, le terme fraction surfacique sera employé (Figure 3.29).

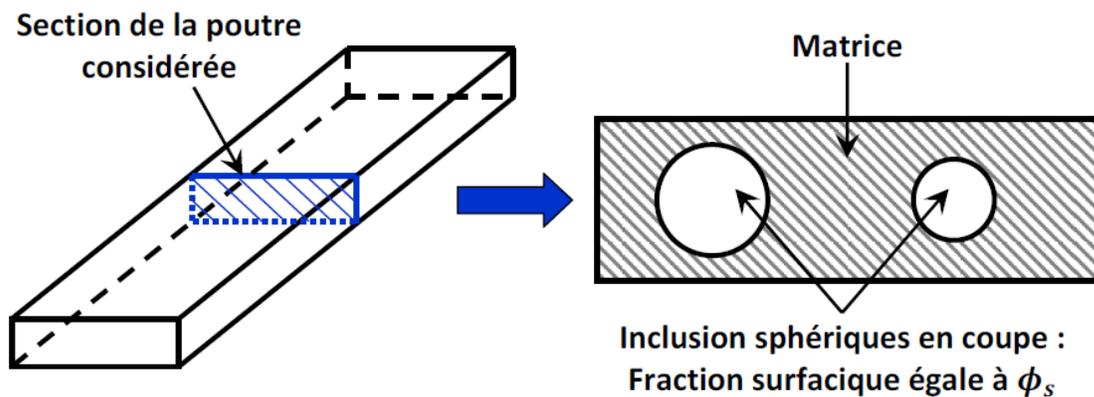


Figure 3.29 : Vu en coupe du composite représentant les fractions surfaciques de renfort et de matrice

Il est ensuite supposée que cette section de poutre avec des inclusions sphériques soit équivalente à une section ayant une seule inclusion creuse de forme rectangulaire (Figure 3.30). L'aire de cette inclusion rectangulaire est égale à la somme des aires des inclusions sphériques, soit $b_1 h_1$.

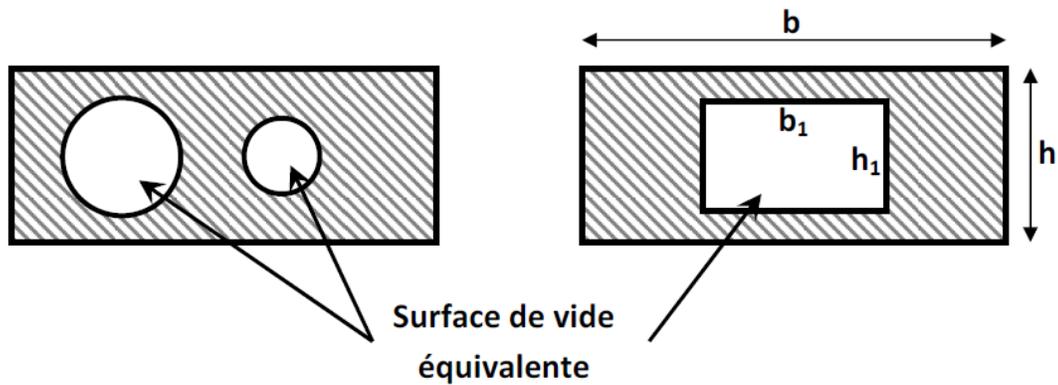


Figure 3.30 : Équivalence entre les sections des poutres

On suppose que l'inclusion rectangulaire est centrée par rapport au plan neutre de la poutre. La rigidité de flexion de cette poutre est alors :

$$EI = \frac{bh^3}{12} - \frac{b_1h_1^3}{12} \quad (3.19)$$

avec :

b, b_1 : Largeur respective de la poutre et de l'inclusion rectangulaire de vide (m)

h, h_1 : Épaisseur respective de la poutre et de l'inclusion rectangulaire de vide (m)

Le principe est de déterminer le module d'Young équivalent E_{eq} pour une poutre de la même dimension mais sans inclusion. L'égalité suivante peut alors être posée :

$$\begin{aligned} EI &= E_{eq}I_{eq} \\ E_{eq} &= E \frac{I}{I_{eq}} \end{aligned} \quad (3.20)$$

avec I_{eq} le second moment d'inertie de la poutre sans inclusions ($= bh^3/12$). En remplaçant les expressions de I_{eq} et I dans l'équation (3.20), on arrive à l'expression suivante :

$$E_{eq} = E \frac{bh^3}{bh^3 - b_1h_1^3} \quad (3.21)$$

Il reste cependant à discuter des dimensions b_1 et h_1 de l'inclusion rectangulaire. En effet, pour une même surface, il est possible d'avoir plusieurs valeurs possibles pour b_1 et h_1 . Ces

différentes valeurs donnent des seconds moments d'inertie I différents de la poutre creuse du fait que l'épaisseur h_1 soit élevée au cube.

Dans le cas de nos composites, les poutres ont des épaisseurs de 4 mm pour des billes de 3.175 mm de diamètre. Pour être proche de ce rapport de dimensions, il convient alors de choisir une valeur de h_1 équivalente au diamètre des billes. Pour la simulation à venir des résultats, une valeur de 3.175 mm est choisie pour h_1 . Seul la largeur b_1 varie pour modifier la fraction surfacique ϕ_s . Les résultats obtenus sont comparés aux mesures et au modèle de Sato et Furukawa dans la Figure 3.31 et au Tableau 3.9.

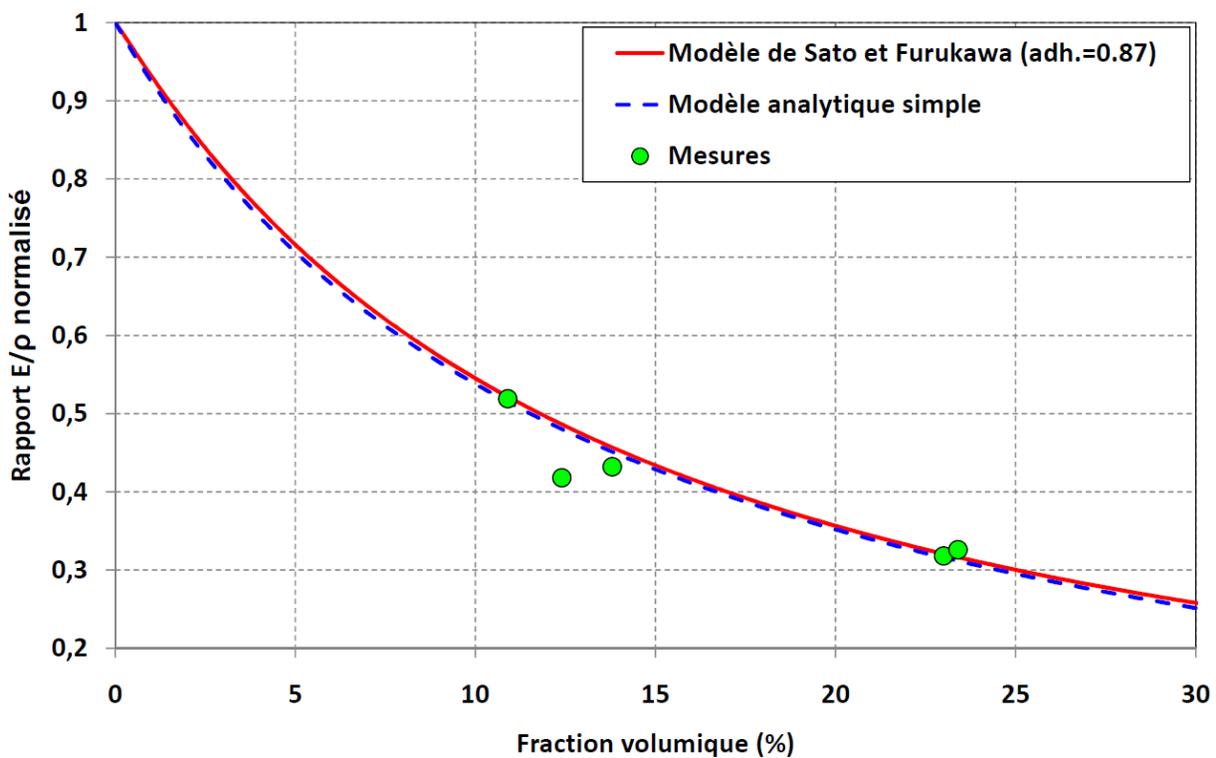


Figure 3.31 : Comparaison du modèle analytique simple avec les mesures et le modèle « optimisé » de Sato et Furukawa

Malgré ses nombreuses hypothèses simplificatrices, le modèle proposé offre de très bons résultats avec les données expérimentales et le modèle de Sato et Furukawa. Cependant, il est observé dans le Tableau 3.8 une divergence entre les deux modèles pour des fractions volumiques supérieures à 30%. En effet, le modèle analytique géométrique sous-estime le

module d'Young par rapport au modèle de Sato et Furukawa. N'ayant pas la possibilité de valider lequel des deux modèles correspond le mieux à la réalité et connaissant l'impact du module d'Young sur la perte par transmission, il convient d'utiliser le modèle de Sato et Furukawa pour les simulations acoustiques du chapitre suivant.

Tableau 3.8 : Variation du module d'élasticité et en fonction du modèle de prédiction utilisé

Fraction volumique de billes (%)	Module d'Young selon Sato-Furukawa (MPa)	Module d'Young selon Modèle géométrique (MPa)	Écart type
10	658	650	4
20	613	606	3.5
30	577	563	7
40	552	518	17
48	544	483	30.5

Il est toutefois utile de noter que du point de vue de la perte par transmission acoustique, la différence se situera au niveau de la position de la fréquence de coïncidence. Cela n'affectera pas la performance liée à la loi de masse. Tant que la fréquence de coïncidence sera supérieure à 10 kHz, la perte par transmission du composite obtenue par les deux modèles sera identique. le paramètre qui ramènera la fréquence de coïncidence en dessous de 10 kHz sera l'épaisseur du panneau (voir équation 2-12).

Ce modèle analytique simple, se basant sur l'équivalence d'une poutre pleine de par la rigidité de flexion, a l'avantage d'intégrer la dimension du renfort par rapport à l'épaisseur de la poutre, ce qui n'est pas le cas des autres modèles.

Au moment précis de cette étude, nous disposons :

- De résultats expérimentaux de composites répondants aux caractéristiques exigées par l'acoustique, à savoir une rigidité spécifique faible (i.e. masse volumique importante et un module d'élasticité faible);
- Un modèle de prédiction du module d'Young du composite.

Il est donc possible de procéder aux simulations acoustiques pour évaluer les performances du composite développé au cours de ce projet.

CHAPITRE 4 SIMULATIONS ACOUSTIQUES

Les simulations acoustiques ont été effectuées avec le logiciel NOVA [3]. Ce logiciel permet de modéliser la réponse acoustique de matériaux multicouches. Pour cela, il implémente la méthode des matrices de transfert pour les structures multicouches de dimensions infinies et finies [60] et permet des calculs d'absorption acoustique, perte par insertion et transmission de matériaux poro-élastiques. Ce logiciel est développé par la société Mecanum inc., sous une licence d'exploitation octroyée par l'Université de Sherbrooke, et vendu par la société ESI Group.

Les simulations se dérouleront en deux étapes, chacune composées de deux parties :

- Étape 1 : Matériaux classiques.
 - Composites et thermoplastiques : Les composites seront comparés aux autres thermoplastiques de grande consommation.
 - Composites et matériaux du bâtiment : Les composites seront comparés à des matériaux usuellement utilisés dans la construction.
- Étape 2 : Écrans antibruit.
 - Écrans réfléchissants : Les composites seront comparés à des configurations d'écrans antibruit monocouches existant.
 - Écrans absorbants : Les composites seront associé avec d'autres matériaux pour être comparés à des configurations d'écrans antibruit multicouches existants.

L'annexe D consigne et répertorie toutes les propriétés des matériaux utilisés pour chacune des configurations, les sources d'où elles sont extraites, la façon de les modéliser ainsi que les conditions de simulation. Toutes les simulations de ce chapitre considèrent des écrans infinis soumis à un champ diffus avec un angle d'incidence de 0 à 90°.

4.1 Comparaisons par rapport aux matériaux classiques

4.1.1 Les Thermoplastiques

Dans ce travail les thermoplastiques ont été utilisés comme matrice, il est donc intéressant dans un premier temps de comparer la perte par transmission de divers thermoplastiques purs. Pour cela, les thermoplastiques suivant sont comparés :

- Le polyéthylène haute densité (HDPE)
- Le polyéthylène basse densité (LDPE)
- Le polyéthylène basse densité linéaire (LLDPE)
- Le polypropylène (PP)
- Le polystyrène (PS)

Le détail des propriétés de chacun des matériaux est donné dans l'annexe D. Le logiciel de simulation acoustique est configuré pour calculer la perte par transmission en modélisant des plaques minces de 4 mm d'épaisseur (Figure 4.1).

Étant donné que les thermoplastiques ont des masses volumiques très proches les unes des autres, la région de la loi de masse est quasiment identique pour chacun d'entre-eux. Ce qui les distingue pour la plupart, c'est la position de la fréquence de coïncidence. Ceci met en évidence la différence de module d'Young des différents thermoplastiques. Il apparaît que les polyéthylènes sont ceux qui possèdent les plus faibles modules d'élasticité, le LDPE en tête.

À présent le LLDPE est comparé à des composites LLDPE/billes d'acier ayant quatre fractions volumiques différentes, à savoir 12.3%, 23.2%, 35% et 48%. L'Annexe D précise les propriétés de chacun de ces composites et la manière dont elles ont été déterminés. Les écrans de cette simulation ont tous une épaisseur de 4 mm et sont modélisé comme des plaques minces. La Figure 4.2 présente les résultats de simulation de la perte par transmission.

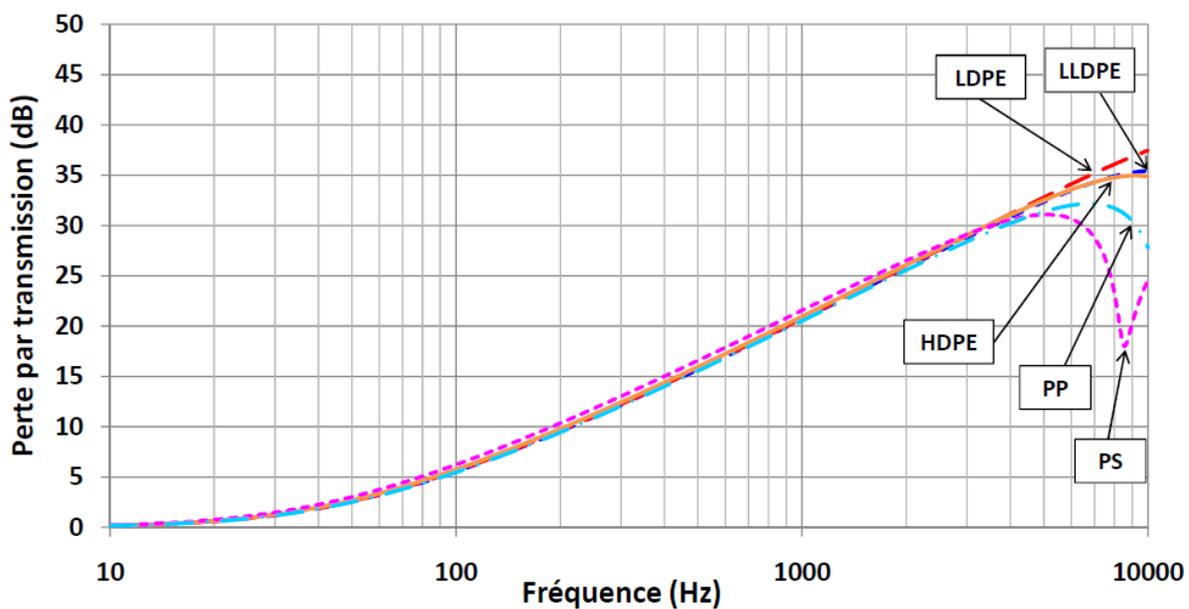


Figure 4.1 : Perte par transmission des différents thermoplastiques purs pour une épaisseur de 4 mm

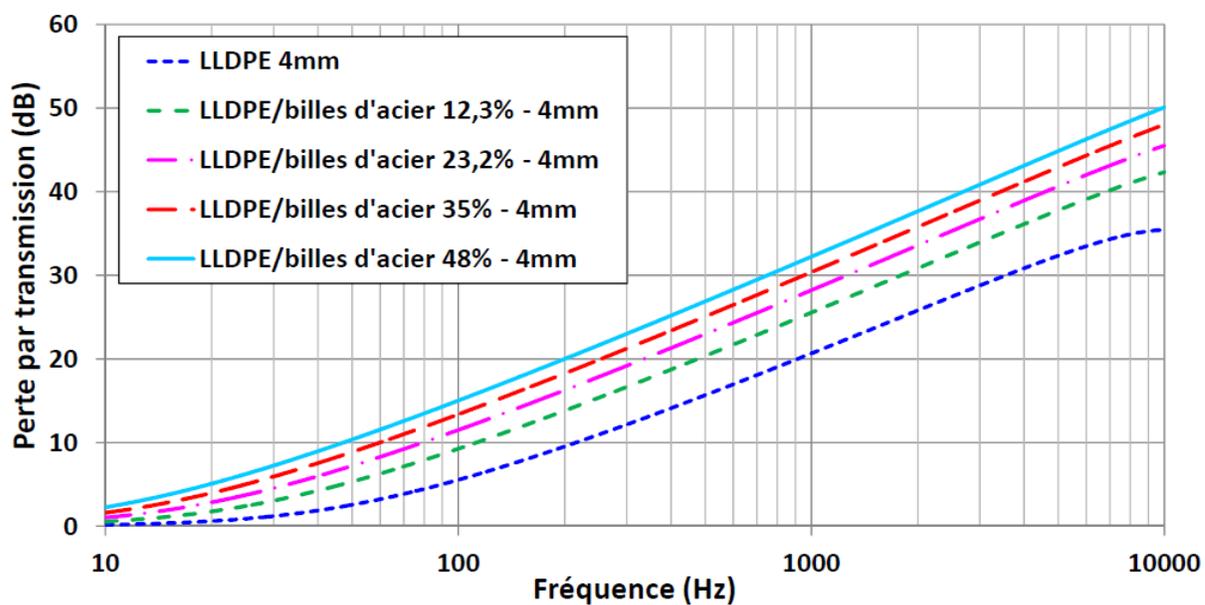


Figure 4.2 : Perte par transmission du composite LLDPE/billes d'acier en fonction de la fraction volumique de billes pour une épaisseur de 4 mm

L'effet de l'augmentation de la masse volumique du composite est clairement observable dans la zone où domine la « loi de masse ». Il est également possible d'observer la réduction du module d'élasticité des composites. En effet, malgré le fait que la masse ait été augmenté pour les composites, seul la « loi de masse » apparaît sur la bande fréquentielle 10 Hz – 10 kHz. Par contre, pour le LLDPE seul il est possible d'observer à 10 kHz le début de l'apparition de la fréquence critique annonciatrice de la chute d'efficacité de l'isolation acoustique.

4.1.2 Matériaux utilisés dans la construction

Dans cette section, il est question de comparer des composites de LLDPE/billes d'acier avec des matériaux usuellement utilisés dans la construction tels que le béton, le verre, le gypse et le *plywood* (contreplaqué). Les composites utilisés pour la comparaison ont une fraction volumique de 23.2 et de 48% respectivement. Le détail des propriétés des matériaux et de la simulation sont spécifiés en annexe D. Pour ces simulations, une épaisseur de 8 mm a été employée pour être plus représentative de celle utilisée dans la construction. Les écrans sont modélisés sous NOVA comme étant des plaques minces (Figure 4.3).

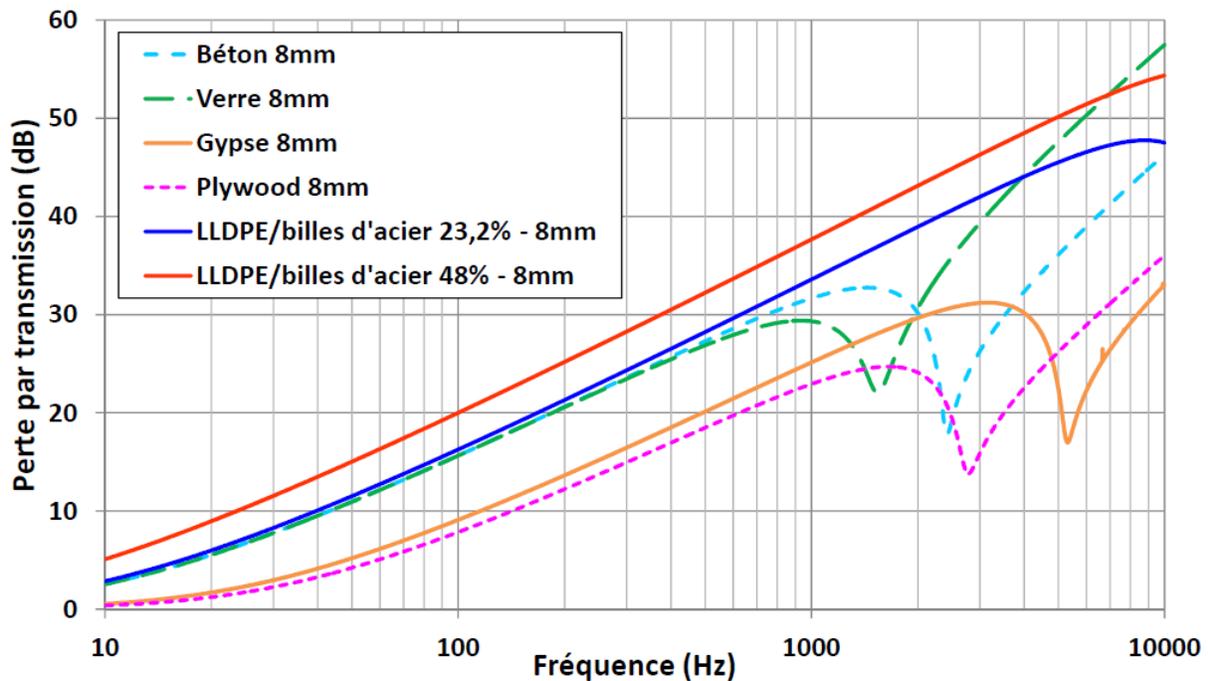


Figure 4.3 : Perte par transmission du composite LLDPE/billes d'acier pour des fractions volumiques de 23.2% et 48% comparés à des éléments de la construction

On peut remarquer que de tous les matériaux de construction, le verre est le plus isolant de par sa masse volumique (2300kg/m^3). En comparaison, le composite avec une fraction volumique de 23.2% a les mêmes performances que le verre jusqu'à 400 Hz. Au dessus, la fréquence de coïncidence du verre se manifeste, ce qui n'est pas le cas du composite, ce dernier étant alors plus efficace jusqu'à 4000 Hz. Étant donné que pour un bruit routier, la majeure partie de l'énergie acoustique se situe dans la plage fréquentielle 10 – 2 000 Hz (Figure 4.4), le composite s'avère être bien plus efficace que le verre. En ce qui concerne le composite avec la fraction volumique maximale de billes (48%), il surpasse le verre sur la plage 10 – 6500 Hz.

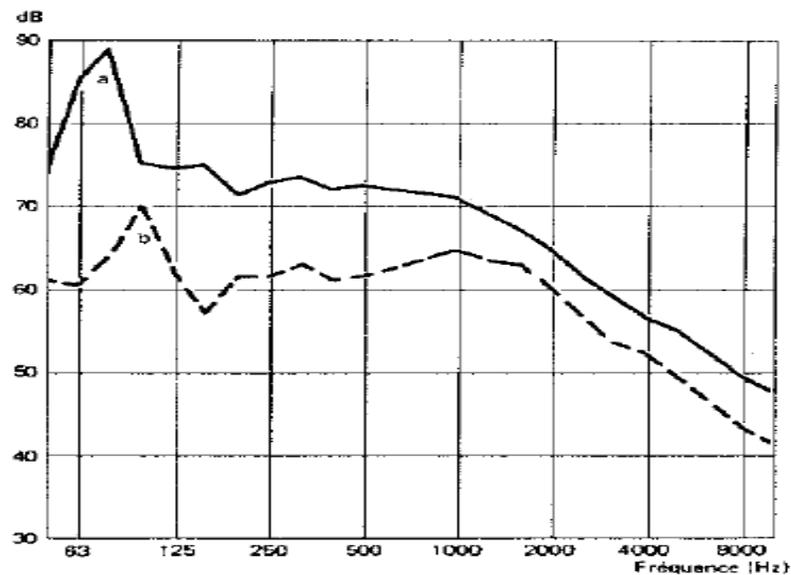


Figure 4.4 : Spectre de bruit de véhicules a) poids lourds, b) véhicules légers [61]

4.2 Comparaisons avec des panneaux antibruit existants

Il existe plusieurs types de configurations possibles pour un écran antibruit. Elles dépendent d'ailleurs de l'application et du contexte. Par exemple :

- L'écran peut avoir comme vocation de réfléchir le bruit pour le renvoyer dans une autre direction. Dans ce cas, l'écran est très souvent constitué d'un seul matériau;
- Il peut aussi atténuer le bruit par un effet d'absorption de celui-ci. Dans ce cas, l'écran est constitué d'une paroi rigide auquel est ajouté un matériau absorbant.

Ce chapitre va donc étudier diverses possibilités d'écrans acoustiques qui seront comparées à l'existant. Pour ce faire, une recherche de produits existants a été effectuée. Les simulations seront effectuées à partir des propriétés mécaniques (si celles-ci sont connues) ou de la désignation des matériaux. Pour préciser le dernier propos, cela signifie que s'il est fait référence à de la laine de verre dans un document technique d'un écran, une laine de verre dont les caractéristiques sont connues sera utilisée, même si ce n'est pas celle qui est utilisée dans l'écran. En effet, le but de ce chapitre n'est pas de comparer des produits existants mais plutôt des configurations existantes. C'est pour cette raison que les courbes fournies par les documents techniques ne seront pas utilisées en tant que comparatifs.

4.2.1 Écrans réfléchissants

Dans un premier temps, il s'agit de considérer des panneaux sans matériau absorbant et d'observer les performances en ce qui concerne la perte par transmission. Dans la gamme des panneaux acoustiques réfléchissants qui existent actuellement, il y en a peu pour la simple raison que les parois absorbantes sont très utilisées. En effet, réfléchir le son ne permet pas vraiment de résoudre le problème mais plutôt de le « déplacer » ailleurs. De plus, suivant les lieux, l'utilisation d'un mur réfléchissant peut s'avérer problématique comme le suggère l'illustration de la Figure 4.5.

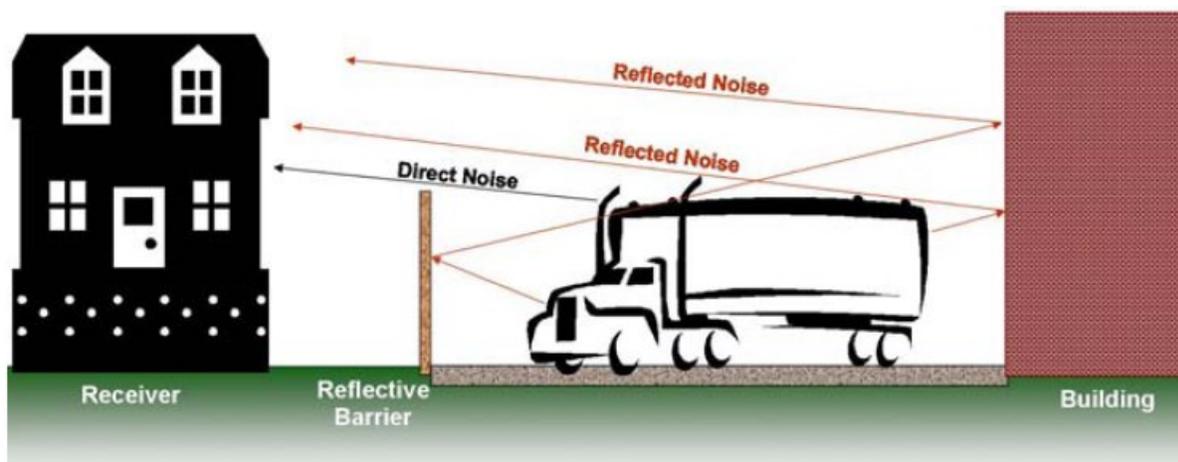


Figure 4.5 : Exemple d'inconvénient de l'utilisation d'un écran antibruit réfléchissant (source [62])

Pour effectuer des comparaisons, une recherche a été effectuée afin de compiler les caractéristiques de plusieurs matériaux réfléchissants employés pour des applications d'écrans antibruit.

Pour la première comparaison, l'écran antibruit réfléchissant PARAGLAS SOUNDSTOP[®] GS CC (Figure 4.6) développé par la société Evonik Industries [66]. C'est un écran en Plexiglas transparent. Ses propriétés mécaniques sont précisées dans l'annexe D. La gamme du PARAGLAS SOUNDSTOP[®] GS CC se décline en trois épaisseurs différentes, à savoir 15 mm, 20 mm et 25 mm. Les épaisseurs minimale et maximale seront simulées et comparées à un composite de LLDPE comprenant 23.2% de billes d'acier. Dans un premier temps les panneaux seront comparés pour une même épaisseur et dans un second temps, pour une même masse surfacique. Ils seront modélisés comme étant des plaques minces. La Figure 4.7 présente la simulation de la perte par transmission.

Ces résultats montrent clairement que pour une épaisseur équivalente, les performances du composite LLDPE/billes d'acier à 23.2% sont supérieures à celles de l'écran PARAGLAS et ce, sur la grande majorité du spectre. En ce qui concerne le composite à masse surfacique équivalente, la différence se fait au niveau de la fréquence critique. Lorsqu'elle apparaît pour l'écran PARAGLAS, le composite suit toujours la loi de masse et continue à croître grâce à son faible module d'Young. En tenant compte du fait que le spectre de bruit routier se concentre sur la plage fréquentielle 50 – 2 000 Hz, le composite s'avère convenir parfaitement pour cette application.



Figure 4.6 : Écran acoustique PARAGLAS SOUNDSTOP[®]

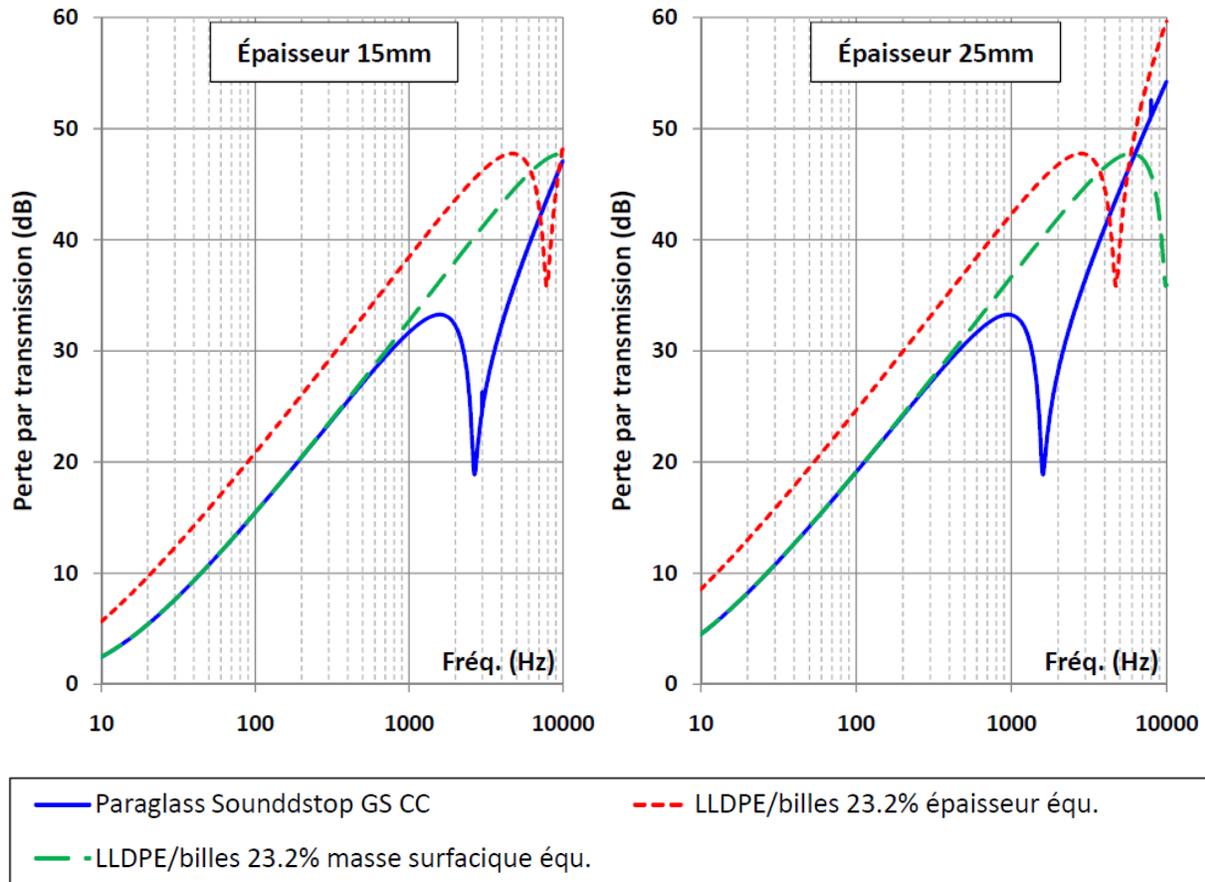


Figure 4.7 : Perte par transmission de l'écran PARAGLAS SOUNDSTOP® et du composite LLDPE/billes d'acier avec une fraction volumique de 23.2% pour une épaisseur et une masse surfacique équivalentes

La société GE Structured Products [67] réalise des écrans acoustiques en polycarbonate transparent dont le LEXAN Soundglaze SC (Figure 4.8). Cet écran existant pour une épaisseur de 8 mm, les simulations se feront à cette dimension. La encore, il sera comparé à un composite LLDPE/billes d'acier de 23.3% pour une épaisseur de 4 mm et 8 mm. Les propriétés des panneaux de cette simulation sont donnés en annexe D. Ils sont modélisés sous NOVA comme étant des plaques minces. Les résultats sont présentés à la Figure 4.9.

Il apparaît que le composite avec une épaisseur de 4 mm, soit deux fois moins épais que le polycarbonate, est plus efficace. En effet, à ces épaisseurs, ils ont presque la même masse surfacique (9.6 kg/m^2 pour le PC et 10.028 kg/m^2 pour le composite) mais le module

d'élasticité plus élevé du polycarbonate fait apparaître la fréquence de coïncidence à 6500 Hz alors que pour les deux épaisseurs du composite elle intervient au delà de 10 kHz.



Figure 4.8 : Écran acoustique en polycarbonate de la société ECIB

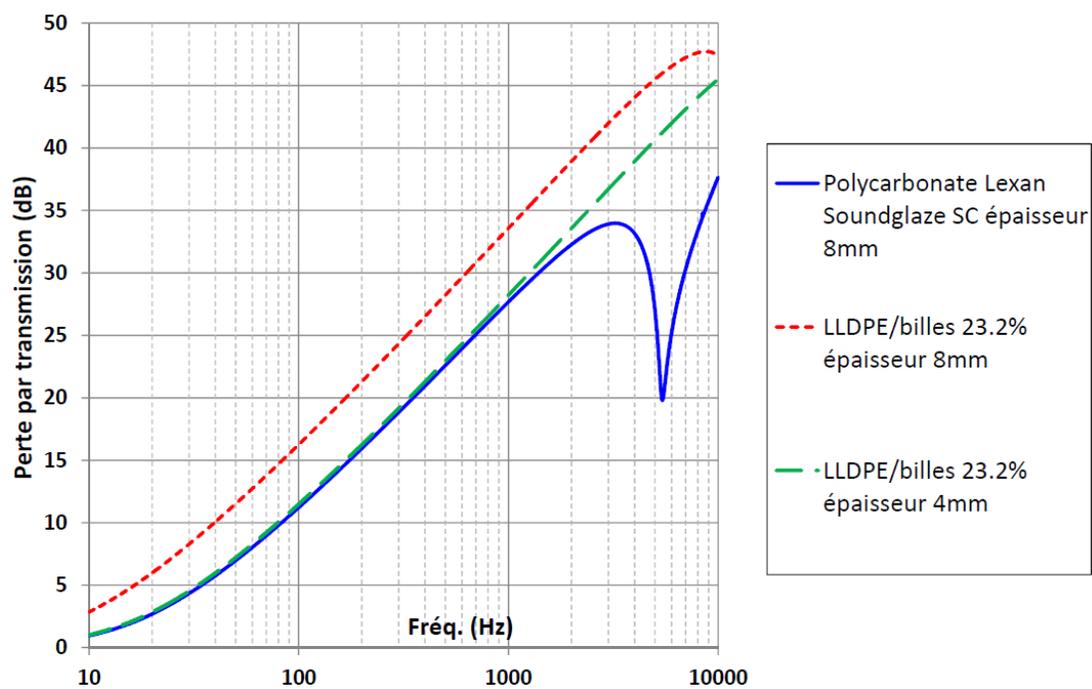


Figure 4.9 : Perte par transmission du Polycarbonate et du composite LLDPE/billes d'acier avec une fraction volumique de 23.2%

Pour terminer cette étude, la dernière simulation est effectuée sur un matériau qui se situe entre le panneau réfléchissant et absorbant. Il s'agit du vinyle alourdi. Dans le cas présent, c'est un élastomère alourdi avec du sulfate de baryum. Ce type de matériau est utilisé pour alourdir une structure tout en épousant la forme de celle-ci. Le matériau qui sera modélisé est le Barymat BM-1A [68]. Il n'est pas seulement constitué d'un vinyle alourdi mais aussi d'une fine couche de mousse de polyuréthane qui lui confère une absorption acoustique. Cette simulation intègrera également le NoiseBlok 200 (appelé NB-200 dans la documentation technique) qui semble être le matériau le plus lourd de cette catégorie, cependant il ne possède pas de couche absorbante [69]. Pour la comparaison, un composite LLDPE/billes d'acier de 4 mm d'épaisseur avec une fraction volumique de 23.2% sera simulé. Le composite est modélisé comme une plaque mince, le Barymat BM-1A et le NB-200 comme des écrans acoustiques imperméables (*impervious screen*). La mousse de polyuréthane du Barymat BM-1A est modélisé comme un matériau poreux élastique qui lui est collé sur l'écran (ce qui forme un bicouche). Ce type de modélisation implique que les vibrations du squelette de la mousse sont prises en compte. L'annexe D détaille les propriétés des matériaux de cette simulation ainsi que le choix de la modélisation. Les résultats sont présentés à la Figure 4.10.

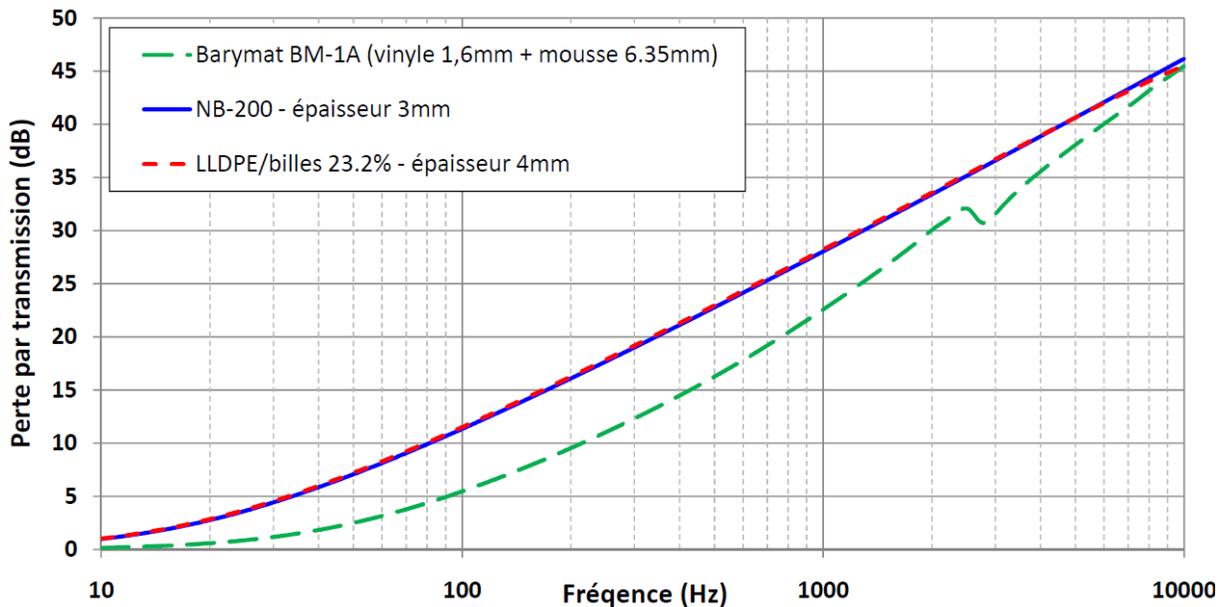


Figure 4.10 : Perte par transmission de deux vinyles alourdis et du composite LLDPE/billes d'acier avec une fraction volumique de 23.2%

Il apparaît que le vinyle alourdi NB-200 et le composite LLDPE/billes ont les mêmes performances, la différence d'épaisseur les ramenant à la même masse surfacique ($\approx 10 \text{ kg/m}^2$). On observe toutefois une très légère baisse de la perte par transmission du composite à partir de 8kHz, ceci signifiant la proximité de la fréquence de coïncidence. Ceci n'est pas le cas des vinyles alourdis grâce à leurs très faibles rigidités. En ce qui concerne le Barymat BM-1A, sa faible masse volumique le rend moins performant que les autres matériaux malgré la couche de mousse de polyuréthane. Il est possible d'ailleurs d'observer une résonance de compression du squelette de la mousse à 2800Hz.

Ces simulations montrent donc qu'en termes de performance acoustique, le composite de LLDPE peut se substituer aux vinyles alourdis lorsqu'ils sont utilisés seuls, par exemple sous forme de rideaux acoustiques. Cependant, la faible rigidité des vinyles leur permet de s'adapter à la forme de la structure à alourdir (conduite, coque), ce qui n'est pas le cas du composite LLDPE/billes d'acier.

4.2.2 Écrans absorbants

Cette section a le même but que la précédente. Cependant, il s'agit cette fois de modéliser des panneaux absorbants. Ce sont en général des structures plus complexes car elles sont au minimum composées de deux couches (la première absorbante et l'autre réfléchissante). En ce qui concerne les écrans antibruit routiers, c'est un peu différent car il y a une exposition extérieure qui nécessite des protections supplémentaires : matériaux absorbants dans des sacs pour les protéger de l'humidité, tôle perforées pour protéger l'absorbant du vandalisme, des projections de gravier, du sel, etc.... Ces aspects seront donc aussi considérés dans cette section. De plus, l'objectif étant d'utiliser des matériaux recyclés, les absorbants acoustiques qui seront inclus dans les simulations avec les composites à base de LLDPE et de billes d'acier seront issus du recyclage.

Plaque – Air – Plaque

Pour cette première simulation, il s'agit de comparer des structures composées de deux plaques espacées par de l'air (Figure 4.11). Pour avoir une comparaison par rapport à un

système existant, l'écran antibruit absorbant Noiseblock de « Kinetics Noise Control » est donc utilisé [70]. Cet écran peut avoir plusieurs configurations dont celle qui est modélisée actuellement. Cet écran se compose d'une plaque d'acier galvanisé d'épaisseur 0.794 mm (gauge 22) orienté du côté de la source de bruit, d'une couche d'air et pour finir d'une plaque d'acier de 1.27 mm (gauge 18). Pour les simulations, de l'acier AISI 4340 sera utilisé.

En ce qui concerne les écrans « éco-acoustiques », trois configurations seront comparées aux Noiseblock. Chacune des configurations sera construite suivant le modèle du Noiseblock décrit ci-dessus en imposant une masse surfacique égale à ce dernier. Ceci est réalisé en faisant varier adéquatement les épaisseurs et les fractions volumiques de billes des composites. Ces configurations sont données au Tableau 4.1. Il est utile de préciser que la taille du gap d'air est relatif au fait que l'écran Noiseblock a une épaisseur de 101.6 mm (4 pouces).

Les résultats de simulation sont présentés sur la Figure 4.12. Il est utile de noter que la légère perte d'efficacité des écrans qui est observée entre 100 et 200 Hz pour chacun des panneaux est relative au fait que ce sont tous des systèmes double-paroi. Elle se situe à une fréquence appelée fréquence de respiration et correspond à une résonance de la double paroi qui peut se modéliser par un système masse-ressort-masse. La position de cette fréquence dépend des caractéristiques mécaniques des plaques et de l'épaisseur du gap d'air entre celles-ci.

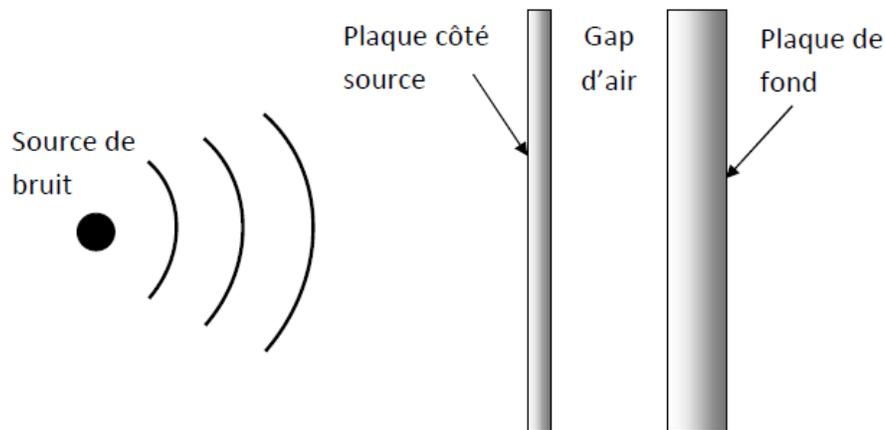


Figure 4.11 : Configuration des simulations plaque – air – plaque

Tableau 4.1 : Configurations testées

	Plaque côté source	Gap d'air	Plaque de fond	Masse surfacique (kg/m ²)
Référence	Acier AISI 4340 - 0.794 mm	99.536 mm	Acier AISI 4340- 1.27 mm	16.3
Config 1	LLDPE/billes fraction 10% - 4 mm	99.536 mm	LLDPE/billes fraction 23.2% - 4 mm	16.57
Config 2	LLDPE - 2 mm	99.536 mm	LLDPE/billes fraction 40% - 4 mm	16.59
Config 3	LLDPE - 4 mm	99.536 mm	LLDPE/billes fraction 32.5% - 4 mm	16.38

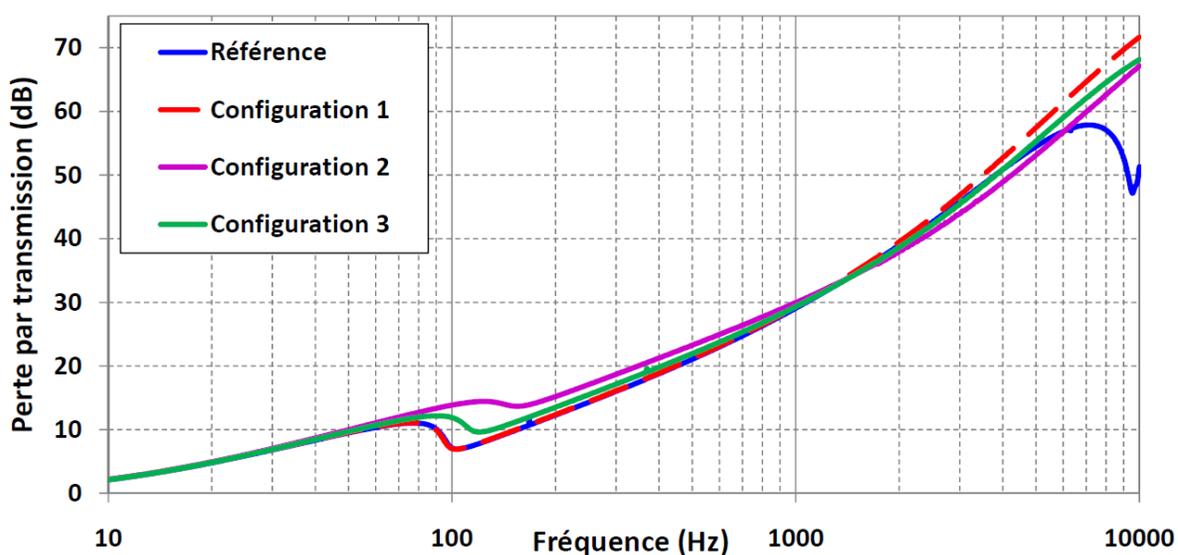


Figure 4.12 : Perte par transmission du modèle de mur de Kinetics [70] (Référence) et des configurations équivalentes faites du composite LLDPE/billes

La perte par transmission de la configuration 1 et de la référence sont quasiment identiques jusqu'à 3 kHz. Ceci s'explique par le fait que les plaques de ces deux panneaux sont individuellement équivalentes en termes de masse surfacique; pour être plus clair, la masse surfacique de la plaque côté source du panneau de référence est égale à celle de la configuration 1 côté source, idem pour la plaque du fond. À partir de 3 kHz, les deux courbes se séparent. La fréquence critique de la configuration de référence apparaît alors que la

configuration 1 suit toujours la loi de masse. Les configurations 2 et 3 ont un comportement proche de la configuration 1 sauf au niveau de la fréquence de respiration. Cela provient du fait que la répartition des masses surfaciées élément par élément est différente de la référence et de la configuration 1. Il apparaît que l'effet de la fréquence de respiration est atténué avec la configuration 2. Il se trouve même que jusqu'à environ 1500 Hz, elle est supérieure à toutes les autres. Au-delà de 1500 Hz, sa perte par transmission devient la plus faible mais reste plus efficace que le panneau de référence. En considérant le bruit routier (Figure 4.4), il s'avère que c'est la configuration 2 qui est la plus efficace.

Plaque – Absorbant - Plaque

À présent, les mêmes configurations d'écrans sont reprises mais cette fois-ci, il n'y a pas de gap d'air entre les deux parois mais un matériau absorbant (Figure 4.13). Pour l'écran de référence, de la laine de verre rigide couramment utilisée pour l'isolation des bâtiments sera utilisée (Figure 4.14(a)). Pour les écrans équipés de composites LLDPE/bille d'acier, ce sera du polyester post-consommation (Figure 4.14(b)). Ce produit est fourni par l'entreprise *Leighfibers* [71] dont l'activité principale est le recyclage de fibres pour diverses applications (isolation, filtration, rembourrage...). Il est constitué de vêtements déchiquetés. Ce n'est pas un matériau tissé et il n'a pas de tenue mécanique. Ses caractéristiques sont présentées dans l'annexe D. Les simulations seront réalisées pour deux épaisseurs de matériau absorbant; une première épaisseur à 99.536 mm pour être équivalent en dimension au mur de référence, et une seconde épaisseur de 140 mm pour être équivalent en masse surfacique. La configuration pour chacun des panneaux est donnée dans le Tableau 4.2.

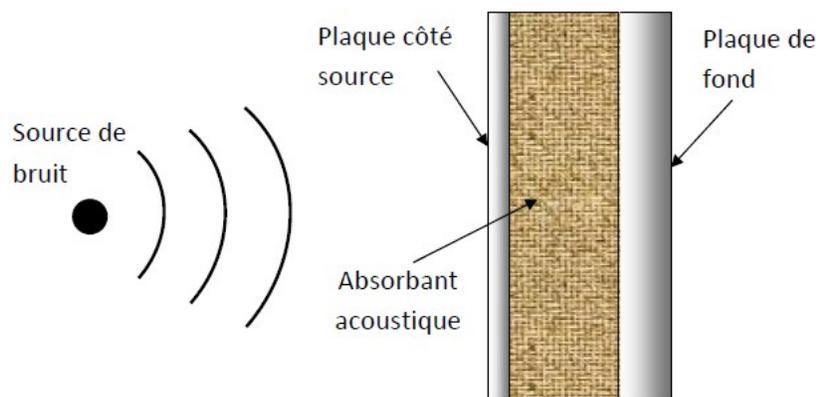


Figure 4.13 : Configuration des simulations plaque – absorbant – plaque

Le matériau absorbant est considéré comme collé aux plaques qui l'entourent. Chacune des plaques est modélisée comme étant une plaque mince. Les deux absorbants sont quant à eux modélisés comme des fluides équivalents souples [60]. Ceci implique que le déplacement du matériau en basse fréquence est pris en compte.



Figure 4.14 : Matériau absorbant utilisé a) laine de verre rigide pour les écrans de référence, b) polyester post-consommation pour les écrans « éco-acoustiques »

Tableau 4.2 : Configurations testées

	Plaque côté source	Gap d'air	Plaque de fond	Masse surfacique (kg/m ²)
Référence	Acier AISI 4340 - 0.794 mm	99.536 mm	Acier AISI 4340- 1.27 mm	17.8
Config 1	LLDPE/billes fraction 10% - 4 mm	99.536 mm / 140mm	LLDPE/billes fraction 23.2% - 4 mm	17.44 / 17.85
Config 2	LLDPE - 2 mm	99.536 mm / 140 mm	LLDPE/billes fraction 40% - 4 mm	17.46 / 17.87
Config 3	LLDPE -4 mm	99.536 mm / 140 mm	LLDPE/billes fraction 32.5% - 4 mm	17.26 / 17.66

Les résultats de la perte par transmission peuvent être découverts en trois zones (Figure 4.15). De 10 Hz à 200 Hz, de 200 Hz à 1000 Hz et de 1000 Hz à 10 kHz. Sur la première plage, le

comportement des écrans est identique aux simulations sans absorbant. Ceci signifie qu'ils n'apportent pas assez d'absorption pour réduire l'effet de la fréquence de respiration. La configuration 2 est la plus efficace dans cette plage fréquentielle. Sur la plage 200 Hz - 1000 Hz, le polyester post-consommation se révèle être moins absorbant que la laine de verre. Il faut toutefois noter qu'en matière d'absorption acoustique, la laine de verre est l'un des matériaux les plus performants. Le panneau de référence est le plus efficace. C'est un aspect important puisque c'est dans cette zone que le bruit routier concentre son énergie sonore. Sur la plage fréquentielle 1000 Hz – 10 kHz, l'écran de référence perd sa suprématie sur les autres configurations principalement à cause de l'apparition de sa fréquence critique et c'est la configuration 1 qui lui succède. Si la plage fréquentielle du bruit routier est considérée, la configuration de référence est la plus efficace. La configuration 1 est cependant celle qui se substitue la mieux à l'écran de référence mis à part le fait qu'elle ne présente pas de fréquence critique sur la bande fréquentielle d'étude.

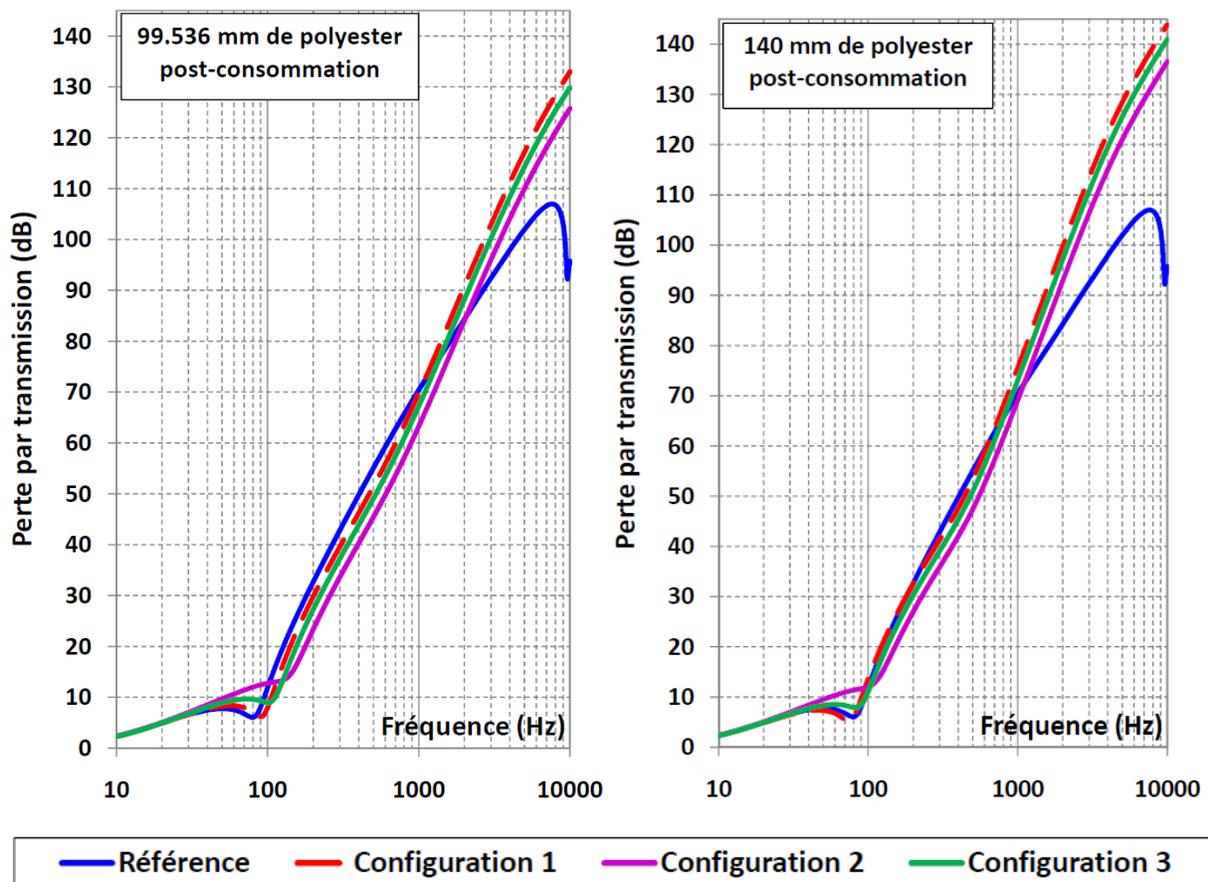


Figure 4.15 : Perte par transmission des écrans des configurations 1, 2 et 3 avec deux épaisseurs de polyester recyclé comparé à l'écran de référence équipé de laine de verre

Les résultats de la perte par transmission avec 140 mm montrent le même comportement qu'avec la première épaisseur. Cependant, les courbes des trois configurations se sont beaucoup plus rapprochées de l'écran de référence dans la bande fréquentielle 100 Hz – 1000 Hz. Ceci est dû à l'augmentation de l'épaisseur de l'absorbant acoustique. Il apparaît finalement que pour égaler les performances d'un écran tout en conservant la même masse surfacique, il est préférable de dimensionner les composites LLDPE/billes d'acier pour qu'ils aient la même masse surfacique que les éléments auxquels ils se substituent, et cela de manière individuelle.

Plaque perforée – Absorbant – Plaque

Pour les prochaines simulations, la plaque du côté de la source sera remplacée par une tôle perforée de manière à ce que l'onde acoustique puisse pénétrer plus facilement dans le mur (Figure 4.16). Le matériau acoustique situé juste après est généralement placé dans un sac étanche pour éviter que l'eau puisse le détériorer. Le mylar (environ 1390 kg/m^3) est souvent utilisé comme ensachage étanche des matériaux absorbants. Enfin, la plaque de fond a toujours la fonction de panneau réfléchissant. Plusieurs entreprises proposent ce genre de produit, dont ECIB [72], Criteria [73], Vephone [74] et Kinetics [75]. Le Tableau 4.3 décrit les caractéristiques de ces écrans suivant les informations qu'il a été possible de réunir. À partir de ces éléments, un écran de référence est constitué sur la dernière ligne de ce tableau.

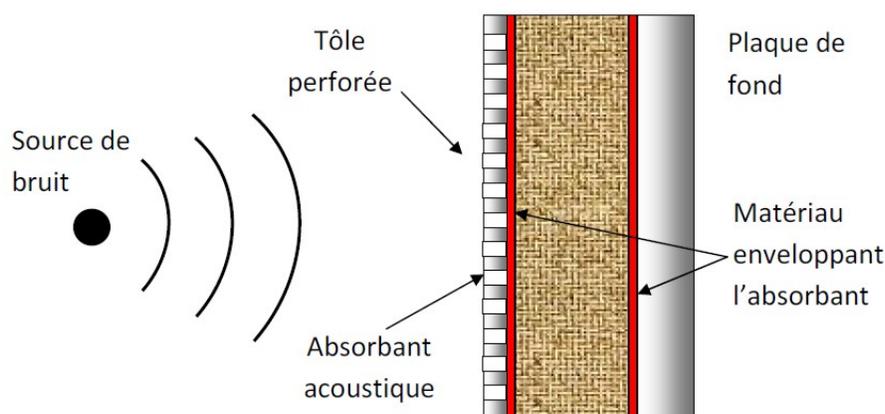


Figure 4.16 : Configuration des simulations tôle perforée – absorbant – plaque

Tableau 4.3 : Descriptions des murs existants et choix des caractéristiques du mur de référence

Fabricant	Tôle perforée côté source	Info complémentaire tôle perforée	Type d'absorbant	Protection de l'absorbant	Plaque du fond	Épaisseur totale (mm)
Criteria	Acier galvanisé, épaisseur 0.759 mm	Aucune	Laine de roche 40 kg/m ³	Film de mylar (épaisseur inconnue)	Acier galvanisé, épaisseur 1.52 mm	101.6
Kinetics	Acier galvanisé, épaisseur 0.794 mm	Taux de perforation de 23%, diamètre des trous de 2.38 mm, espace entre les centres de 4.76 mm	Laine de verre (masse volumique inconnue)	Pas de film	Acier galvanisé, épaisseur 1.27 mm	101.6
ECIB	Acier, épaisseur 0.5 mm	Taux de perforation de 23%.	Laine de roche 70 kg/m ³	Pas de film	Acier, épaisseur 0.75 mm	100
Vephone	Acier, épaisseur 2 mm	Taux de perforation de 28%	Laine de roche 40 kg/m ³	Voile de verre (épaisseur inconnue)	Acier, épaisseur 2 mm	66
Référence	Acier AISI 4340, épaisseur 0.8 mm	Taux de perforation de 23%, diamètre des trous de 2.38 mm, espace entre centres de 4.76 mm	Laine de verre 16.3 kg/m ³	Film de mylar, épaisseur 0.02 mm	Acier, épaisseur 1.2 mm	100

Pour effectuer des comparaisons, plusieurs configurations qui auront la même masse surfacique que l'écran de référence seront testées. Ces écrans seront réalisés avec les matériaux suivants :

- La plaque côté source sera en LLDPE pur car elle devra être perforée. Le taux de perforation ainsi que les dimensions des trous seront identiques à la référence. Seule l'épaisseur de cette plaque variera.

- Le film de protection de l'absorbant sera aussi en LLDPE pur. Ceci permet de conserver une recyclabilité de l'écran. Son épaisseur sera de 0.02 mm et ne variera pas.
- L'absorbant acoustique employé sera le polyester post-consommation. L'épaisseur sera la composante qui variera suivant la configuration.
- La plaque de fond sera un composite LLDPE/billes d'acier dont la fraction de billes pourra varier. L'épaisseur est cependant fixée à 4 mm.

À partir de cela, quatre configurations ont été établies et sont décrites dans le Tableau 4.4. Les caractéristiques mécaniques de tous les matériaux utilisés pour la simulation sont répertoriées en annexe D. Pour cette simulation, les plaques de fond sont modélisées comme des plaques minces, les absorbants comme des fluides équivalents souples, les plaques perforées comme des poreux rigides [76] et les films enveloppant l'absorbant comme des écrans acoustiques imperméables (*impervious screen*).

Tableau 4.4 : Configurations de murs équivalents en masse surfaciques au mur de référence

Config	Plaque perforée de LLDPE	Épaisseur polyester post-consommation (mm)	Épaisseur film de LLDPE (mm)	Plaque de fond	Épaisseur totale (mm)
1	Même caractéristiques de l'écran de référence, épaisseur 6.8 mm	188	0.02	Composite 20% - épaisseur 4mm	198.82
2	Même caractéristiques de l'écran de référence, épaisseur 4 mm	171	0.02	Composite 30% - épaisseur 4mm	179.02
3	Même caractéristiques de l'écran de référence, épaisseur 3 mm	126	0.02	Composite 35% - épaisseur 4mm	133.02
4	Même caractéristiques de l'écran de référence, épaisseur 2 mm	85	0.02	Composite 40% - épaisseur 4mm	91.02

La configuration 1 a été établie pour que chaque élément individuel ait la même masse surfacique que ceux de l'écran de référence (17.3 kg/m^2). Les écrans acoustiques sont donc

modélisés en perte par transmission en champs diffus sur NOVA et les résultats obtenus sont donnés à la Figure 4.17. Afin de mieux observer l'évolution de la perte par transmission, la figure est divisée en deux parties : La première partie couvre la zone fréquentielle 10 Hz – 300 Hz et la seconde la zone 100 Hz – 10 kHz.

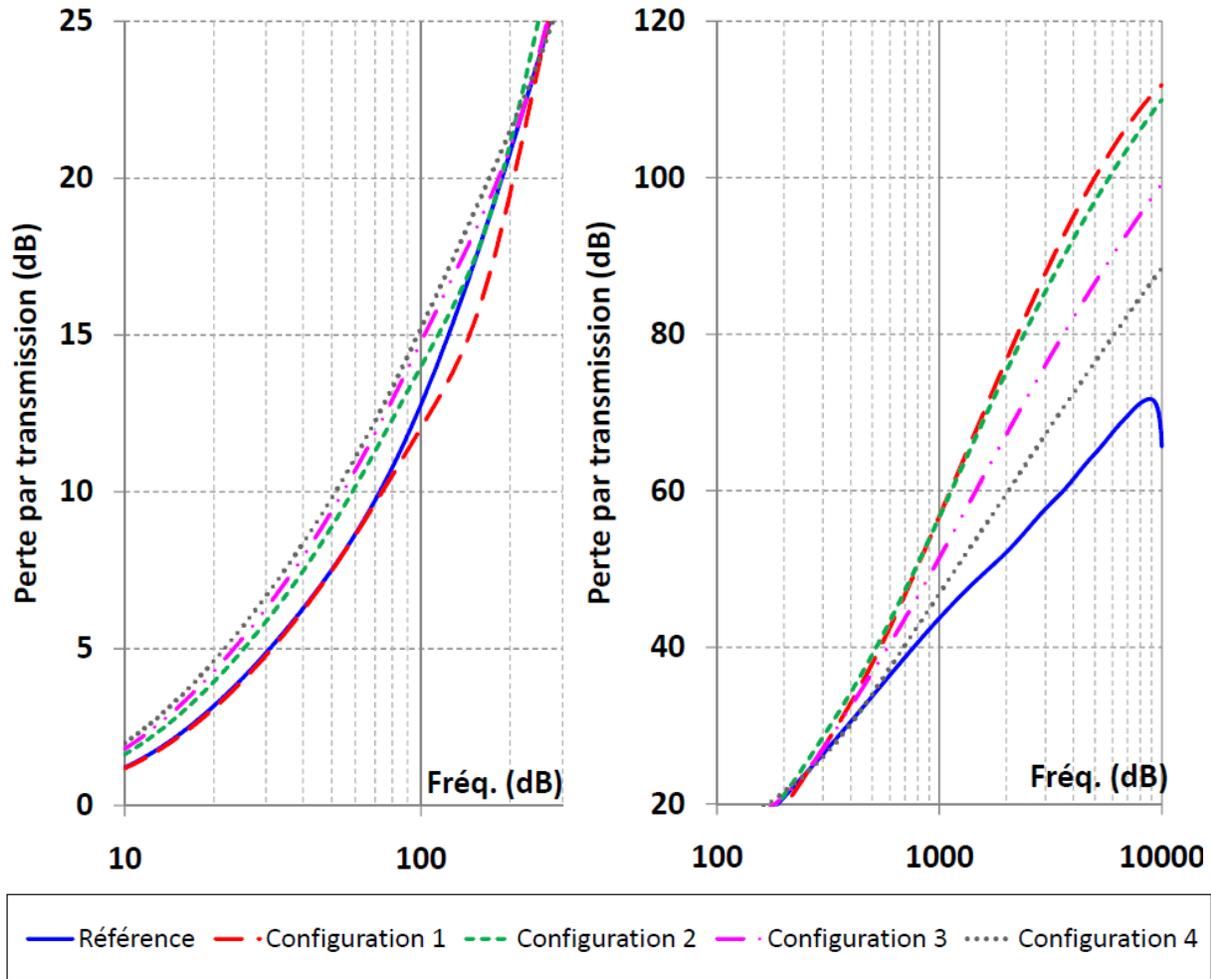


Figure 4.17 : Perte par transmission des différentes configurations d'écran acoustiques absorbants et de l'écran de référence

La première remarque qui peut être faite est qu'à l'exception de la configuration 1 dans la zone 100 – 250 Hz, toutes les autres sont plus performantes que l'écran de référence, spécialement à partir de 300 Hz.

En ce qui concerne les courbes de la perte par transmission des différentes configurations, elles montrent des comportements différents en fonction des zones. En effet, si un classement des configurations les plus performantes est réalisé dans l'ordre décroissant, il advient :

- Dans la zone 10 – 300 Hz : configuration 4, 3, 2 et 1
- Dans la zone 100 – 10 000 Hz : configuration 1, 2, 3 et 4

Il apparaît qu'il n'y a pas de configuration plus performante que les autres sur tout le spectre mais plutôt un choix à faire suivant la signature spectrale du bruit à atténuer. Pour pouvoir discuter plus précisément des résultats et de l'influence de chacun des éléments sur ces derniers, d'autres simulations ont été réalisées :

- Une simulation de l'absorption acoustique « en tube d'impédance » de l'ensemble Plaque perforée – film – absorbant;
- Une simulation de la perte par transmission des plaques de fond.

L'ensemble des résultats est présenté à la Figure 4.18. Les courbes d'absorption montrent clairement que les écrans les plus absorbants correspondent à ceux qui sont les plus performants dans la zone 300 – 10000 Hz. Dans cette zone, c'est l'absorption acoustique qui est prépondérante. Par contre, dans la zone 10 – 300 Hz, c'est la loi de masse de la perte par transmission qui est prépondérante sur l'absorption du matériau acoustique.

Tout ceci montre finalement que si le but est de réduire le bruit en dessous de 500 Hz, il faut plutôt privilégier la masse de l'écran tout en gardant à l'esprit que la masse de l'écran augmentera de manière importante. En ce qui concerne le bruit au-dessus de 500 Hz, l'absorbant acoustique est l'élément important et le fait qu'il ait une faible masse volumique ne pose pas de problème de poids de l'écran.

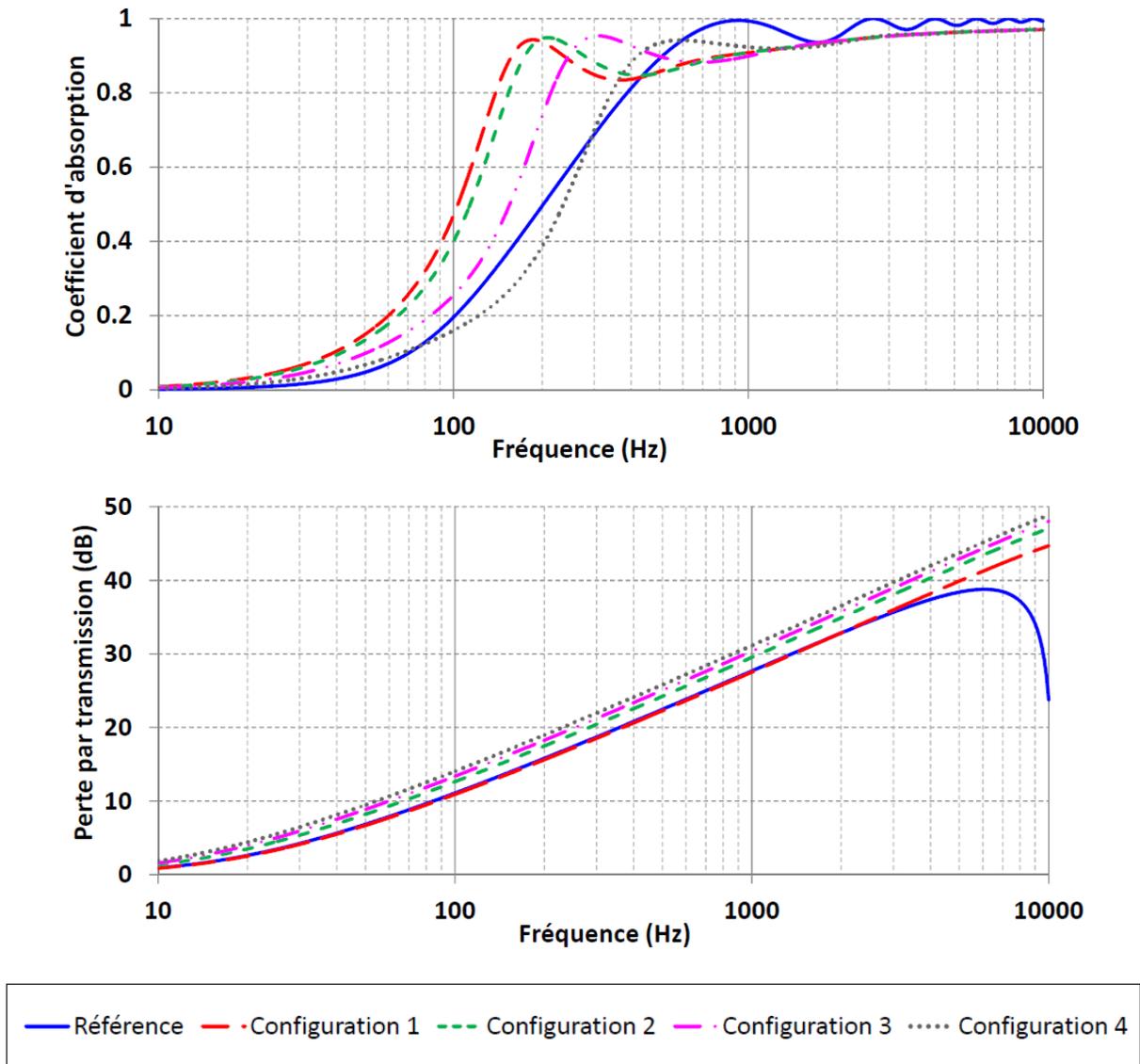


Figure 4.18 : Coefficient d'absorption (haut) et perte par transmission (bas) des différentes configurations simulées

En conclusion de ce chapitre, les simulations ont montrés que le composite LLDPE/billes d'acier peut parfaitement se substituer à ce qui existe en tant que matériau acoustiquement réfléchissant avec l'avantage d'avoir sa fréquence de coïncidence au-delà de 10 kHz. Dans la configuration mur absorbant, il a encore été démontré qu'il fournissait des performances comparables avec ce qui se trouve dans le commerce actuellement.

CHAPITRE 5 CONCLUSION

5.1 Bilan du travail effectué

Cette étude a montré qu'il était possible de réaliser un composite répondant à des critères de recyclage tout en répondant aux caractéristiques mécaniques nécessaires pour obtenir une isolation acoustique adéquate.

Cela a été réalisé en utilisant une matrice thermoplastique, à savoir du polyéthylène basse densité linéaire et des billes de roulement en acier. Grâce à un procédé et une fabrication simple et un traitement mécanique qui l'est tout autant, les composites réalisés ont affiché un module d'élasticité moins élevé que la matrice pure et une masse volumique augmentée de manière significative (2.5 fois la masse volumique pour les composites réalisés et 4 fois la masse volumique en théorie). Le traitement mécanique consiste à appliquer un effort de traction sur les échantillons. Ceci a permis de rompre l'adhésion entre les billes d'acier et le LLDPE. Le fait d'aller jusqu'à une déformation plastique de la matrice a permis de générer des cavités dans lesquelles des billes d'acier se trouvent.

Un modèle théorique simple a permis de prédire le comportement du module d'Young avec l'augmentation de la masse volumique. Il a été comparé à des modèles analytiques empiriques existants et il s'est avéré que le modèle de Sato & Furukawa était le plus proche de tous des résultats obtenus. Cependant, il a nécessité d'ajuster un paramètre d'adhésion pour coller de manière relativement proche à la réalité des échantillons ainsi réalisés. Le modèle analytique développé se base sur le simple fait de la présence d'une cavité rectangulaire vide au centre de la tranche d'une poutre. À la différence de tous les modèles de prédiction du module d'Young de la littérature, il introduit la taille de la particule dans le calcul.

Les simulations acoustiques réalisées dans le dernier chapitre de l'étude ont démontré que c'est un matériau parfaitement viable pour des applications de murs antibruit et dont les performances acoustiques égalent celles des matériaux utilisés habituellement. Les simulations dans des configurations plus complexes (multicouches) comparées à ce qui se fait dans le commerce ont toutefois mis en évidence que le composites ne peut à lui seul assurer les

performances acoustiques. S'il n'est pas associé à de bons matériaux absorbants, il ne pourra se substituer aux écrans conventionnels.

Il faut ajouter également que le composite est facile à recycler. En effet, il suffit de porter à la température de fonte le thermoplastique et de séparer les deux éléments soit par leur différence de masse volumique, soit par magnétisme.

Donc en résumé, le concept de matériau acoustique réalisé à partir de matières recyclées et recyclables répond aux exigences fixées au début de cette étude, à savoir d'augmenter significativement sa masse volumique tout en ayant un module d'Young faible. Le composite réalisé a même dépassé les attentes à ce sujet puisque finalement, avec le procédé utilisé, plus la masse volumique est augmentée, plus le module d'Young est diminué. Ce procédé permet d'obtenir un matériau lourd avec une fréquence de coïncidence au-delà de 10kHz, ce que seuls les vinyles alourdis étaient capable de faire jusqu'alors, la recyclabilité en moins.

5.2 Perspectives

Malgré le fait que le concept réponde largement au cahier des charges fixé au début de cette étude, il reste toutefois des points qui méritent d'être approfondis.

Le premier concerne le procédé de fabrication. Même s'il a été démontré que le taux de cristallinité a peu augmenté pendant le procédé de fabrication, il se révèle utile de déterminer si le fait que les billes d'acier soient insérées entre deux plaques de Polyéthylène est un facteur dans la faible adhésion des billes à la matrice. Il reste aussi à valider la faisabilité au niveau industriel. Ce point est important car à une échelle plus grande, il n'est pas facile de pouvoir effectuer des déformations plastiques.

Cette étude s'est faite également en utilisant une seule dimension de billes d'acier disposées sur un seul plan. Il existe cependant d'autres tailles de billes d'acier et étendre l'étude en associant plusieurs tailles de billes pour augmenter la fraction volumique maximale pourrait encore augmenter les caractéristiques mécaniques souhaitées. Cette étude pourra également

s'intéresser à d'autres types métaux comme ceux qui proviennent des déchets de l'informatique et l'électronique domestique (télévision, ordinateurs, lecteurs CD, DVD, cellulaires,...).

Le processus mécanique consistant à déformer plastiquement la matrice pour créer des cavités autour des billes d'acier contient quelques zones d'ombres à éclaircir. Il est apparu lors des essais de traction que la position des billes revêt une importance certaine en ce qui concerne l'apparition de zones de concentration de contraintes, et donc de striction de la matrice thermoplastique. La disposition aléatoire des billes doit malgré tout comporter des conditions notamment en ce qui concerne la distance entre les billes et par rapport au bord du composite. Ces conditions restent encore à déterminer.

Enfin, l'évaluation des performances acoustiques présentée dans cette étude ne s'est faite que par simulation numériques. Des essais expérimentaux n'ont pas été réalisés pour la bonne et simple raison qu'il n'a pas été possible de fabriquer une plaque suffisamment grande pour être testée en chambre selon la norme ASTM associée. Une poursuite de cette étude devra donc inclure une démarche auprès d'industriels pour valider la faisabilité du procédé de fabrication et la réalisation de plaques dont les dimensions correspondent à la réalité des écrans antibruit actuels.

ANNEXE A

Calcul des dimensions du moule

Pour déterminer les performances mécaniques du LLDPE, il est nécessaire de réaliser des échantillons et de les tester. Ces échantillons devront avoir des dimensions qui, d'une part leur permettront de s'adapter aux moyens d'essais et, d'autre part de respecter la théorie ou les normes de mesures. Une fois les dimensions des échantillons déterminées, un moule sera réalisé. Il sera dimensionné pour que trois échantillons soient extraits de celui-ci. Ceci est fait dans le but de contrôler la variation des résultats de mesure pour une même plaque.

En ce qui concerne l'essai de traction, c'est l'extensomètre qui vient se fixer sur l'échantillon pour déterminer le module d'Young et le coefficient de Poisson. Il est placé sur l'échantillon avec une position d'équilibre de 25 mm et à partir de cette position une mobilité de 2.5 mm en compression et de 5 mm en extension. La mesure du coefficient de Poisson suggère donc que les échantillons aient une largeur de 25 mm. À noter qu'avec une largeur de 25 mm, l'échantillon est toujours entièrement pincé dans les mors. Cet aspect est important car si celui-ci dépasse des mors, un moment pourrait se créer lors de la traction et fausserait la mesure de l'allongement. En ce qui concerne l'épaisseur, l'extensomètre peut se fixer sur des échantillons ayant des valeurs allant jusqu'à 15 mm. En ce qui concerne la longueur, il est nécessaire que l'échantillon soit suffisamment grand pour que l'extensomètre puisse être placé entre les deux mors. En admettant que 25 mm de l'échantillon seront pris dans chacun des deux mors, l'échantillon devra avoir une longueur minimale de 150 mm.

Il est à noter que la norme ASTM D 638 – 03 spécifie des dimensions pour les échantillons qui sont soumis à un essai de traction (Figure A.1). Compte tenu que ces mêmes échantillons seront soumis aussi à des essais de vibrations et nécessitant des échantillons rectangulaires, les spécifications de la norme ne seront pas suivis.

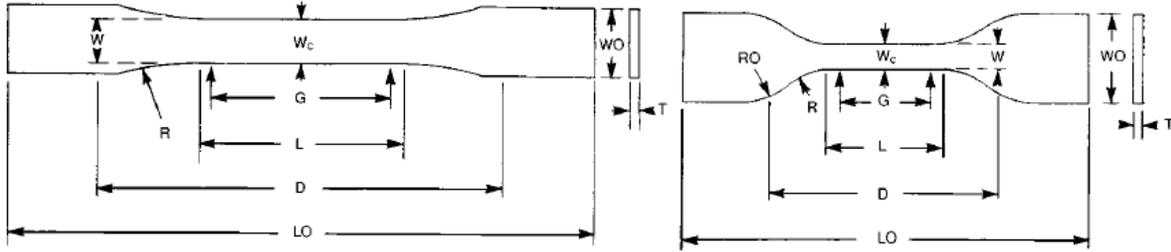


Figure A.1 : Formes des éprouvettes spécifiées par la norme ASTM D 638 - 03

En ce qui concerne la mesure de l'amortissement et accessoirement du module d'Young avec la méthode de la poutre uniforme en vibration, il est nécessaire que les échantillons aient une longueur et une épaisseur adéquates pour qu'il y ait suffisamment de modes sur la bande fréquentielle de mesure. Afin de déterminer la position des modes, il faut alors reprendre la théorie des poutres minces pour déterminer l'expression des fréquences propres en fonction des dimensions géométriques. L'équation homogène du mouvement d'une poutre est de la forme :

$$EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \rho S \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0 \quad (\text{A.1})$$

avec

I ($I = bh^3/12$) Moment quadratique de la poutre (en m^4)

b La largeur de la poutre (en m)

h L'épaisseur de la poutre (en m)

S La section de la poutre (en m^3)

En posant que le déplacement normal $w(x, t)$ est de la forme $w(x)e^{j\omega t}$ et en le remplaçant dans l'expression (A.1), l'expression suivante est obtenue :

$$EI \frac{\partial^4 w(x)}{\partial x^4} - \rho S \omega^2 w(x) = 0 \quad (\text{A.2})$$

À présent, en posant que $w(x) = We^{\lambda x}$, (λ représentant la phase spatiale), en l'insérant dans l'expression (A.2), et en posant que $\lambda = \pm k$ et que $\lambda = \pm jk$, l'équation de dispersion est obtenue

$$\boxed{k^4 = \frac{\rho S}{EI} \omega^2} \quad (\text{A.3})$$

La solution générale de cette équation est une combinaison linéaire de quatre solutions :

$$w(x, t) = [A \cos(kx) + B \sin(kx) + C \cosh(kx) + D \sinh(kx)]e^{j\omega t} \quad (\text{A.4})$$

Pour pouvoir calculer les différents termes, il est nécessaire d'utiliser les conditions aux limites du problème. Dans le cas présent, il s'agit d'une poutre encastree-libre (Figure A.2) :

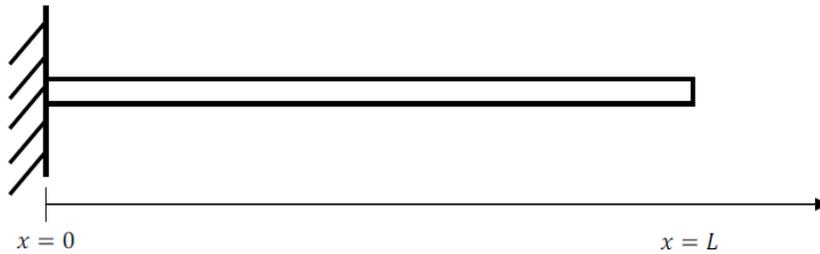


Figure A.2 : Schéma du montage

Les conditions aux limites relatives au problème sont :

$$w(0, t) = 0; \quad \frac{\partial w(0, t)}{\partial x} = 0; \quad \frac{\partial^2 w(L, t)}{\partial x^2} = 0; \quad \frac{\partial^3 w(L, t)}{\partial x^3} = 0$$

En remplaçant successivement les différentes conditions aux limites dans l'expression (A.4), des égalités sont obtenues et les termes A , B , C et D sont obtenus. En les combinant et en simplifiant, l'expression suivante est obtenue :

$$1 + \cosh(kL) \cos(kL) = 0 \quad (\text{A.5})$$

Cette équation est résolue numériquement. Les différentes valeurs obtenues pour le terme kL sont présentés dans le Tableau A.1 :

À partir des termes kL et de l'équation A.5, il est maintenant possible de calculer les fréquences propres du système à partir des dimensions de la poutre :

$$f_n = \frac{(k_n L)^2}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{\rho S L^4}} \quad (\text{A.6})$$

Tableau A.1 : Valeur des termes kL suivant les modes de la poutre

N° du mode	Valeur kL	N° du mode	Valeur kL
1	1.8751	5	14.1372
2	4.6941	6	17.2788
3	7.8548	7	20.4204
4	10.9955	8	23.5619

Au regard de la norme ASTM E 756 – 04, il n’y a pas de spécification pour la longueur et l’épaisseur de la poutre uniforme, seulement une recommandation concernant la longueur de la poutre qui est encastree (entre 10 et 40 mm).

Donc pour pouvoir prédire les fréquences propres f_n il faut évaluer le module d’Young et la masse volumique du matériau. Les calculs vont être réalisés avec les valeurs du Tableau 2.4 et cela sur les quatre premiers modes préférablement. Connaissant la plage de valeurs du module d’élasticité du LLDPE (262 - 517), il faut prendre en compte le fait qu’il varie aussi en fonction du taux de cristallinité. Les cristaux étant comparables à des fibres, la phase amorphe peut être vue comme une matrice et les cristaux comme un renfort. Jansen [63] a établie une équation qui permet de déterminer le module d’Young en fonction du taux de cristallinité. Il y a par ailleurs une bonne corrélation des résultats avec l’expérimental pour le polyéthylène.

$$E = \frac{h + \sqrt{h^2 + 4\lambda E_{cr} E_a}}{2\lambda} \quad (\text{A.7})$$

Avec

$$h = E_{cr}[\alpha(1 + \lambda) - 1] + E_a[(1 - \alpha)(1 + \lambda) - 1]$$

$\lambda = 1.4$ Valeur pour le polyéthylène

E_{cr} Module d’Young de la phase cristalline (en GPa)

E_a Module d’Young de la phase amorphe (en GPa)

α taux de cristallinité (en %)

Cette formule implique de connaître le module d'Young des cristaux. Crist *et al.* l'ont évalué dans une étude à 7 GPa [38]. Cela donne alors une plage de variation possible du module de 0.262 à 3.04 GPa.

Le moyen d'essai disponible au GAUS permet des mesures dans une plage de 0 à 1600 Hz. Idéalement, les calculs de E et η se font sur les 3 ou 4 premiers modes. Il faut donc au moins que les fréquences propres f_1 , f_2 et f_3 se trouvent dans la plage 0 – 1600 Hz.

Pour répondre à cela, les dimensions suivantes sont choisies :

- Largeur de 25 mm
- Longueur de 200 mm
- Épaisseur de 4 mm

ANNEXE B

Optimisation du procédé de fabrication

Avant de réaliser les échantillons avec le moule conçu précédemment, des petites plaques ont été réalisées avec des moules déjà existant. Ces manipulations ont pour but de se familiariser avec le moulage du LLDPE afin d'ajuster le plus possible les différents paramètres qui peuvent entrer en ligne de compte (température, pression, temps de chauffe, etc...). Pour la première plaque, la température de la presse chauffante est fixée à 200°C. Lorsque la presse a atteint cette température, le moule contenant les granules de LLDPE est placé entre les deux plaques de la presse. Le moule reste jusqu'à ce que la température de la presse soit stable. Lors de cette phase, il est observé que la partie supérieure du moule s'est légèrement enfoncée par son propre poids, ceci prouvant la fonte des granules. Quelques minutes sont laissées avant de comprimer le moule sous la presse chauffante pour éjecter de l'intérieur l'excédent de matière. Une pression de 0.7 MPa est appliquée pendant 15 minutes. Le moule est alors placé sur une plaque l'aluminium pour le laisser refroidir. Pour accélérer le refroidissement du moule, un torchon imbibé d'eau est placé sur le dessus du moule et celui-ci est continuellement humidifié avec de l'eau pour éviter la combustion. La plaque alors obtenue contient beaucoup de bulles d'air pour la grande majorité situées sur la périphérie (Figure B.1).

L'air qui était emprisonné entre les granules n'a pas pu s'échapper du moule malgré le fait qu'elle ait migré vers l'extérieur de la plaque. La viscosité du LLDPE est un paramètre qui explique cela. Afin de réduire sa viscosité, la presse sera cette fois-ci chauffée à 260°C, ce qui reste dans la plage d'utilisation du LLDPE.

Il est important de noter également que le LLDPE est un plastique qui a une forte tendance à adhérer aux parois du moule. Des feuilles de téflon sont utilisées et disposées dans le fond et sur le dessus afin d'éviter ce phénomène qui empêche de démouler sans déformer la plaque.

Une deuxième plaque est alors réalisée en respectant la même procédure que précédemment sauf en ce qui concerne la température de chauffe. La plaque ainsi obtenue (Figure B.2) ne présente plus les importantes bulles d'air sur la périphérie mais il en subsiste à l'intérieur de

celle-ci. Il faut noter que sur la première plaque (Figure B.1), ce type de bulles était aussi présent. Elles ne semblent donc pas dues à la viscosité.



Figure B.1 : Plaque de LLDPE obtenue au premier essai

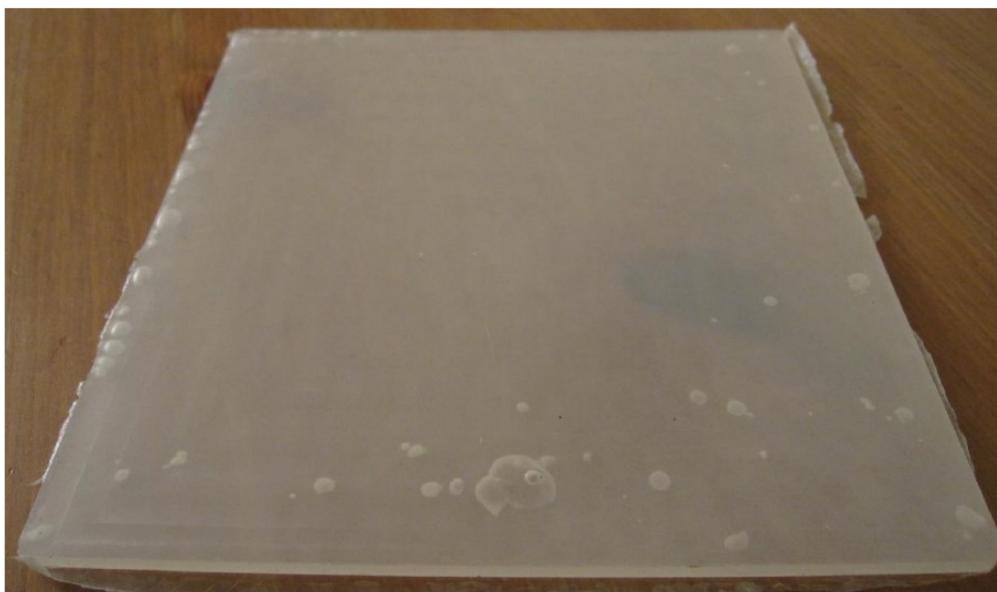


Figure B.2 : Plaque de LLDPE obtenue au second essai

Ceci est dû à un phénomène de dégazage. Ce phénomène se produit lors du passage de l'état liquide à l'état solide et il a tendance à augmenter lorsque le refroidissement est brutal. L'ajout d'un torchon imbibé d'eau peut produire un changement assez soudain. Une troisième plaque est alors réalisée selon le même processus que la seconde plaque. Par contre, le refroidissement ne se fait plus par eau mais par diffusion; lorsque le moule est sorti de la presse chauffante, celui-ci est disposé entre deux plaques d'aluminium de 2 cm d'épaisseur et un ventilateur est placé proche de ce système.

Cette fois-ci aucune bulle n'apparaît dans la plaque, visuellement celle-ci est parfaitement homogène (Figure B.3). Le processus de fabrication semble à présent adapté aux besoins.

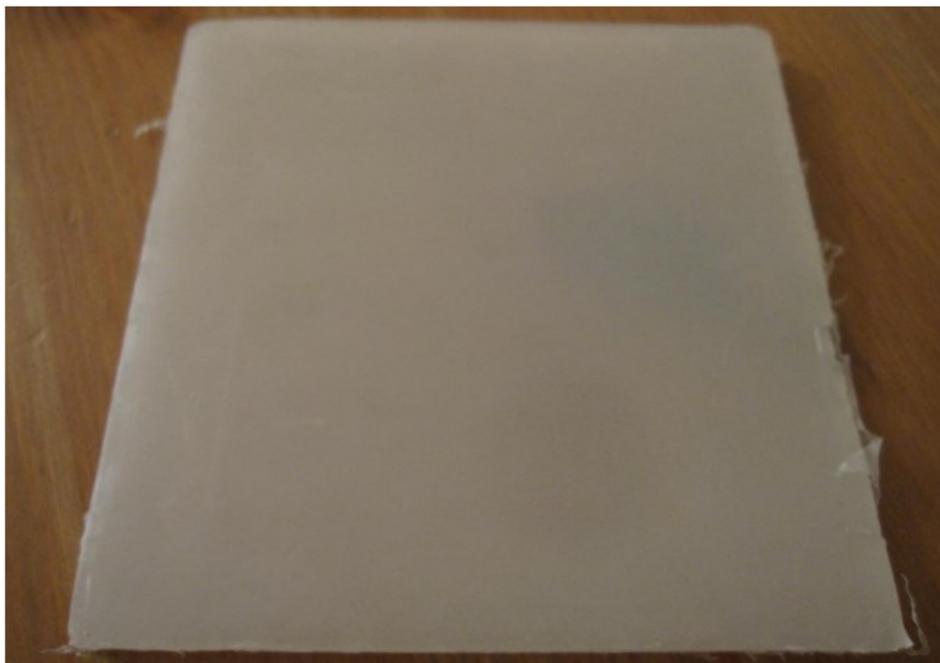


Figure B.3 : Plaque de LLDPE obtenue au troisième essai

Le moule conçu ayant été réalisé, il est alors possible de passer à la réalisation d'une plaque test destinée à la caractérisation. Lors de la fabrication de cette plaque, un nouvel élément est apparu. La quantité de LLDPE étant plus importante que dans le petit moule utilisé pour la réalisation des trois premières plaques, il est nécessaire d'appliquer une pression plus

importante sur le moule pour éjecter l'excédent de matrice thermoplastique. Un autre point important apparaît, c'est la nécessité de laisser refroidir sous la presse le moule. En effet, lorsque le moule est sorti de la presse alors que le LLDPE est encore à l'état liquide, la partie supérieure du moule remonte et la planéité de la plaque est alors compromise. Cette remontée est dû au fait que tout l'excédent de matière n'a pas encore évacué le moule. La fabrication des plaques avec ce moule nécessite alors de laisser refroidir le moule sous la presse ce qui rallonge le processus de fabrication.

ANNEXE C

Explication de la double résonance

Cette annexe a pour but d'expliquer la présence d'un pic de résonance très proche d'un autre. Pour rappel, il s'agit d'une poutre du lot N°2 (poutre 2-2) qui présente cette particularité (Figure C.1). La courbe de la poutre 2-3 semble aussi être affectée par ce phénomène mais de manière moins importante.

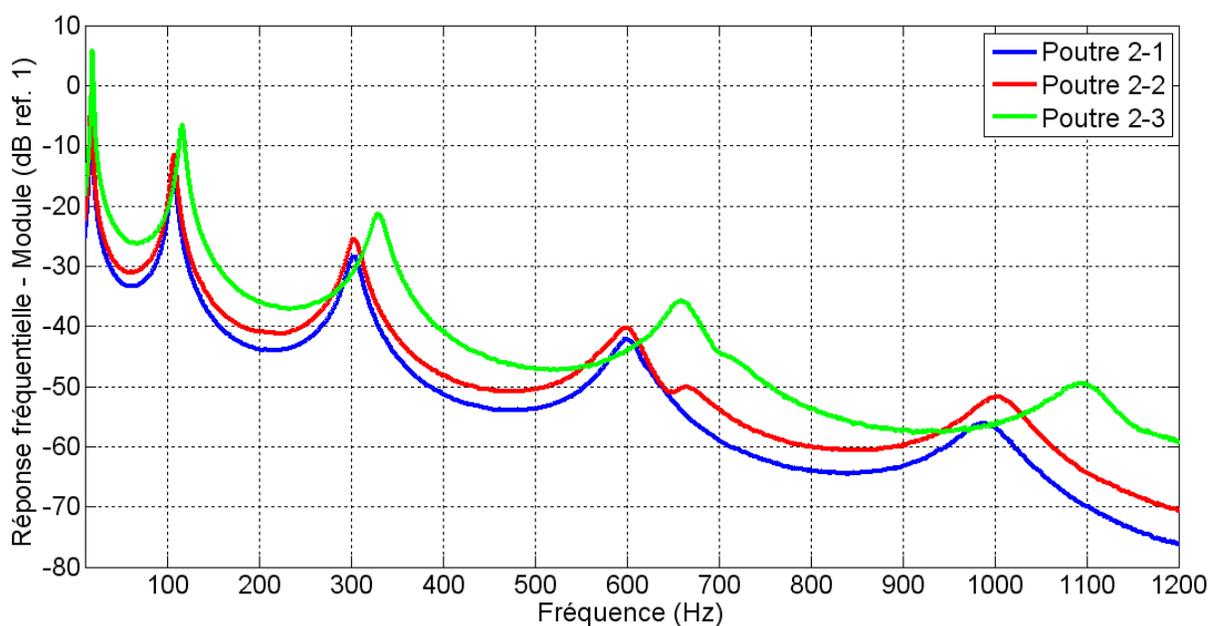


Figure C.1 : Plaque de LLDPE obtenue au troisième essai

Lorsque les données géométriques sont observées (Tableau 3.2), il apparaît que la poutre 2-3 a une largeur de 24 mm, soit 1 millimètre de moins que la valeur prévue. Pour la poutre 2-3, cet écart est de 0.33. L'hypothèse avancée est la suivante :

Le montage est constitué d'un bâti rigide avec une ouverture pour venir fixer la poutre et un exciteur magnétique pour mettre en vibration la poutre testée. L'ouverture du

bâti est alignée avec l'excitateur magnétique pour que celui-ci soit au centre de la largeur de la poutre. De ce fait, un mouvement de flexion est généré sur la poutre (Figure C.2).

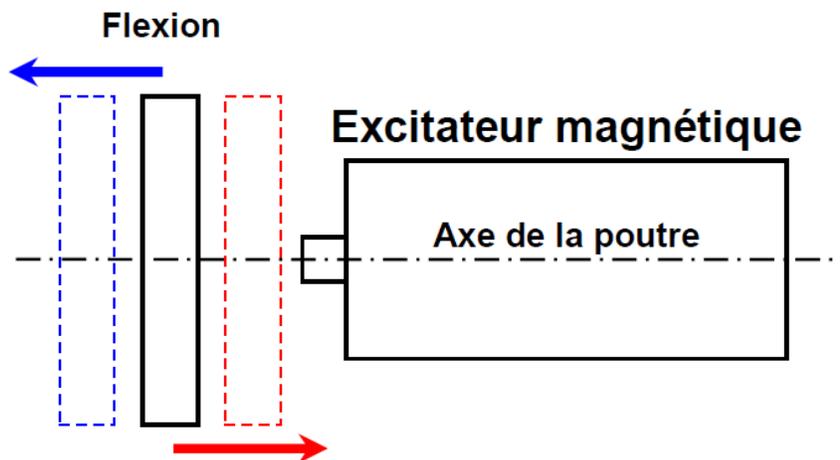


Figure C.2 : Génération du mouvement de flexion sur la poutre

Par contre, si l'excitateur magnétique n'est pas placé dans l'axe de la poutre, un moment sera généré sur la poutre qui induira en plus de la flexion un mouvement de torsion (Figure C.3). La fréquence de résonance à 640 Hz qui apparaît sur la Figure C.1 correspondrait alors à une fréquence propre de torsion.

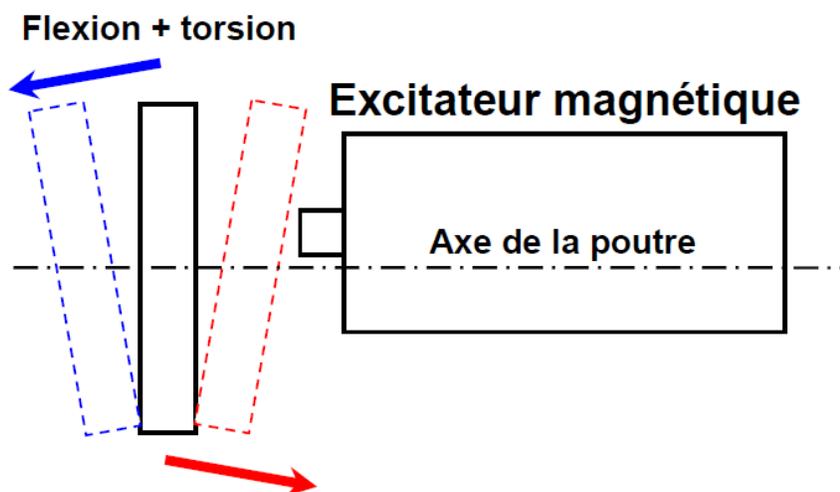
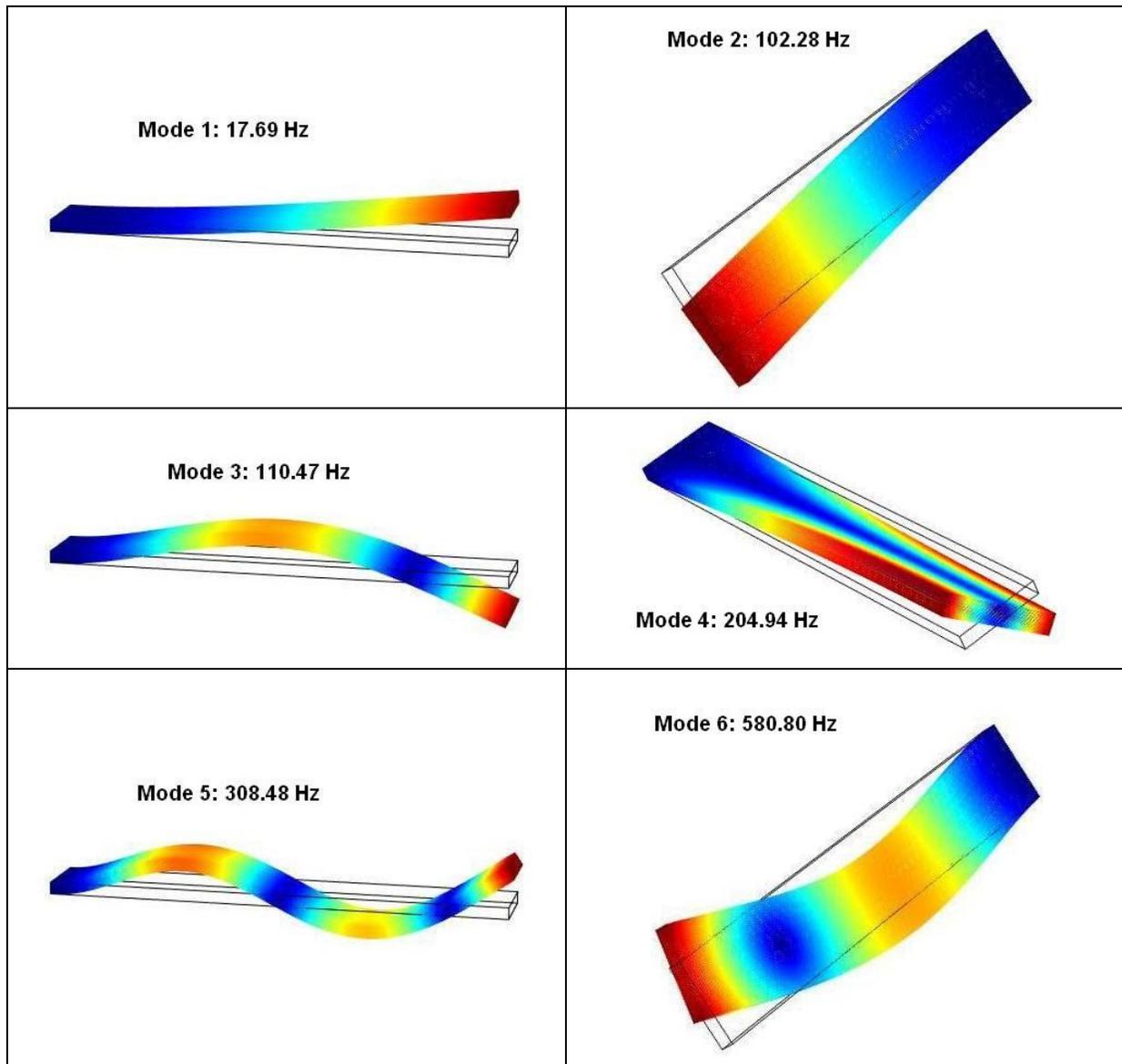


Figure C.3 : Génération du mouvement de flexion et torsion sur la poutre

Pour confirmer cette hypothèse, une étude des fréquences propres de la poutre est nécessaire. Pour pouvoir réaliser cette étude, il est nécessaire de connaître les caractéristiques mécaniques de la poutre 2-2, à savoir la masse volumique, le module d'Young et le coefficient de Poisson (l'amortissement n'est pas nécessaire). Pour ce faire, les données du Tableau 3.3 vont être utilisées pour cela. Le logiciel de simulation multi-physique COMSOL est utilisé pour calculer les 10 premières fréquences propres. Les résultats suivants de la Figure C.4 sont obtenus.



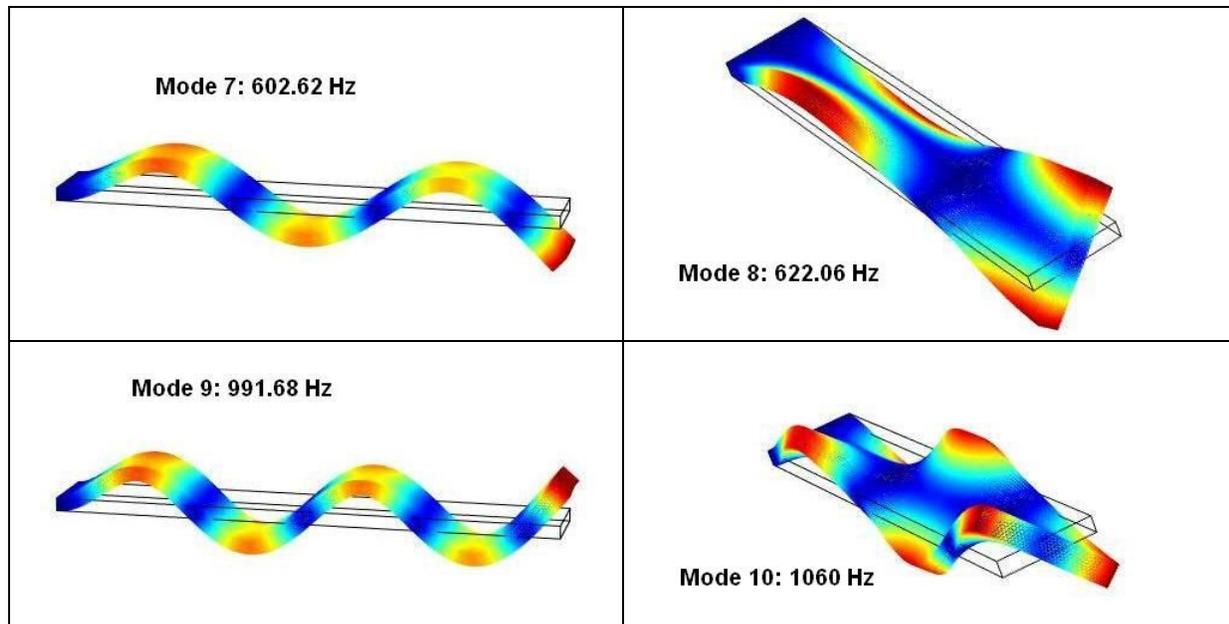


Figure C.4 : Fréquence et déformée des dix premiers modes propres de la poutre 2-2 (simulation COMSOL)

D'après les résultats obtenus, il apparaît que le septième mode (4^{ème} mode de flexion) possède une fréquence très proche du huitième mode (2^{ème} mode de torsion). Ceci correspond tout à fait avec ce qui a été observé sur la Figure C.1. En effet, le 4^{ème} mode de la Figure C.1 correspond bien, du point de vue fréquentiel, à celui obtenu par la simulation. Le pic qui vient perturber la mesure apparaît à environ 660 Hz. Par la simulation, le second mode de torsion est à 622 Hz, ce qui est relativement proche. Donc, le mode observé à 660 Hz correspond bien à un mode de torsion de la poutre généré par le fait que l'excitation vibratoire ne soit pas bien centrée sur la poutre.

ANNEXE D

Compléments d'information des simulations

Cette annexe regroupe le détail des simulations des différentes configurations du chapitre 4.

A - Les thermoplastiques (paragraphe 4.1.1)

Le tableau D.1 détaille des propriétés mécaniques des matériaux utilisées pour effectuer les simulations acoustiques du paragraphe 4.1.1. Il s'agit du LLDPE, du LDPE, du HDPE, du PP, du PS (voir la liste des acronymes en page xvii), et des composites LLDPE/billes d'acier avec des fractions volumiques de 12.3%, 23.2%, 35% et 48%.

Tableau D.1 : caractéristiques mécaniques des matériaux pour la comparaison des thermoplastiques

Matériau	Module d'Young (MPa)	Masse volumique (kg/m³)	Coefficient de Poisson	Amortissement structural
LLDPE	693	922	0.448	0.054
LDPE	283	932	0.457	0.233
HDPE	961	955	0.43	0.0437
PP	1590	908	0.413	0.0281
PS	328	1050	0.403	0.0175
Composite 12.3%	604	1766	0.448	0.06
Composite 23.2%	607	2507	0.448	0.06
Composite 35%	562	3315.3	0.448	0.06
Composite 48%	543	4204	0.448	0.06

En ce qui concerne le LDPE, le HDPE, le PP et le PS, les caractéristiques mécaniques sont issus de la base de données des matériaux CES. Les Tableau 2.3, 2.5 et 2.6 de ce document

répertorie respectivement celles du LDPE, HDPE et du PP. Les valeurs données étant des plages dans laquelle elles oscillent, la valeur maximale sera utilisée.

Les données des composites avec des fractions volumiques de 12.3% et 23.2% proviennent respectivement des valeurs moyennes de mesures des lots N°2 et N°3. Le choix de la valeur du coefficient de Poisson a été explicité dans le chapitre 3.3.1.

Enfin, pour les composites avec des fractions volumiques de 35% et de 48%, le module d'Young est calculé avec le modèle de Sato & Furukawa à l'aide de l'équation (3.8) et la masse volumique avec la loi des mélange (équation 3.9). L'amortissement structural ne variant pas entre les composites à 12.3% et 23.2%, la même valeur est choisie pour les deux autres composites. Le choix de la valeur du coefficient de Poisson a été explicité dans le chapitre 3.3.1. Le tableau D.2 expose quant à lui la configuration de la simulation.

Tableau D.2 : configuration de la simulation

Modèle des panneaux	Plaque mince
Taille des panneaux	Infini
Type de matériaux	isotrope
Milieu	air
Excitation acoustique	Champ diffus (0 - 90°)

B - Matériaux utilisés dans la construction (paragraphe 4.1.2)

Le tableau D.3 détaille les propriétés mécaniques des matériaux utilisés pour effectuer les simulations acoustiques du paragraphe 4.1.2. Il s'agit du béton, du verre, du gypse, du plywood (contreplaqué), et des composites LLDPE/billes d'acier avec des fractions volumiques de 12.3% et 23.2%. Les propriétés mécaniques des éléments de construction sont issues de la banque de donnée des matériaux de NOVA. Celle-ci a été alimentée par la mesure de toutes les caractéristiques mécaniques des éléments qui la compose. Les valeurs de composites à 12.3% et 23.3% de fraction volumique de billes d'acier sont détaillés dans la partie A de cet annexe. La configuration de cette simulation est la même que celle du tableau D.2.

Tableau D.3 : caractéristiques mécaniques des matériaux de la construction et des composites

Matériau	Module d'Young (MPa)	Masse volumique (kg/m ³)	Coefficient de Poisson	Amortissement structural
Béton	25000	2300	0.25	0.01
Verre	62000	2300	0.24	0.08
Gypse	2000	860	0.25	0,01
Plywood	6000	700	0.25	0.01
Composite 12.3%	604	1766	0.448	0.06
Composite 23.2%	607	2507	0.448	0.06

C – Écrans réfléchissants (paragraphe 4.2.1)

Le tableau D.4 détaille des propriétés mécaniques des matériaux utilisées pour effectuer les simulations acoustiques du paragraphe 4.1.2. Pour chacun des écrans, les valeurs du module d'Young (excepté pour le Barymat et le NB-200) et de la masse volumique ont été obtenues d'après les spécifications techniques des constructeurs et distributeurs. Les valeurs de composites à 12.3% et 23.3% de fraction volumique de billes d'acier sont détaillées dans le paragraphe A de cet annexe.

Tableau D.4 : caractéristiques mécaniques des écrans monocouches existants

Matériau	Module d'Young (MPa)	Masse volumique (kg/m ³)	Coefficient de Poisson	Amortissement structural
PARAGLAS SOUNDSTOP[®] GS CC	2800	1190	0.365	0.0148
Soundglaze (polycarbonate)	2300	1200	0.408	0.018
Barymat BM-1A	X	2200	X	X
NB-200	X	3258	X	X
Composite 12.3%	604	1766	0.448	0.06
Composite 23.2%	607	2507	0.448	0.06

Les écrans en plexiglass et polycarbonate (respectivement PARAGLAS SOUNDSTOP® GS CC et Soundglaze) sont modélisés comme des plaques fines. Par contre le Barymat et le NB-200 sont des vinyles alourdis. Ils sont souples et ne se comportent pas comme une plaque. En effet, cette souplesse empêche la création de mode dans ce type de matériaux. Sous NOVA, ils sont donc modélisés comme des écrans acoustiques imperméables (*impervious screen*), c'est-à-dire que seule la masse volumique compte, il n'y a pas d'effet associé au module d'élasticité. Le reste de la configuration de simulation est spécifié dans le tableau D.6.

Le Barymat BM-1A comporte une fine couche d'absorbant acoustique (6.35 mm). D'après les caractéristiques techniques du Barymat BM-1A, il s'agit de mousse de polyuréthane. Le logiciel NOVA comportant ce type de mousse dans sa base de données, il est utilisé pour effectuer la simulation. La valeur des paramètres est donnée dans le tableau D.5. La mousse est modélisée comme un fluide équivalent élastique. Ceci signifie que les vibrations du squelette sont prises en compte. Enfin, elle est considérée comme étant collée à l'épaisseur de vinyle, ce qui implique que le Barymat BM-1A constitue un bicouche. Le tableau D.6 expose les conditions de la simulation.

Tableau D.5 : Propriété de la mousse de polyuréthane utilisée pour la simulation du Barymat BM-1A

Masse volumique (kg/m³)	22
Porosité	0.96
Tortuosité	1.24
Résistance au passage de l'air (Ns/m⁴)	5000
Longueur caractéristique thermique (m)	0.00034
Longueur caractéristique visqueuse (m)	0.000105

Tableau D.6 : configuration de la simulation des écrans réfléchissants

Taille des panneaux	Infini
Type de matériaux	isotrope
Milieu	air
Excitation acoustique	Champ diffus (0 - 90°)

D – Écrans absorbants (paragraphe 4.2.2)

Plaque - air - plaque

La simulation concerne un système double paroi. Les caractéristiques des matériaux utilisés pour cette simulation sont données dans le tableau D.7. Les plaques de cette simulation sont modélisées comme étant des plaques minces. Le tableau D.8 expose les conditions de la simulation. Les caractéristiques mécaniques de l'acier AISI 4340 sont issues de la base de données du logiciel NOVA. Le module d'Young et la masse volumique du composite à 23.2% sont issue des mesures expérimentales de cette étude. Ceux des composites à 10%, 32.5% et 40% sont issus de la simulation avec le modèle de Sato & Furukawa (équation 3.8) pour le module d'Young et (équation 3.9) pour la masse volumique). Le choix de la valeur du coefficient de Poisson et de l'amortissement structural est spécifié dans le paragraphe A de cet annexe.

Tableau D.7 : caractéristiques mécaniques des matériaux pour la simulation d'écrans Plaque – air – Plaque.

Matériau	Module d'Young (MPa)	Masse volumique (kg/m³)	Coefficient de Poisson	Amortissement structural
Acier AISI 4340	211000	7841	0.32	0.007
Composite 10%	658	1606	0.448	0.06
Composite 23.2%	607	2507	0.448	0.06
Composite 32.5%	569	3144	0.448	0.06
Composite 40%	552	3657	0.448	0.06

Tableau D.8 : configuration de la simulation

Modèle des panneaux	Plaque mince
Taille des panneaux	Infini
Type de matériaux	isotrope
Milieu	air
Excitation acoustique	Champ diffus (0 - 90°)

Plaque - absorbant – plaque

La simulation concerne un système double paroi avec un matériau absorbant à la place du gap d'air entre les deux plaques. Il s'agit de la même configuration que pour la simulation plaque – air – plaque sauf que le gap d'air est remplacé par un matériau absorbant. Pour la simulation de référence, c'est de la laine de verre rigide qui sera employée. Ce matériau fait partie de la banque de donnée de NOVA et ses caractéristiques sont données dans le tableau D.9.

Tableau D.9 : Propriété de la laine de verre rigide

Masse volumique (kg/m³)	16.3
Porosité	0.99
Tortuosité	1
Résistance au passage de l'air (Ns/m⁴)	9000
Longueur caractéristique thermique (m)	0.000384
Longueur caractéristique visqueuse (m)	0.000192

En ce qui concerne l'absorbant qui servira pour les simulations avec les composites, il ne fait pas partie de la banque de donnée du logiciel NOVA mais il est disponible au GAUS. Il s'agit du polyester post-consommation qui a été fournis par la société *Leigh fibers* (Figure D.1). C'est un matériau non tissé provenant du déchetage de vêtements usagés. Pour pouvoir l'intégrer à la simulation, ses propriétés doivent être déterminées expérimentalement. Cela va se faire par l'usage d'une mesure en tube de Kundt. En effet, à partir de la mesure de son coefficient d'absorption, une méthode inverse [65] est utilisée pour remonter aux propriétés du matériau.

Le coefficient d'absorption acoustique a été mesuré sur plusieurs échantillons. En effet, cela est nécessaire car le matériau n'étant pas tissé mais se présentant sous forme de mats de fibres, il est impossible de garantir la même quantité de matière pour chacun des échantillons mesurés. Une douzaine de mesures ont donc été effectuées en tube d'impédance en accord avec la norme de mesure ASTM E1050-10 [64].

Les mesures ont été réalisées pour des épaisseurs de 50 mm et dans un tube de diamètre 100 mm. Les résultats des mesures sont donnés sur la Figure D.2.



Figure D.1 : Polyester post-consommation de la société *Leigh fibers*

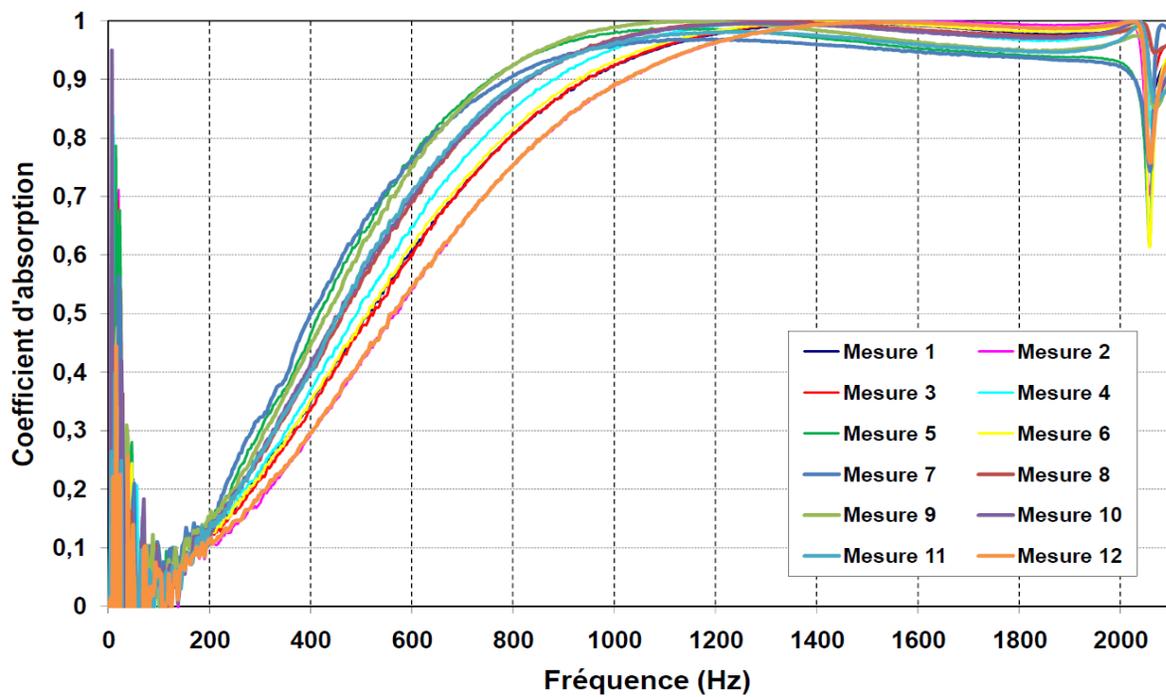


Figure D.2 : Coefficient d'absorption de 12 échantillons de polyester post-consommation

Les résultats des mesures sont alors implémentés dans le logiciel FOAM-X [77] développé par la société Mecanum inc. et distribué par ESI-Group. Ce logiciel permet de caractériser les propriétés de Biot des matériaux poreux à cellules ouvertes en se basant sur la mesure en tube d'impédance et en implémentant une méthode inverse [65]. Dans notre cas, FOAM-X est configuré pour retrouver les caractéristiques d'un fluide équivalent souple dans le cas d'un fibreux. Les données de la phase fluide obtenues par le logiciel FOAM-X sont données dans le tableau D.10.

Tableau D.10 : Propriétés du polyester post-consommation déterminées avec le logiciel FOAM-X

Masse volumique (kg/m³)	10
Porosité	0.811
Tortuosité	1
Résistance au passage de l'air (Ns/m⁴)	25662
Longueur caractéristique thermique (m)	0.00183
Longueur caractéristique visqueuse (m)	0.000501

À partir de la caractérisation de FOAM-X avec la méthode inverse, une simulation NOVA du coefficient d'absorption acoustique du polyester post-consommation a été réalisée afin de contrôler si la caractérisation s'est bien effectuée. La simulation est réalisée pour une épaisseur de 50 mm et est comparé aux mesures (Figure D.3). Il apparaît que la simulation est statistiquement conforme aux mesures réalisées.

Concernant la simulation des écrans, il s'agit d'un multicouche composé de trois couches collées les unes aux autres. Les plaques sont modélisées comme des plaques minces et les absorbants comme des fluides équivalents souples, c'est-à-dire que les mouvements du matériau en basse fréquence est pris en compte dans la simulation. Les conditions de simulations sont les mêmes que celles exposées dans le tableau D.6.

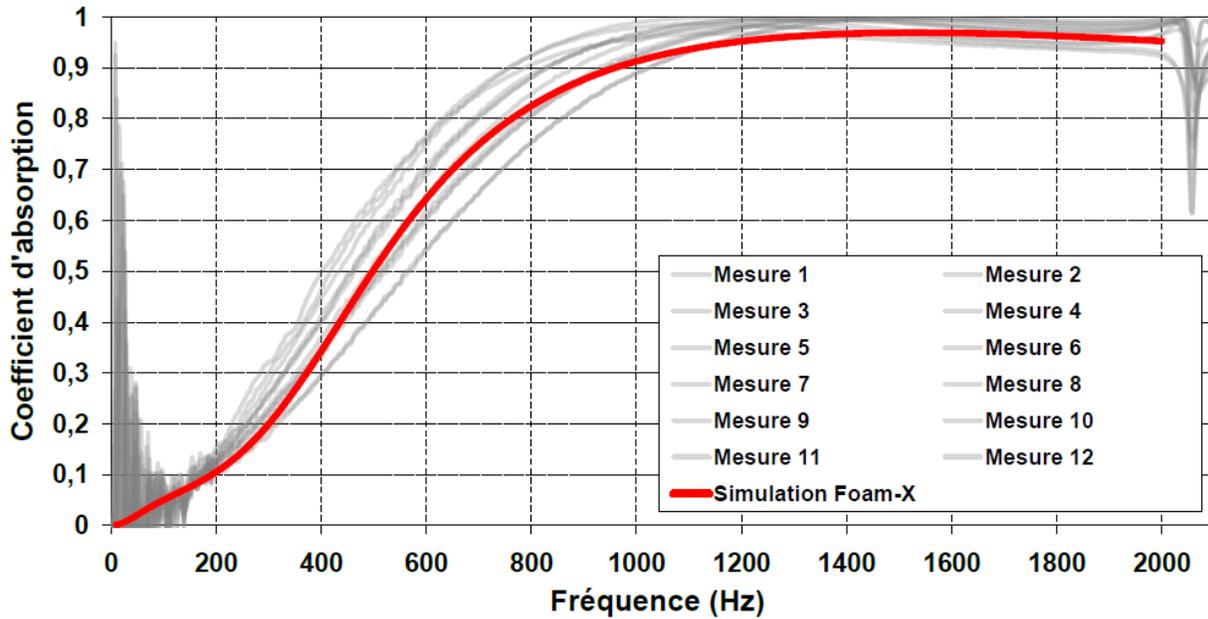


Figure D.3 : Coefficient d'absorption du polyester post-consommation de 50 mm d'épaisseur.
Comparaison entre les mesures en tube d'impédance et la simulation

Plaque perforée - absorbant – plaque

La structure des écrans qui seront testés est plus complexe car il y a cette fois-ci d'autres catégories de matériaux qui apparaissent, à savoir des plaques perforées et des films de protections. Le tableau D.11 répertorie les caractéristiques mécaniques des matériaux qui seront modélisés comme des plaques minces.

Tableau D.11 : caractéristiques mécaniques des plaques minces

Matériau	Module d'Young (MPa)	Masse volumique (kg/m ³)	Coefficient de Poisson	Amortissement structural
Acier AISI 4340	211000	7841	0.32	0.007
Composite 20%	614	2290	0.448	0.06
Composite 30%	577	2973	0.448	0.06
Composite 35%	562	3315.3	0.448	0.06
Composite 40%	552	3657	0.448	0.06

Les caractéristiques mécaniques des composites à 20%, 30%, 35% et 40% sont issus de la simulation avec le modèle de Sato & Furukawa (équation (3.8) pour le module d'Young et (équation (3.9) pour la masse volumique). Le choix de la valeur du coefficient de Poisson et de l'amortissement structural est spécifié dans le paragraphe A de cet annexe. Ces matériaux sont modélisés comme des plaques minces.

Les caractéristiques des plaques perforées utilisées dans la simulation sont les mêmes tant pour l'écran de référence que pour les écrans des quatre configurations avec composites, à savoir :

- Taux de perforation de 23%
- Diamètre des perforations de 2.38 mm
- Espace entre le centre des perforations de 4.76 mm

Seuls le type de matériau et l'épaisseur change (voir Tableau 4.3 et Tableau 4.4). Pour l'écran de référence, c'est de l'acier AISI 4340 qui est utilisé (voir propriété tableau D.11) et pour les écrans composites, c'est du LLDPE (voir propriété tableau D.1). Ces matériaux sont modélisés comme un matériau poreux rigide [76].

En ce qui concerne les matériaux absorbants, leur propriétés sont déjà connues (tableau D.9 pour la laine de verre rigide et tableau D.10 pour le polyester post-consommation). Ces matériaux sont modélisés comme des fluides équivalents souples.

Pour finir, les films de mylar et de LLDPE sont modélisés comme des écrans acoustiques imperméables (*impervious screen*). Ces matériaux sont uniquement représentés par leurs masses volumiques : 1392 kg/m^3 pour le mylar et 922 kg/m^3 pour le LLDPE.

Les éléments sont considérés comme étant collés les uns aux autres sauf la plaque perforée et le film de protection de l'absorbant.

LISTE DES RÉFÉRENCES ET LIENS

- [1] *Standard test method for laboratory measurement of airborne sound transmission loss of building partitions and elements*, ASTM International E 90 - 04, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, USA, 2004.
- [2] *Standard test method for laboratory measurement of airborne sound transmission loss of building partitions and elements using sound intensity*, ASTM International E 2249 - 02, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, USA, 2002.
- [3] Développé par l'Université de Sherbrooke, le logiciel Nova permet de calculer les propriétés acoustiques de panneaux multicouches de dimensions latérales infinies par la méthode des matrices de transfert : <http://www.esi-group.com/products/vibro-acoustics/VA%20One%20Modules/nova>
- [4] Lesueur, C. (1988). *Rayonnement acoustique des structures, Vibro-acoustique, Interactions fluide-structure*. Édition Eyrolles, Paris, France.
- [5] Fahy, F. J. (1985). *Sound and Structural Vibration*. Édition Academic Press Inc., London, UK.
- [6] Atalla, N. (2009). *Compléments Transmission Acoustique des parois infinies*, Notes de cours GMC 721: Rayonnement Acoustique des Structures, Université de Sherbrooke, Canada.
- [7] Rosato, D. V. (2004). *Reinforced Plastics Handbook*, 3^{ème} édition. Édition Elsevier Science, Oxford, New-York, USA, 1082 p.
- [8] (2009) *The Compelling Facts About Plastics 2009: An analysis of European plastics production demand and recovery for 2008*, PlasticsEurope, Bruxelles, Belgique.
- [9] Natural Resources Canada. *Guide to energy efficiency opportunities in the Canadian plastics processing industry*, <http://oee.nrcan.gc.ca/industrial/technical-info/benchmarking/plastics/documents/plastics-guide-english-january-2008.pdf> (page consultée le 12 janvier 2011).
- [10] Lesueur, F. (2001). *Key Factors for a Sustainable Approach to Plastics Recovery*, Dessau-Soprin, mandated by Environment and Plastics Industry Council & Recyc-Québec, Montréal, Canada.
- [11] Bitsch, B. (2003). Amélioration des thermoplastiques- Rôle du compoundeur, *Technique de l'Ingénieur, traité Plastiques et Composites*, (p. 1-14). Paris, Éditions Techniques de l'ingénieur.

- [12] Naudin, C.-A., Clozza, C. (1987). Charges, *Technique de l'Ingénieur, traité Plastiques et Composites*, (p. 1-11). Paris, Éditions Techniques de l'ingénieur.
- [13] Brostow, W., Buchman, A., Buchman, E., Olea-Mejia, O. (2008). Microhybrids of metal powder incorporated in polymeric matrices: friction, mechanical behavior and microstructure. *Polymer Engineering and Science*, volume 46, issue 10, p. 1977 – 1981.
- [14] Luyt, A.S., Molefi, J.A., Krump, H. (2006). Thermal, mechanical and electrical properties of copper powder filled low-density and linear low-density polyethylene composites. *Polymer Degradation and Stability*, volume 91, issue 7, p. 1629 – 1636.
- [15] Nurazreena, Hussain, L.B., Ismail, H., Mariatti, M. (2006). Metal filled high density polyethylene composites – Electrical and tensile properties. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, volume 19, issue 4, p. 413 – 425.
- [16] Gungot, A. (2007). Mechanical properties of iron powder filled high density polyethylene composites. *Materials & Design*, volume 28, p. 1027 – 1030.
- [17] Shao-Yun, F., Xi-Qiao, F., Bernd, L., Yiu-Wing, M. (2008). Effects of particle size, particle/matrix interface adhesion and particle loading on mechanical properties of particulate–polymer composites. *Composites Part B: engineering*, volume 39, issue 6, p. 933 – 961.
- [18] Vollenberg, P. H. T., Heikens, D. (1989). Particle size dependence of the Young's modulus of filled polymers: 1. Preliminary experiments. *Polymer*, volume 30, issue 9, p. 1656 – 1662.
- [19] Kinetics Noise Control. *Kinetics™ Barrier Materials, Model KNM*, <http://www.kineticsnoise.com/industrial/pdf/knm.pdf> (page consultée le 7 février 2011).
- [20] Shannon enterprise of W.N.Y. Inc. *Acoustic blanket insulation for sound attenuation*, <http://www.blanket-insulation.com/HTML/acoustic.html> (page consultée le 7 février 2011).
- [21] Harder Luckey & Hargrave Inc. HLH Walls. *Industry Noise Barrier Wall Solutions*. <http://www.hlhwalls.com/index.html> (page consultée le 2 décembre 2009).
- [22] DuPont. The Miracle of Science. *DuPont™ Keldax® sound Barrier resins* http://www2.dupont.com/Keldax/en_US/ (page consultée le 12 janvier 2011).
- [23] Cummings, A., Beadle, S. P. (1993). Acoustic Properties of reticulated Plastic foam, *Journal of Sound and Vibration*, volume 175, issue 1, p.115-133.
- [24] Khan, A., Patel, R., Benkreira, H., Horoshenkov, K. V. (2006). Extrusion of recycled polymeric granulates and fibrous particles for acoustic applications, *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, Tampere, Finland.
- [25] Murugan, D., Varughese, S., Swaminathan, T. (2006). Recycled polyolefin-based plastic wastes for sound absorption, *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, volume 45, issue 7, p. 885–888.

-
- [26] Subramonian, S., Remy, L., Schroer, D. (2004). Acoustics and forming of novel polyolefin blend foams, *Cellular Polymers*, volume 32, issue 6, p. 349–367.
- [27] McRae, J. D., Naguib, H. E., Atalla, N. (2009). Mechanical and acoustic performance of compression-molded open-cell polypropylene foams, *Journal of Applied Polymer Science*, volume 116, issue 2, p. 1106–1115.
- [28] Ootsuta, K., Tani, S. (1996). The application of sound-absorbent plastic to acoustic paneling, *Mitsubishi Electric Advance*, volume 74, p. 18-20.
- [29] Lu, E., Ni, Q-Q., Kozu, T., Iwamoto, M. (2006). Development of flexible sound-proof materials, *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, volume 55, issue 6, p. 583-588.
- [30] Choi, J.-W., Hwang, Y. (2010). Preparation and sound insulation properties of thermoplastic elastomer composites with CaCO₃ filler, *Korean Journal of Materials Research, Japan*, volume 20, issue 9, p. 467-471.
- [31] *Standard Test Methods for Tensile Properties of Plastics*, ASTM International D 638 - 08, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, USA, 2008.
- [32] Krawczak, P. (1999). *Essais mécaniques des plastiques - Caractéristiques instantanées, Technique de l'Ingénieur*, traité Plastiques et Composites, (p. 1-20). Paris, Éditions Techniques de l'ingénieur.
- [33] *Plastiques – Détermination des propriétés en traction – Partie 2: conditions d'essai des plastiques pour moulage et extrusion*, NF EN ISO 527-2, Groupe AFNOR, Paris, France, 1996.
- [34] *Standard Test Methods for Measuring Vibration-Damping Properties of Materials*, ASTM International E 756 - 04, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, USA, 2004.
- [35] *Standard Test Method for Density of Plastics by the Density-Gradient Technique*, ASTM International D1505 - 10, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, USA, 2010.
- [36] Gao, S.-L., Kim, J.-K. (2000). Cooling rate influences in carbon fibre/PEEK composites. Part 1. Crystallinity and interface adhesion. *Composites Part A (Applied Science and Manufacturing)*, volume 31, issue 6, p. 517 – 530.
- [37] Elmajdoubi, M., Vu-Khanh T. (2003). Effect of cooling rate on fracture behavior of polypropylene. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, volume 39, issue 2, p. 117-126.
- [38] Crist, B., Fisher, C.J., Howard, P.R. (1989). Mechanical properties of model polyethylenes: tensile elastic modulus and yield stress. *Macromolecules*, volume 22, issue 4, p. 1709–1718.

- [39] Einstein, A. (1956). *Investigations on the Theory of Brownian Movement*, Dover Publications (June 1, 1956), New York, USA, 122 p.
- [40] Kerner, E. H. (1956). The elastic and thermo-elastic properties of composite media, *Proceedings of the Physical Society*, volume 69B, issue 8, p. 808-813.
- [41] Thomas, D.G. (1965). Transport characteristics of suspension: VIII. A note on the viscosity of Newtonian suspensions of uniform spherical particles, *Journal of Colloid Science*, volume 20, p. 267-277.
- [42] Guth, E. (1945). Theory of filler reinforcement, *Journal of Applied Physics*, volume 16, issue 1, p. 21-25.
- [43] Smallwood, H.M. (1944). Limiting law of the reinforcement of rubber, *Journal of Applied Physics*, volume 15, issue 11, p. 758-766.
- [44] Nielsen L. E. (1970). Generalized equation for the elastic moduli of composite materials, *Journal of Applied Physics*, volume 41, issue 11, p. 4626 - 4627.
- [45] Lewis, T.B., Nielsen L. E. (1970). Dynamic mechanical properties of particulate-filled composites, *Journal of Applied Polymer Science*, volume 14, issue 6, p. 1449 - 1471.
- [46] Hashin, Z., Shtrikman, S. (1963). A variational approach to the theory of the elastic behaviour of multiphase materials, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, volume 11, issue 2, p. 127-140.
- [47] Sato Y., Furukawa J. (1962). A molecular theory of filler reinforcement based upon the internal deformation, *Journal of the Faculty of Textile Science and Technology*, Shinshu University, volume 35F, p. 1-26.
- [48] Ghassemieh, E. (2010). Finite element analysis of interfacial friction and slip in composites with fully unbonded filler, *The Journal of Adhesion*, volume 78, issue 4, p. 271-295.
- [49] Sjogren, B.A., Berglund, L.A. (1997). Failure mechanisms in polypropylene with glass beads, *Polymer Composites*, volume 18, issue 1, p. 1-8.
- [50] Zhao, Y.H., Weng, G.J. (1997). Transversely isotropic moduli of two partially debonded composites, *International Journal of Solids and Structures*, volume 34, issue 4, p. 493-507.
- [51] Kausch, H.H., Beguelin, P., Fischer, M. (2000). Failure of particulate reinforced polymers, *Mechanics of Composite Materials*, volume 36, issue 3, p. 177-184.
- [52] Liang, J.Z., Li, R.K.Y. (1998). Effect of filler content and surface treatment on the tensile properties of glass-beads-filled polypropylene composites, *Polymer International*, volume 49, issue 2, p. 170-174.
- [53] Nicolais, N., Narkis, M. (1971). Stress-strain behavior of styrene-acrylonitrile/glass beads composites in the glassy region, *Polymer Engineering and Science*, volume 11, issue 3, p. 194-199.

- [54] Liang, J.Z., Li, R.K.Y. (1998). Mechanical properties and morphology of glass bead filled-polypropylene composites, *Polymer Composites*, volume 19, issue 6, p. 698-703.
- [55] Meinecke, E.A., Clark, R.C. (1973). *Mechanical properties of polymeric foams*, Technomic Publishing Co., Westport, USA.
- [56] Moore, D.R., Couzens, K.H., Iremonger, M.J. (1974). Deformational behaviour of foamed thermoplastics, *Journal of Cellular Plastics*, volume 10, issue 3, p. 135-139.
- [57] Lederman, J.M. (1971). The prediction of tensile properties of flexible foams, *Journal of Applied Polymer Science*, volume 15, issue 3, p. 693-703.
- [58] Ogorkiewicz, R.M., Sayigh, A.A.M. (1972). Deflection of polypropylene sandwich mouldings under bending loads, *Plastics and Polymers*, volume 40, issue 146, p. 64-69.
- [59] Gibson, L.J., Ashby, M.F. (1982). The mechanics of three-dimensional cellular materials, *Proceedings of the Royal Society of London, Series A (Mathematical and Physical Sciences)*, volume 382, issue 1782, p. 43-59.
- [60] Allard, J.-F., Attala, N. (2009). *Propagation of sound in porous media: Modeling sound absorbing materials*, Second Edition, New-York, Elsevier Applied Science.
- [61] Josse, R. (1982). Bruit du trafic routier, Rapin, J.-P. *REEF Acoustique - volume II - Science du Bâtiment*, Centre Scientifique et Technique du Bâtiment, Grenoble, France, p.108-124.
- [62] Sound Fighter® Systems. *Sound Walls: Absorptive versus reflective design and effectiveness*. [http://www.soundfighter.com/pdf/Absorptive versus Reflective Noise Barriers.pdf](http://www.soundfighter.com/pdf/Absorptive%20versus%20Reflective%20Noise%20Barriers.pdf) (page consultée le 12 janvier 2011).
- [63] Jansen, J. (1992). Elastic moduli of semicrystalline polyethylenes compared with theoretical micromechanical models for composites. *Polymer Engineering & Science*, volume 32, issue 17, p. 1242 – 1254.
- [64] *Standard test method for impedance and absorption of acoustical materials using a tube, two microphones and a digital frequency analysis system*, ASTM International E 1050 - 10, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, USA, 2010.
- [65] Attala, Y., Panneton, R. (2005). Inverse Acoustical Characterization of Open Cell Porous Media Using Impedance Tube Measurements. *Canadian Acoustics*, vol. 33, issue 1, p. 11 – 24.
- [66] Evonik Industries (2011). *Acrylite, PARAGLAS SOUNDSTOP® Noise Barrier*. <http://www.acrylite.net/product/acrylite/en/products/sheet/noise-barrier/pages/default.aspx> (page consultée le 23 avril 2011).
- [67] GE Structured Products (2011). *Polycarbonate sheet for sound screens – Lexan SoundGlaze SC*, [http://www.thesun.com.hk/PDF/Soundglaze\(1\).pdf](http://www.thesun.com.hk/PDF/Soundglaze(1).pdf) (page consultée le 23 avril 2011).

- [68] Soundtrap Noise control (2011). *Barymat BM-1A et BM-1C*, http://www.soundtrap.ca/_mndata/soundtrap2/uploaded_files/BARYMAT%20BM-1A%20&%20BM-1C.pdf (page consultée le 23 avril 2011).
- [69] AcoustiGuard Sound and Vibration Control for Buildings (2011), *MASS LOADED VINYL - Noise-Blok Datasheet*, <http://www.acoustiguard.com/Barrier-materials/mass-loaded-vinyl/> (page consultée le 23 avril 2011).
- [70] Kinetiks Noise Control (2011), *Sound Barrier Wall Panels, Featuring NOISEBLOCK™*, http://www.kineticsnoise.com/industrial/sound_barriers.html (page consultée le 23 avril 2011).
- [71] Leigh – Recycling Solutions for generations (2011), *materials for reuse*, <http://www.leighfibers.com/> (page consultée le 26 avril 2011).
- [72] ECIB – le silence clé en main (2011), *Panneau acoustique ECIB - Epaisseur 100 mm*, <http://www.ecib-bruit.com/fiches/Panneau%20acoustique%20ECIB%20100.pdf>, (page consultée le 26 avril 2011).
- [73] Criteria (2011), *Écrans acoustiques*, www.acoustock.com, (page consultée le 26 avril 2011).
- [74] Ventsys (2011), *Panneau acoustique - Panneau acoustique VEPHONE*, <http://insonorisation.ventsys.net/panneau-acoustique-r21.html>, (page consultée le 26 avril 2011).
- [75] Kinetiks Noise Control (2011), *Noise Control Solutions with Noiseblock Barrier Wall Systems*, http://www.kineticsnoise.com/industrial/pdf/barrier_wall.pdf, (page consultée le 26 avril 2011).
- [76] Attala, Y., Sgard, F. (2007). Modelling of perforated plates and screens using rigid frame porous models. *Journal of sound and vibration*, volume 303, issue 1-2, p. 195 – 208.
- [77] Développé par l'Université de Sherbrooke, le logiciel Foam-X permet de caractériser les propriétés de Biot des matériaux poreux à cellules ouvertes en se basant sur la mesure en tube d'impédance et en implémentant une méthode inverse : <http://www.esi-group.com/products/vibro-acoustics/VA%20One%20Modules/foam-x?searchterm=foam>