1. GÉNÉRALITÉ SUR LE SUJET

1.1 Introduction

Le défi de concevoir une structure aussi légère que possible sans sacrifier la résistance est fondamental dans beaucoup d'applications d'ingénierie et principalement dans l'industrie aéronautique. Inévitablement, cette exigence impose la nécessité de stabiliser et de renforcer les surfaces minces pour leur permettre d'endosser des efforts souvent complexes et combinés. La conception traditionnelle des structures a continué d'inventer de nouvelles solutions pour résoudre cette difficulté en utilisant, par exemple, des raidisseurs longitudinaux et des anneaux de stabilisation. Mais les solutions proposées ont souvent manqué d'agrément dans leurs conceptions, surtout que le simple fait d'utiliser des paires de peaux fines avec un milieu stabilisateur entre les deux faces est, dans plusieurs situations, plus efficaces que de stabiliser une surface en créant une résistance aux forces déformantes.
Pour évaluer une nouvelle structure, le concepteur doit prendre en compte un certain nombre de considérations importantes. La nouvelle structure doit être économique, et de pouvoir fonctionner, fiable et confortable. Il existe évidemment plusieurs façons de satisfaire ces exigences et le matériau de construction joue là un rôle prépondérant.

La raison la plus répandue pour l'utilisation des matériaux sandwich est le gain de poids. Cependant, il existe d'autres raisons : coût, stabilité, sureté, résistance au choc, durée de vie, propriétés à la fatigue, dégradation à l'environnement, bruit, isolation thermique, plus grande capacité de charge, maintenance réduite et facilitée de réparation, utilisation maximale du volume intérieur et parois intérieures propres. Le prix du matériau sandwich en lui-même est un peu plus élevé que l'acier, mais sur certains types et exigences de structures, le prix de la construction peut être très compétitif surtout si l'on considère les économies engendrées à long terme à savoir :

- Moins de maintenance de la structure grâce au choix de matériaux inertes
- Moins de dommages à la structure en cas d'échouage.

Les matériaux sandwich sont composés de plusieurs parties interagissant entre elles. On trouve donc les peaux ou semelles ayant des caractéristiques mécaniques propres et le cœur ou âme pouvant être entre autres en nid-d'abeilles ayant des propriétés mécaniques spécifiques. L'assemblage de ces deux parties se réaliser par collage, soudage ou brasage mettant en jeu un autre corps de comportement différent.

1.2 Sandwich à cœurs en nid-d'abeilles

Un panneau sandwich en nid-d'abeilles typique, se compose de deux couches minces et rigides formants les « peaux », collées par un adhésif sur un noyau épais et léger (figure 1.1), constitué généralement de mailles hexagonales [1], réalisées à partir de différents matériaux par exemple le papier, les mousses polymères ou l'aluminium (figure 1.2).

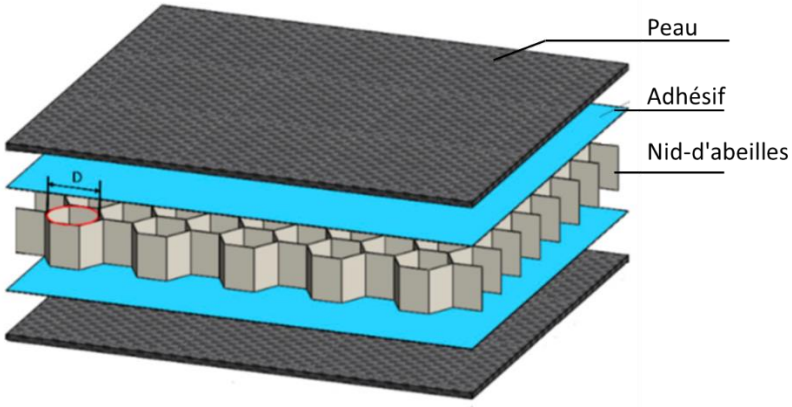


Fig. 1.1 Panneaux sandwichs à cœur en nid d'abeille hexagonal.

L'objectif d'un tel procédé est de constituer une structure permettant de raccommoder la légèreté et la rigidité au même temps.

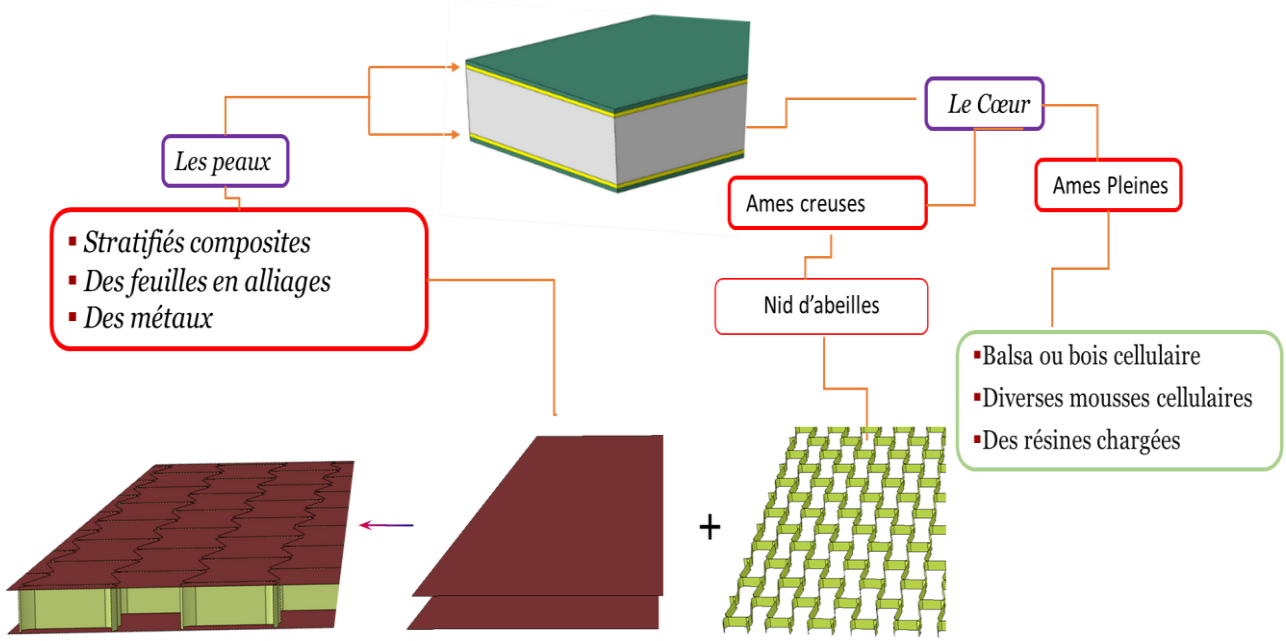


Fig. 1.2 Différentes composantes des composites sandwich.

1.2.1 Âmes

Le noyau, c'est l'élément central d'une structure sandwich à plusieurs fonctions vitales, elle se caractérise par une faible masse [2]. Il doit être assez rigide pour résister aux charges agissantes, dans la direction perpendiculaire aux panneaux, en outre, l'âme doit pouvoir supporter des charges localisées de poinçonnement.

L'âme en nid d'abeilles, connue aussi sous le nom « Nida », est un matériau structural souple constitué de mailles hexagonales. Il est réalisé à partir de différents matériaux par exemple le papier [3] ou l'aluminium.

Le Nida étant une structure anisotrope, ses propriétés varient selon le sens transversal ou longitudinal des alvéoles (taille de mailles). De plus, la taille de celles-ci, l'épaisseur des parois du Nida et la méthode de mise en œuvre sont des paramètres qui influencent la résistance au cisaillement transversal et longitudinal du Nida. Les âmes Nida les plus utilisées : L'âme en nid-d'abeilles aramide et l'âme en nid-d'abeilles plastique (viscoélastique).

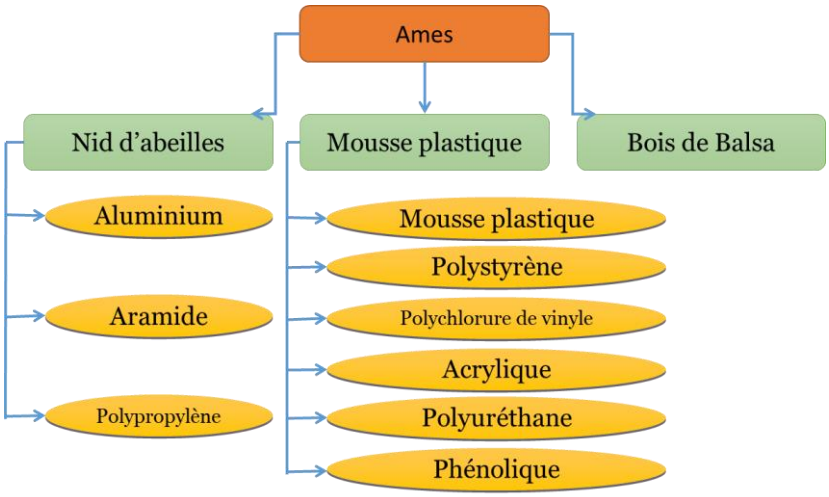


Fig. 1.3 Divers matériaux pour l'âme.

1.2.2 Peaux

Généralement de faible épaisseur, les peaux sont réalisées de tout matériau pouvant être obtenu sous forme de couche. Les peaux des sandwichs sont généralement constituées de fibres (mat ou tissu) enrobées d'une matrice à base de résine. Il existe plusieurs types de fibres parmi lesquelles on trouve :

- Les fibres de verre.
- Les fibres de Kevlar ou aramide

- Les fibres de carbone

Le choix de la nature et la séquence des couches dépendront de l'usage auquel est destinée la structure sandwich.

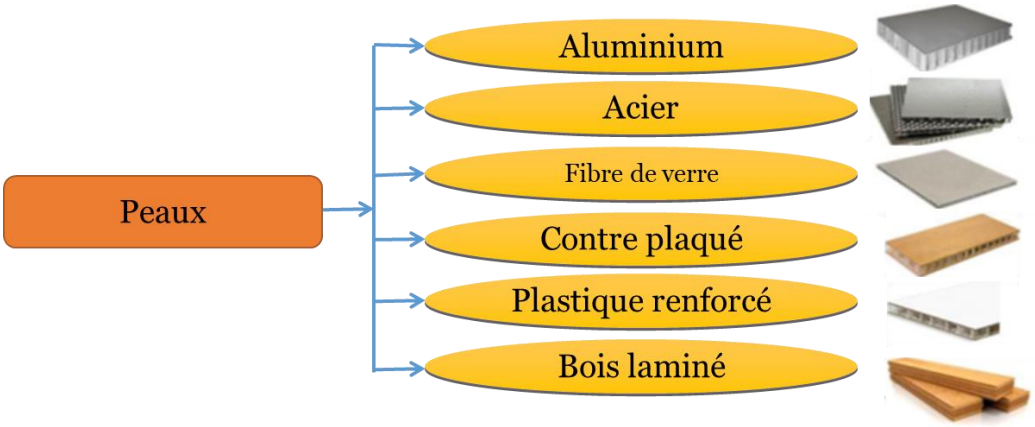


Fig. 1.4 Divers matériaux pour les peaux.

1.2.3 Domaine d'application des sandwichs en nid d'abeilles

Dans le domaine de génie civil : l'ingénierie civile utilise aussi des sandwichs pour réaliser des voutes de grandes portées. Le gain en densité surfacique est spectaculaire : de 2600 kg/m^2 pour une voûte en pierre à 33kg/m^2 pour une solution sandwich acier/mousse [2]. Plus récemment, la construction sandwich est de plus en plus utilisée dans les projets de réhabilitation des infrastructures routières telles que la fabrication des tabliers de ponts où la légèreté, la durabilité et la résistance à la corrosion sont indispensables [3].



Fig. 1.5 Applications des structures sandwich dans le domaine de génie civil.

Le domaine de la construction navale : les caractéristiques de légèreté et surtout d'absence de corrosion des structures sandwich, lorsque les divers constituants ne sont pas métalliques, commencent à susciter de l'intérêt. De nos jours, pratiquement tous les bateaux de plaisance américains de moins de 43 mètres sont construits en sandwichs composites en fibres de verre.



Fig. 1.6 Applications des structures sandwich dans le domaine naval.

Les structures sandwichs sont également utilisées dans *la construction des articles de sports et de loisirs*, tels que les skis acrobatiques, les kayaks, les planches de surf, les tables de billard, et les raquettes de tennis.

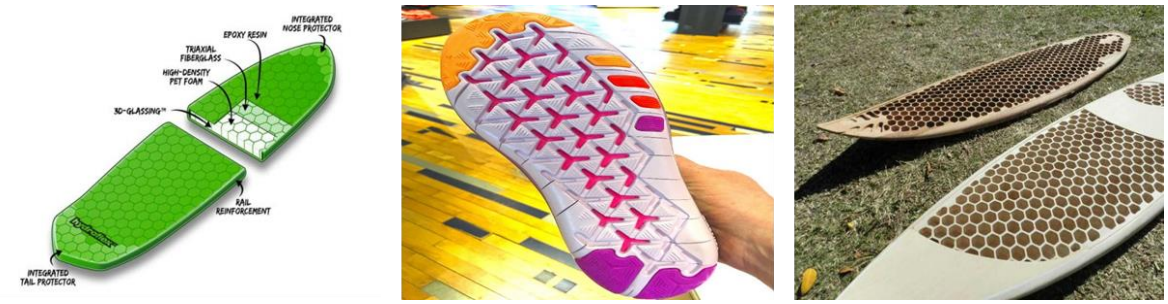


Fig. 1.7 Applications des structures sandwich dans le domaine des articles de sports.

Dans le domaine de secteur ferroviaire et aéronautique : la technique de construction en sandwich a été sélectionnée pour la fabrication des cabines de trains à grande vitesse (TGV) et des avions militaires et commerciaux. Et grâce à une structure en matériaux sandwichs, ces derniers peut atteindre des très grandes vitesses à cause de la légèreté qui lui possèdes, toute en gardant une rigidité immédiate.



Fig. 1.8 Applications des structures sandwich dans le secteur ferroviaire et aéronautique.

1.3 Caractérisation du Nid-d'abeilles

L'intérêt de l'étude est de pouvoir homogénéiser le noyau indépendamment des peaux, en remplaçant le nida de géométrie compliquée par un matériau homogène de propriétés mécaniques similaires dans les modèles analytiques et numériques. Le nid-d'abeilles est assimilable à un matériau orthotrope. Son homogénéisation passe tout d'abord par la détermination des constants élastiques de l'ingénieur qui sont les modules d'élasticité, les coefficients de Poisson et les modules de cisaillement. La connaissance du comportement mécanique des âmes, en particulier en cisaillement, est évidemment indispensable lors de la phase de conception des structures en sandwich. L'estimation de ce comportement consiste à s'appuyer sur la structure répétitive des nids-d'abeilles pour réaliser des calculs d'homogénéisation. On peut prédire de nombreux coefficients élastiques toutefois, dans le cas général, les modules de cisaillement peuvent seulement être bornés avec ce type d'approche.

Pour caractériser le nida assimilé à un matériau orthotrope, il faut déterminer les neuf constants élastiques indépendants suivants :

- Modules d'élasticité E_1, E_2, E_3,
- Coefficients de Poisson v_{12}, v_{13}, v_{23},
- Modules de cisaillement G_{12}, G_{13}, G_{23}.

La prise en compte de l'effet des déformations de cisaillement et axiales est généralement négligée à cause de leurs faibles contributions dans l'évaluation des modules de la cellule.

De nouvelles formes de cellule de nids-d'abeilles seront employées pour les cœurs des panneaux sandwich en raison de leurs faibles propriétés de densité et de haute rigidité. Les nids-d'abeilles avec un coefficient de Poisson négatif dans le plan sont connus sous le nom nids-d'abeilles auxétiques et offrent une amélioration des propriétés mécaniques telles que l'absorption d'impact, résistance élevée, une fois comparées aux nids-d'abeilles conventionnels réguliers.

L'homogénéisation analytique et numérique des propriétés élastiques dans le plan et hors plan d'une nouvelle topologie de cellule à parois arrondies sera détaillée dans le chapitre 2. Nous explorons la solution basée sur la mécanique des structures pour évaluer les différents modules en fonction des paramètres géométriques et mécaniques. Les travaux précédents ont été réalisés pour déterminer les propriétés élastiques équivalentes du nid-d'abeilles hexagonal classique. Cependant, la modélisation analytique de la nouvelle cellule à parois courbées est trop longue

et fastidieuse en raison de la complexité géométrique et de la répartition des contraintes dans les parois du nid-d'abeilles, notamment dans les modules de cisaillement hors plan. Cependant, les méthodes énergétiques peuvent être adoptées pour restreindre les modules de cisaillement. L'homogénéisation analytique de type de cellule s'avère très utile et efficace.

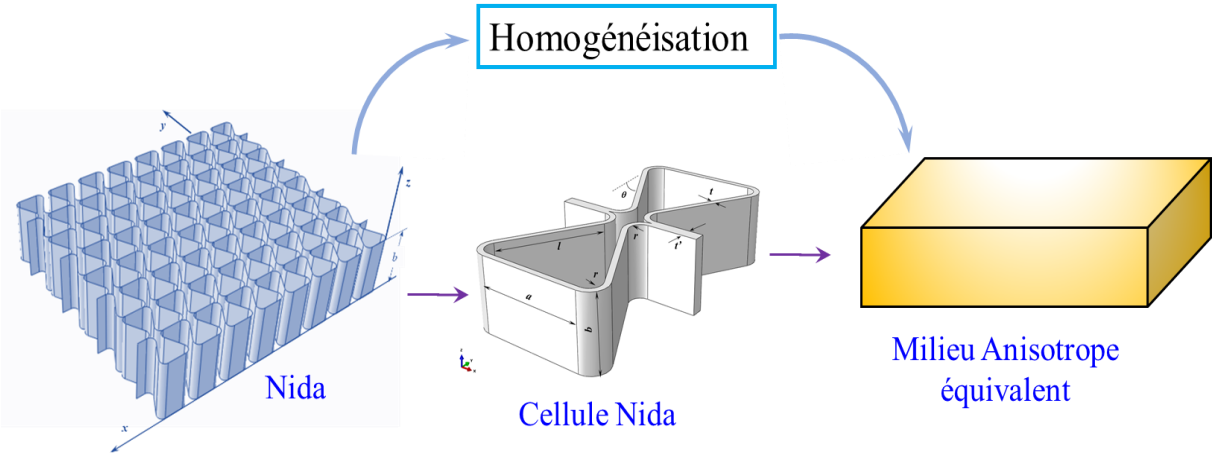


Fig. 1.9 Homogénéisation des nids-d'abeilles par un milieu anisotrope équivalent.

Le chapitre suivant ouvrira le volet sur le modèle d'homogénéisation analytique d'une nouvelle configuration des cellules nid-d'abeilles à paroi courbée, pour calculer les propriétés macroscopiques des structures sandwich d'âme périodique. Avec une validation dynamique des neuf modules élastiques homogénéisés trouvés en statique (Chapitre 02).

1.4 Généralité sur les matériaux viscoélastiques

Les matériaux élastiques se déforment lorsqu'ils sont contraints, et retournent rapidement à leur état d'origine une fois la contrainte retirée. En rhéologie, le comportement d'un matériau viscoélastique linéaire est ainsi intermédiaire entre celui d'un solide élastique idéal symbolisé par un ressort de module E (ou G) et celui d'un liquide visqueux newtonien symbolisé par un amortisseur de viscosité η.

L'élasticité d'un matériau traduit par sa capacité à conserver et restituer de l'énergie après déformation, mais la viscosité d'un matériau traduit sa capacité à dissiper de l'énergie. La réponse à une sollicitation d'un matériau viscoélastique dépend du temps (ou de la fréquence), mais n'est pas le cas pour un matériau purement élastique.

Différents modèles permettent de décrire la viscoélasticité linéaire. Le modèle de Maxwell est adapté au liquide viscoélastique. Le modèle de Kelvin-Voigt quant à lui est un modèle élémentaire de solide viscoélastique. Il existe également respectivement pour ces deux cas le modèle

de Zener et celui de Burgers. En viscoélasticité linéaire, on peut associer une loi de comportement à un matériau, qui permet de calculer la réponse à une histoire de sollicitation donnée. Il s'agit du principe de superposition de Boltzmann.

Le fluage et la relaxation sont des essais qui permettent de bien caractériser un matériau viscoélastique pour des phénomènes d'une durée suffisamment longue. Mais lorsqu'ils sont beaucoup plus rapides, les tests dynamiques s'avèrent nécessaires, avec une description du comportement viscoélastique dans le domaine fréquentiel. Une description basée sur des caractéristiques complexes du matériau est donc plus apte à décrire la viscoélasticité dans ce domaine. Dans cette approche non paramétrique, la partie réelle de ces caractéristiques est liée à l'élasticité tandis que la partie imaginaire correspond à la dissipation.

Les séries Prony ont été utilisées pour appliquer une méthode numérique efficace dans le domaine temporel pour relier les fonctions de relaxation et de fluage des matériaux viscoélastiques, qui ont été testées en utilisant des données expérimentales provenant de quelques matériaux polymères. Une méthode pour déterminer les coefficients de la série Prony d'un module de relaxation viscoélastique est exposée dans le chapitre 3.

1.5 Généralité sur les vibrations et l'amortissement des plaques sandwich à cœur viscoélastique

Afin de garantir un confort vibratoire dans les structures sandwich, les professionnels de la construction ont de plus en plus recours aux matériaux viscoélastiques. Leurs remarquables propriétés d'amortissement en font d'excellents systèmes pour réduire l'amplitude des vibrations qui peuvent occasionner des dégâts structurels. La solution la plus fréquente pour améliorer les structures sandwich consiste à insérer une couche viscoélastique que l'on qualifie d'antivibratoire.

La prédiction de l'amortissement a historiquement été l'intérêt des sciences spécialisées, ou l'augmentation de la capacité amortissante d'une structure peut souvent améliorer ces performances sous les charges dynamiques. Le matériau du noyau et la topologie de la cellule constituant le noyau sont deux paramètres principaux qui déterminent le plus des propriétés amortissement de la structure sandwich.

Un processus de conception rationnel nécessite une méthode pour prédire les valeurs d'amortissement auxquelles on peut s'attendre pour les matériaux et les configurations structurelles données. Des phénomènes tels que les pertes hystérétiques dans les métaux, le frottement dans

les articulations conduit invariablement à une certaine quantité d'amortissement mesurable. Cependant, il est souvent imprévisible pour produire une conception satisfaisante. Dans ces cas, l'ajout d'un amortissement par l'utilisation de matériaux viscoélastiques peut être très efficace.

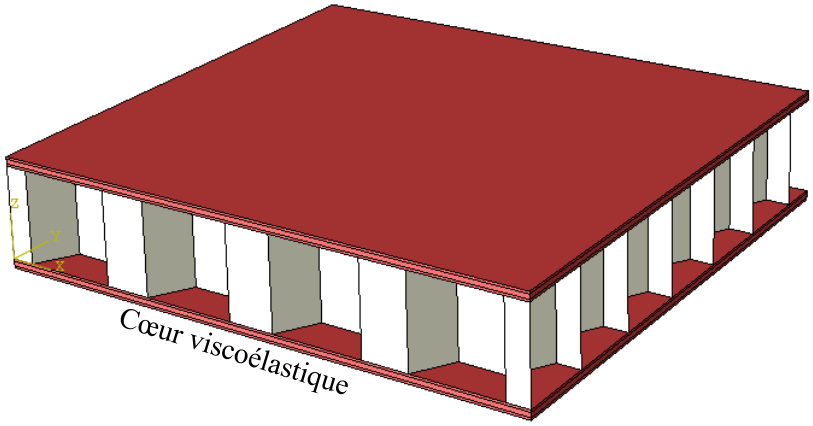


Fig. 1.10 Plaque en nid-d'abeilles à cœur viscoélastique.

Il existe principalement deux méthodes de traitement du matériau viscoélastique à savoir, couche contrainte et couche non contrainte ou traitement en couche libre. En fonction des exigences fonctionnelles, la structure sandwich utilise la méthode de traitement de couche contrainte pour obtenir des propriétés efficaces de toutes les couches. Dans ce cas, le matériau viscoélastique est pris en sandwich entre la surface de la structure et de minces revêtements en matériau métallique (figure 1.10).

Les prédictions de la réponse dynamique dans l'analyse par éléments finis sont le plus souvent faites par le simple expédient de choisir un seul facteur de perte structurelle pour caractériser tous les modes de vibration, en attribuant des facteurs de perte basés sur la fréquence propre de chaque mode présenté et analyser dans le chapitre 4.

Compte tenu des avantages des nids-d'abeilles et de la viscoélasticité pour l'amortissement de couche contrainte, l'étude actuelle se concentre sur l'amélioration de la nature d'amortissement des plaques sandwich à âme en nid d'abeille en utilisant à la fois des techniques d'amortissement des matériaux et des différentes topologies de cellules en nid-d'abeilles.

L'objectif de cette section de thèse est de comparer les capacités d'amortissement des structures sandwich avec cinq différents noyaux (conventionnels et auxétiques), lorsque les mêmes propriétés du matériau de base sont appliquées pour une masse égale du noyau et de la plaque sandwich. La capacité d'amortissement des nids-d'abeilles est étudiée indépendamment des propriétés des matériaux appliqués sous des charges dynamiques. L'étude actuelle se concentre sur l'introduction du comportement viscoélastique au noyau en nid d'abeille pour étudier leurs capacités d'amortissement sous des charges transitoires cycliques et dynamiques quasi-statiques.

Les capacités de vibration modale et d'amortissement des plaques sandwich en nid-d'abeilles avec noyau viscoélastique sont analysées à l'aide d'un modèle d'éléments finis développé dans ABAQUS. Le matériau viscoélastique utilisé pour le matériau de base de l'âme en nid d'abeille est défini à l'aide d'une série Prony correspondant au modèle Maxwell généralisé.

En outre, il a été mentionné que le nid d'abeille se comporte différemment pour les chargements dans le plan et hors du plan. Par conséquent, l'effet de la direction de chargement sur la capacité d'amortissement des panneaux sandwich est également étudié.

Les facteurs de perte d'amortissement sont calculés à partir du rapport de la dissipation d'énergie sur l'énergie de déformation élastique pour une analyse quasi-statique avec une charge sinusoïdale. De plus, les facteurs de perte sont calculés à l'aide d'une analyse de réponse en fréquence en régime permanent direct, en utilisant la méthode de la bande passante à la demi-puissance.

1.6 Comportement à l'écrasement (Choc) des sections tubulaires

L'amélioration des caractéristiques de sécurité et de résistance aux chocs des systèmes aéronautiques ou automobiles deviennent de plus en plus difficiles avec les progrès de l'ingénierie des transports et de l'aérospatiale pour protéger les humains et les équipements vulnérables. Les structures métalliques à parois minces se sont avérées d'être un choix comparable en cas d'écrasement dynamique lorsque ces exigences doivent être satisfaites avec une caractéristique de poids optimale et un faible coût.

La principale fonction des longerons (figure 1.11), est d'absorber l'énergie d'un éventuel choc afin d'avoir une meilleure protection des occupants du véhicule. Les constructeurs cherchent à améliorer les performances d'absorption d'énergie de ces structures en utilisant des nouvelles formes de section transversales et de nouveaux matériaux, par exemple les matériaux composites, les alliages d'aluminium et les aciers haute résistance. Ils cherchent également à dévelop-

per une structure optimale pour stabiliser les zones soumises au flambement global. Le problème ainsi posé est un problème très complexe, dans lequel intervient le phénomène de chocs et de flambage, la rupture de structures et la non-linéarité structurelle et de matériau.

L'énergie d'impact est absorbée par ces systèmes dans de multiples mécanismes tels que la rupture, la flexion, la tension, le cisaillement et la déformation plastique. Les tubes métalliques sont l'un de ces choix qui montrent de multiples modes de déformation sous écrasement axial avec des caractéristiques uniques telles que le mode axisymétrique ou accordéon, le mode mixte ou le mode de flambement global en fonction de la géométrie, des paramètres du matériau et des conditions aux limites.

Durant les dix dernières années, de nombreux articles à la fois théoriques et expérimentaux, concernant le comportement à l'écrasement des structures tubulaires, ont été publiés. Nous ne connaissons pas encore très bien les causes d'instabilité d'écrasement, la localisation du mode de déformation, l'effet dynamique, etc. Le but de ces recherches est de donner une évaluation correcte de la résistance à l'écrasement de ces structures en cas de crash. C'est dans ce contexte industriel et scientifique que se situe la présente étude.

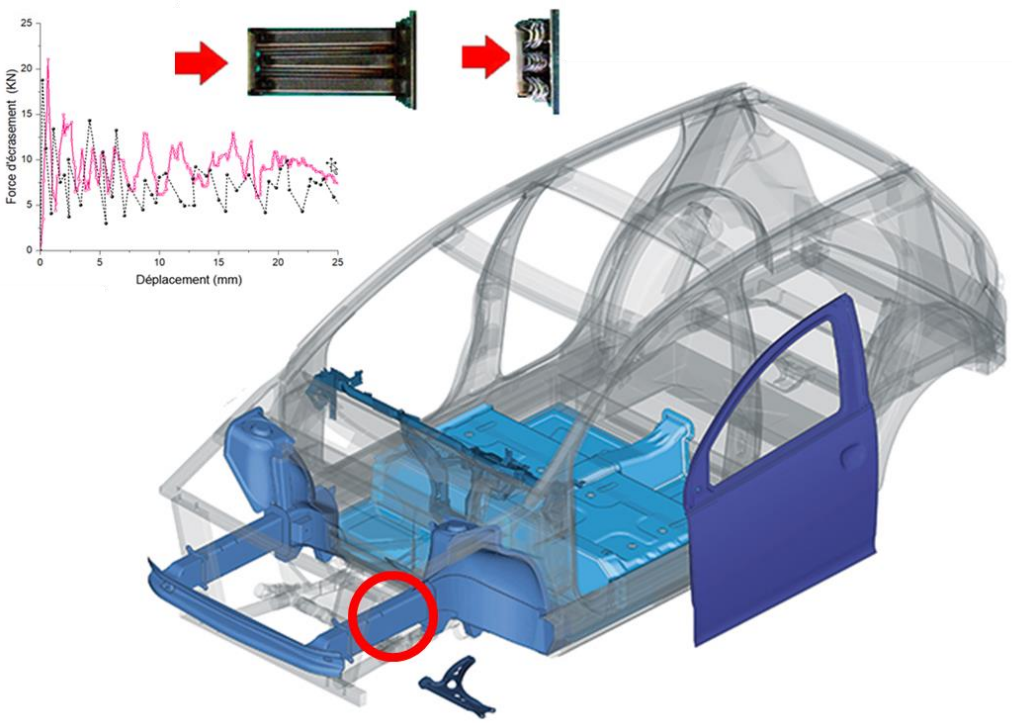


Fig. 1.11 Impact des longerons dans le domaine d'automobile.

Deux types de mode d'écrasement en compression axiale peuvent se produire suivant la dimension géométrique et la propriété mécanique du matériau : le mode d'écrasement stable et le mode d'écrasement instable.

- Le mode d'écrasement stable se caractérise par la formation de plis progressifs pour des structures en métal, et par la formation et la propagation de fissures pour des structures en matériaux composites.
- Contrairement au mode d'écrasement stable, peu d'énergie peut être dissipée en mode d'écrasement instable. Du point de vue de l'absorption d'énergie, il est très important d'avoir un mode d'écrasement stable.

Les tubes métalliques à parois minces ont fait l'objet de recherches depuis 1960, lorsque Alexander [6] a proposé un excellent modèle théorique pour accéder à la force d'écrasement moyen pour un modèle de pli axisymétrique sur la base d'investigations expérimentales. Des solutions théoriques pour prédire les déformations non symétriques ont été fournies. Depuis lors, l'écrasement des tubes métalliques a toujours été un sujet de recherche brulant. Une série d'essais d'écrasement axial sur des tubes en acier et en aluminium ainsi qu'un facteur de correction de la distance d'écrasement efficace pour modifier les prédictions théoriques d'Alexander a été proposée par Abramowicz [7]. L'amélioration de la résistance à la collision a été réalisée par un certain nombre de chercheurs utilisant de multiples caractéristiques transversales telles que des tubes circulaires, des tubes carrés, des tubes coniques Hui et Xiong [8], tubes étagés avec raidisseurs externes Zahran et coll. [9], tubes circulaires avec courbes raidisseurs Ahmed et coll. [10] et poteaux à angles multiples Abramowicz et Weirzbicki [11].

Plusieurs topologies classiques pour améliorer les paramètres de résistance aux chocs ont été étudiées dans le chapitre 5, sous un écrasement axial ; cependant, des tubes à section transversale inspirée de la cellule développée dans le deuxième chapitre sont utilisés pour trouver un éventuel absorbeur d'énergie. Dans cette étude, de nouvelles configurations de tubes métalliques et en composite ayant la même masse sont définies et écrasées pour un chargement axial. Le code d'éléments finis ABAQUS ®Explicit Dynamics permet de réaliser une série d'études numériques dans le but de trouver la meilleure configuration possible en utilisant la méthode de prise de décision en termes d'absorption d'énergie spécifique, de force d'écrasement maximale et de force de pointe minimale. Les modes de déformation et les courbes force-déplacement pour différentes configurations sont également discutés pour voir l'effet de la géométrie proposée des topologies choisies.

Le but des études présentées dans ce chapitre est de contribuer à l'amélioration du comportement à l'écrasement des structures tubulaires, ce qui devrait permettre de trouver une structure optimisant l'absorption de l'énergie de choc. Un ensemble de six topologies de sections transversales de tubes unidirectionnels classés en deux groupes (conventionnels et auxétiques), est illustré à la figure 1.12.

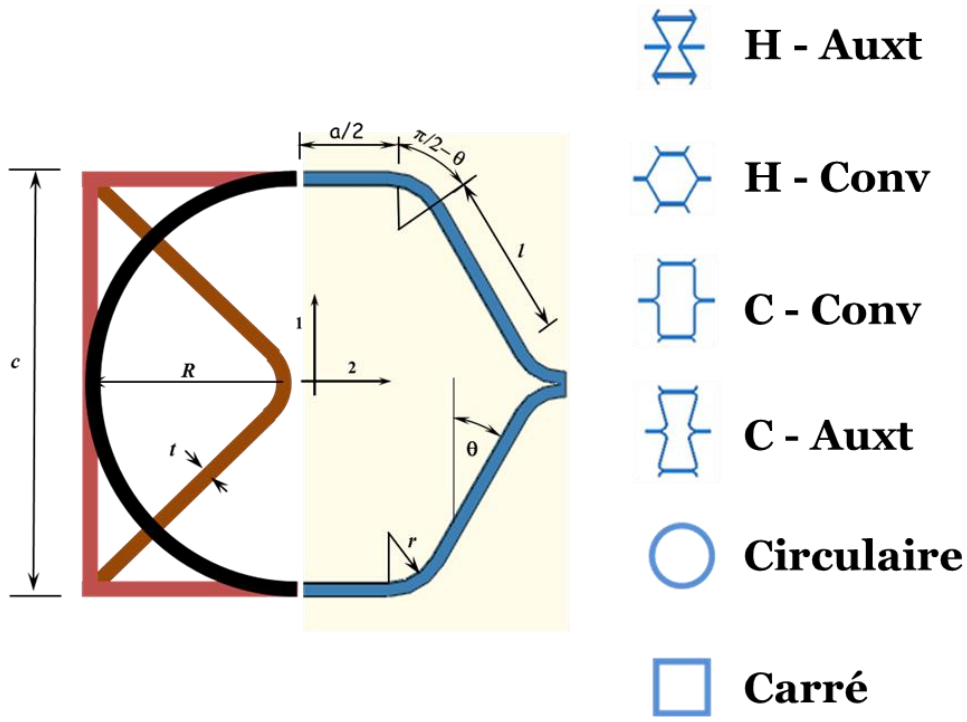


Fig. 1.12 Géométrie et topologie de section transversale des tubes.

1.7 Récapitulation

L'objectif visé par ce travail est en trois volets. Le premier réservé à l'homogénéisation analytique et numérique des propriétés élastiques dans le plan et hors plan d'une nouvelle topologie de cellule à parois courbées. Le deuxième volet présente une synthèse rhéologique des modèles de caractérisation de matériaux viscoélastiques qui seront utilisés dans la suite de cette étude (Chapitre 4). On présente aussi les principaux outils de mesure et de calcul pour caractériser le comportement vibratoire de structures contenant des matériaux viscoélastiques capables d'amortir les vibrations. Le troisième volet est consacré à l'étude du phénomène d'absorption d'énergie par écrasement des tubes droits à parois minces sous une charge d'impact axiale. Six sections transversales ont été étudiées par des simulations dynamiques à travers des modèles d'éléments finis.

Tous les points discutés dans cette généralité seront étudiés en détail et distribués sur quatre chapitres intitulés comme suit :

Chapitre 02 : Homogénéisation analytique et numérique de modules élastiques dans et hors le plan des nids-d'abeilles à parois courbées.

Chapitre 03 : Comportement viscoélastique et modèles rhéologiques.

Chapitre 04 : Comportement dynamique des plaques sandwich en nid-d'abeilles viscoélastique.

Chapitre 05 : Comportement à l'écrasement des structures tubulaires à paroi mince.

1.8 Références

[1] D. Gay, Matériaux composites, Avoisier hermes. 5e édition., Paris: Lavoisier, 2005.

[2] T. Bitzer, Honeycomb Technology: Materials, Design, Manufacturing, Applications and Testing, Springer, 1997.

[3] Z. Chen et N. Yan, «Investigation of elastic moduli of Kraft paper honeycomb core sandwich panels,» Composites: Part B, vol. 43, p. 2107–2114, 2012.

[4] Berthelot, J.-M., Matériaux composites : comportement mécanique et analyse des structures. Vol. 3. 1992 : Masson Paris.

[5] Code Aster, Réduction de modèle en dynamique linéaire et non linéaire : Méthode de RITZ. licence GNU FDL (http://www.gnu.org/copyleft/fdl.html). Pages : 4 – 17.

[6] Alexander, J.M., (1960). "An approximate analysis of the collapse of thin cylindrical shells under axial loading." Q. J.Mech. Appl. Math. (XIII): 10–15.

[7] Abramowicz, W., and Jones, N., (1986). "Dynamic progressive buckling of circular and square tubes." Int. J. Impact Eng. 4(4): pp. 243–270.

[8] Hui, Z., and Xiong, Z. (2016). "Crashworthiness performance of conical tubes with non-linear thickness distribution." Thin-Walled Structures 99: 35-44.

[9] Zahran, M., S., Xue, P., and Esa, M., S. (2016). "Novel approach for design of 3D-multi-cell thin-walled circular tube to improve the energy absorption characteristics under axial impact loading." International Journal of Crashworthiness.

[10] Ahmed, N., Xue, P., Kamran, M., Zafar, N., Mustafa, A., Zahran, M., S. (2017). "Investigation of the Energy Absorption Characteristics of Metallic Tubes with Curvy Stiffeners under Dynamic Axial Crushing." Latin American Journal of Solids and Structures, http://dx.doi.org/10.1590/1679-78253820.

[11] Abramowicz, W., and Wierzbicki, T. (1989). "Axial crushing of multi corner sheet metal columns." J Appl Mech 56(1):113–20.