

2.1 Introduction

Les structures sandwichs sont susceptibles d'être soumises à de nombreux impacts. Ces impacts se caractérisent par une faible vitesse et une faible énergie mais ils peuvent détériorer la peau ou l'âme et voir ses caractéristiques mécaniques diminuer. Ce type d'endommagement localisé peut faire chuter la résistance de la structure en compression jusqu'à 60% de sa résistance initiale [7].

Les essais d'impact (basse vitesse/basse énergie) sont effectués en utilisant des poids tombants ou des pendules (voir figure 2.1). Pour les énergies supérieures, des canons peuvent être employés. Les impacteurs sphériques sont le plus souvent choisis [7].

Les caractéristiques de l'impact peuvent être très variées. Chaque type de choc peut être caractérisé par l'évolution de la force appliquée en fonction du temps qui dépend à la fois de la masse et de la vitesse de l'impacteur ainsi que de la surface de contact (géométrie de l'impacteur) [4].

Un exemple d'impact courant dans le secteur aéronautique est la chute d'un outil sur une structure de l'avion lors de la phase de maintenance [13].

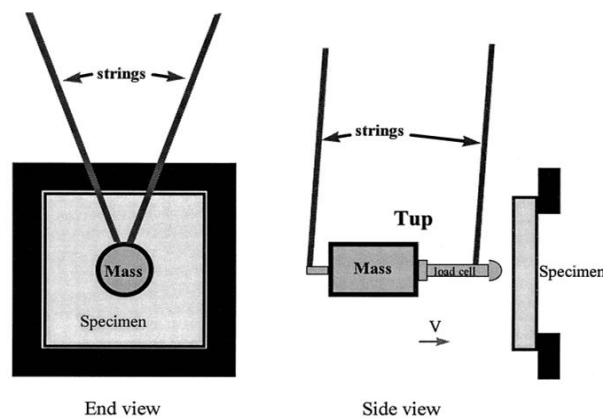


Figure 2.1 : *Dispositif pendulaire [13].*

2.2 Comportement à l'impact des structures sandwichs

2.2.1 Définition

ARBAOUI [4] définit l'essai d'impact comme étant une sollicitation au cours de laquelle une force agit sur un élément de surface pendant un temps relativement court. Cette

sollicitation induit des déformations élastiques et plastiques dans le matériau testé ainsi que des phénomènes de ruptures qui peuvent aller jusqu'à la perforation.

AL-MAGHRIBI A. [14] propose une classification des tests d'impact, en fonction de l'énergie cinématique de l'impacteur, selon trois catégories : impact basse vitesse (entre 0 et 50 m.s^{-1}), impact à vitesse modérée (entre 50 et 200 m.s^{-1}), impact à vitesse élevée (entre 200 et 1000 m.s^{-1}) et finalement impact hyper vitesse (supérieure à 4000 m.s^{-1}). KOLOPP et al [20] ont étudié l'impact à haute vitesse sur des structures sandwich par un projectile sphérique qui est lancé à 120 m.s^{-1} .

NISTOR [15] définit l'essai d'impact tous essais situant entre les essais effectués avec les barres d'Hopkinson, correspondant à des taux de déformation de l'ordre de 10^2 à 10^3 s^{-1} , et les essais réalisés par des techniques utilisant des explosifs, correspondant à des taux de déformation supérieurs à 10^6 s^{-1} . Il reste ainsi la gamme des taux compris entre 10^4 et 10^6 s^{-1} , spécifique aux phénomènes d'usinage, crash et impact, que les essais d'impact peuvent reproduire en laboratoire.

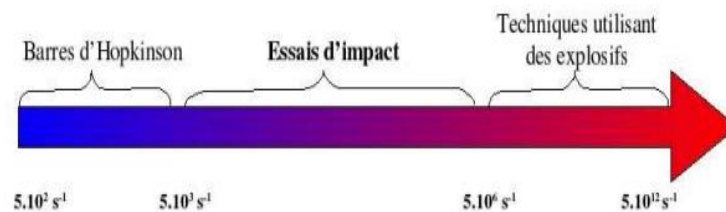


Figure 2.2 : Classification des essais d'identification en dynamique rapide [15].

2.2.2 Paramètres influents sur le comportement à l'impact des structures sandwichs

Dans cette section de l'étude, nous citons quelques travaux de la littérature qui ont traité l'influence de certains paramètres du matériau et du test sur la tenue à l'impact des structures sandwichs.

a) Influence de l'âme

Comme nous l'avons mentionné précédemment, la fonction de l'âme est d'une haute importance dans un sandwich. Généralement, les paramètres propres à l'âme qui peuvent avoir une influence sur le comportement à l'impact d'une construction sandwich sont :

l'épaisseur, la densité, le type de l'âme (en mousse ou en nid d'abeille) et finalement la nature du matériau constituant l'âme [16].

WILLIAMSON et LAGACE [17] ont constaté expérimentalement que plus la densité de l'âme augmente plus le seuil d'endommagement est relevé ainsi que la force de contact maximale.

RHODES [18] a mené plusieurs essais d'impact sur un certain nombre de structures sandwichs de noyaux différents. Il a montré que l'amélioration de la résistance à l'écrasement de l'âme d'un matériau sandwich résulte en une augmentation de la résistance à l'impact de la structure finale. De plus, d'après l'étude expérimentale menée par TSOTIS et al [19] sur des structures sandwichs à âme en nid d'abeille, il a été rapporté qu'une augmentation de la densité de l'âme entraîne aussi une augmentation du seuil d'endommagement ainsi que de la contrainte maximale de contact.

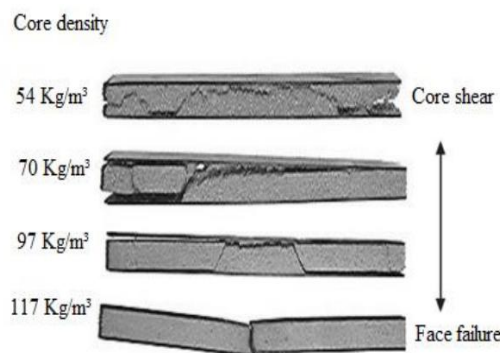


Figure 2.3 : *Influence de la densité de l'âme sur la transition entre les modes de rupture d'un sandwich [20].*

En effet, tel que montre la figure 2.3, pour un sandwich à peaux composites de 1.02 mm d'épaisseur couvrant une âme en mousse de densité volumique égale à 54 kg/m^3 , la rupture finale est induite par une rupture par cisaillement de l'âme. Tandis que, pour la même construction sandwich avec une âme de 117 kg/m^3 de densité, la rupture est induite par un endommagement de la peau [20].

b) Influence de la peau

Les paramètres propres à la peau, qui ont une influence déterminante sur le comportement à l'impact des structures sandwichs sont généralement : l'épaisseur, la nature du matériau, et dans le cas des peaux composites stratifiées, la séquence d'empilement.

LIM et al [20] ont étudié l'influence de l'épaisseur de la peau sur les mécanismes de rupture des structures sandwichs. Une structure sandwich composée d'une âme en mousse de 97 Kg/m³ de densité séparant deux peaux composites stratifiées unidirectionnelles est utilisée. Le test d'impact est réalisé à basse vitesse. Pour examiner l'influence de l'épaisseur de la peau, quatre épaisseurs ont été sélectionnées : 0.58, 0.72, 0.87 et 1.02 mm. En référence à la figure 2.4, suivant l'épaisseur de la peau, on remarque que la rupture finale peut se produire soit par cisaillement de l'âme soit par rupture de la peau.

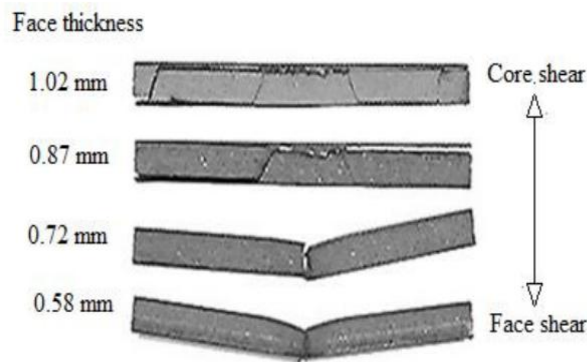


Figure 2.4 : *Effet de l'épaisseur de la peau sur le mode de rupture sous impact [20].*

GUSTIN et al [21] ont mené des tests d'impact à basse vitesse sur des panneaux sandwich dont les peaux sont faites à partir d'un empilement de plis de différents matériaux (Kevlar/Carbone). Ils ont démontré l'intérêt des fibres Kevlar bien connues pour leur capacité d'absorption des chocs.

c) Géométrie de l'impacteur

L'impacteur a une grande influence sur le comportement à l'impact des structures sandwichs (sa géométrie, sa rigidité et son diamètre) ainsi que les conditions aux limites des essais sur la réponse à l'impact des structures sandwichs soumises à un chargement d'impact.

WILLIAMSON [22] utilise des impacteurs hémisphériques de diamètres 12.7, 25.4 et 38.1 mm pour ses essais d'indentation sur sandwich peaux graphite/époxy et nid d'abeille Nomex. Il s'avère que l'impacteur ayant un plus petit rayon génère des dommages, en termes de profondeur d'indentation et de détérioration de la peau et du nid d'abeille, plus sévères que les impacteurs de diamètres plus grands. Logiquement, l'impacteur le plus petit doit en effet générer des contraintes locales plus importantes.

D'autre part, l'influence de la forme de la tête d'impacteur a été étudiée par TSOTIS et LEE. Les auteurs ont conduit des tests d'impact avec deux impacteurs à bout hémisphérique et cylindrique. Ils ont montré que la différence entre une tête cylindrique et une tête hémisphérique sur les dommages engendrés pendant l'impact n'est pas sensible. Par contre, la forme de la loi de contact est différente surtout dans la zone de la force critique que l'on n'observe plus aussi directement sur la réponse de l'impacteur sphérique (figure 2.5). Il semble que l'impacteur sphérique génère une perturbation continue pendant l'indentation grâce à sa forme régulière et donc génère une réponse qui est aussi régulière et continue. [19]

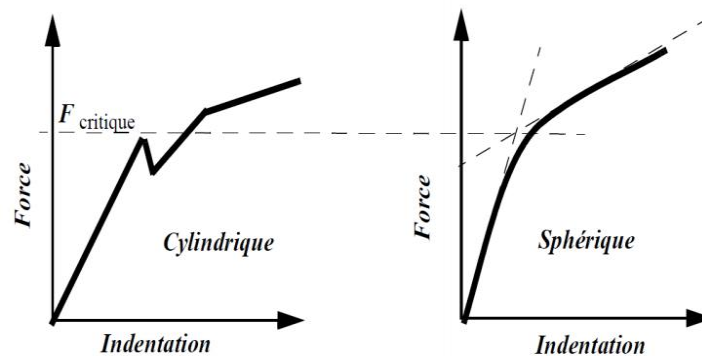


Figure 2.5 : Comparaison entre des lois de contact entre des indenteurs cylindriques et sphériques [19].

RAJU et al [23] ont étudié les effets de type de support sur le comportement à l'impact des panneaux sandwichs composites en fibres de carbone/époxy. Les éprouvettes de $216 \times 267 \text{ mm}^2$ ont été impactées à l'aide d'une tour d'impact de type poids tombant équipé d'un impacteur à bout hémisphérique de 76.2 mm de diamètre. Deux types de configurations ont été examinés : une éprouvette est simplement supportée ou serrée sur ses quarts bords. WILLIAMSON et LAGACE [17] ont comparé les mécanismes d'endommagement produits lors des tests d'indentation statique, sur une éprouvette simplement appuyée sur une fondation rigide et une autre encastree par ses deux extrémités (voir figure 2.6). Aucune différence significative n'a été observée. Dans le même ordre d'idées, il semble que le type de support n'ait pas d'effet sur la taille de la zone endommagée.

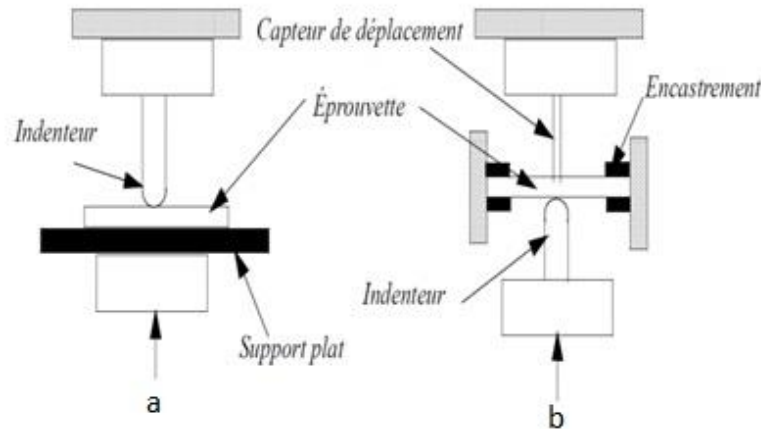


Figure 2.6 : Influence du type de support (a) éprouvette simplement supportée sur une fondation rigide (b) une éprouvette encastrée de ses extrémités [17].

2.2.3 Dommages dans les structures sandwichs impactées

Pour des faibles vitesses de l'impacteur, les dommages sont généralement induits au niveau de la peau impactée (face supérieure), de l'âme et de l'interface âme/peau impactée. Toutefois, la peau inférieure demeure généralement intacte .

Les principaux modes d'endommagement des structures sandwichs impactées à savoir un plissement localisé de l'âme et des dommages dans les peaux stratifiées. Le nid d'abeille subit une compression qui génère des déformations permanentes et des ruptures locales .

Dans l'étude menée par GUEDRA et al [24] on voit clairement en coupe l'évolution des zones endommagées en fonction de l'énergie d'impact.



Figure 2.7 : Évolution des zones endommagées en fonction de l'énergie de l'impact [24].

Le dommage géométrique est la déformation permanente de l'âme due à l'impact. En effet, l'interaction entre les différents éléments endommagés donne lieu à une imperfection géométrique dans les panneaux sandwichs. Cette imperfection géométrique se manifeste comme une distribution d'une empreinte résiduelle autour du point d'impact, telle que montre la figure 2.8 :

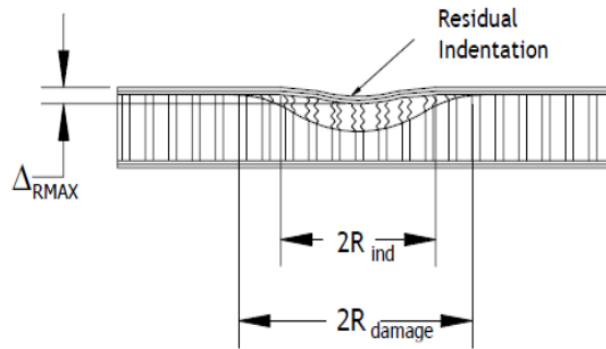


Figure 2.8 : *Indentation résiduelle dans les panneaux sandwichs impactés [16].*

Sur la figure 2.6, Δ_{RMAX} et $2R_{ind}$ désignent, respectivement, la profondeur de l'empreinte résiduelle au point de l'impact et le diamètre de la surface de l'empreinte [16].

2.3 Comportement en compression des âmes nid d'abeille

Lors d'un impact sur une structure sandwich, le nid d'abeille subit une compression qui génère des déformations permanentes et des ruptures locales. Il apparaît que le mode de compression associée à des plissements permet de dissiper une énergie d'impact importante. Les formes des déformées sont visibles (figure 2.9) pour une structure nid d'abeille.



Figure 2.9 : *Déformation du nid d'abeille aluminium avec une peau [11].*

Il existe deux possibilités de plissement : axisymétrique (diamant) et non axisymétrique (multilobe). Les schémas de ces deux plissements sont présentés sur la figure 2.10 :

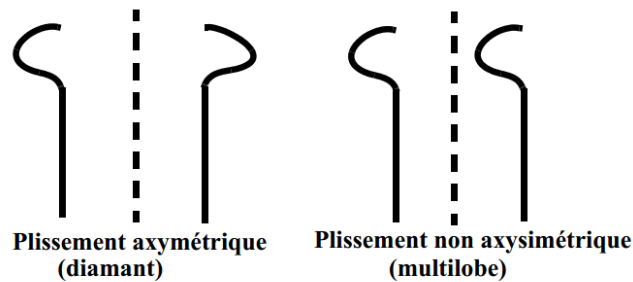


Figure 2.10 : Modes de plissement [7].

Dans le cas de compression de nids d'abeille en alliage aluminium, la courbe effort en fonction du déplacement à l'allure présentée figure 2.11.

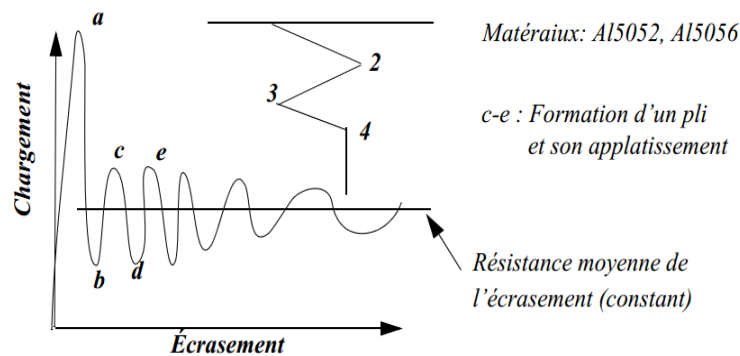


Figure 2.11 : Plissement du nid d'abeille en alliage aluminium [25].

Après un premier pic qui correspond à l'initiation du premier plissement, une zone plateau apparaît qui permet de dissiper une grande énergie avec un effort résistant moyen constant ce qui permet une décélération, théoriquement, elle aussi constante [25]. C'est cette propriété qui est utilisée lorsque l'on se sert du nid d'abeille pour absorber des chocs.

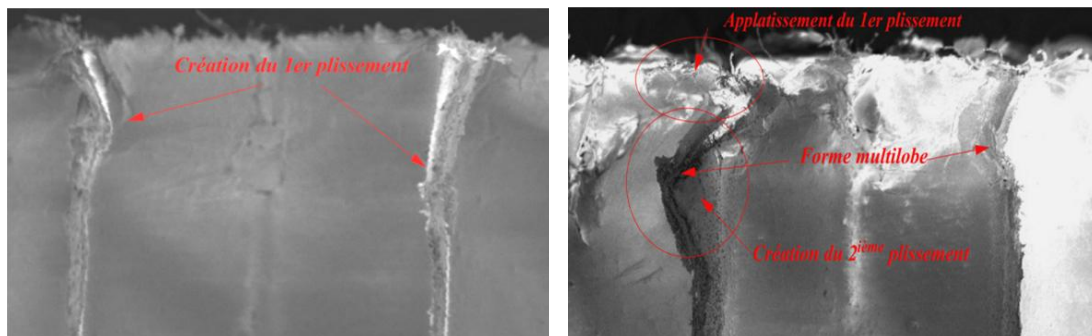


Figure 2.12 : Endommagements du nid d'abeille en compression uniforme [7].

AMINANDA [7] a trouvé que le mécanisme d'écrasement des trois matériaux utilisés (consone, aluminium et nomex) de nid d'abeille semble identique (figure 2.12) :

- Apparition du premier plissement sur la surface libre du nid d'abeille.
- Aplatissement du premier plissement et en même temps apparition du second plissement.
- Le second plissement s'aplatit à son tour et le processus se propage.

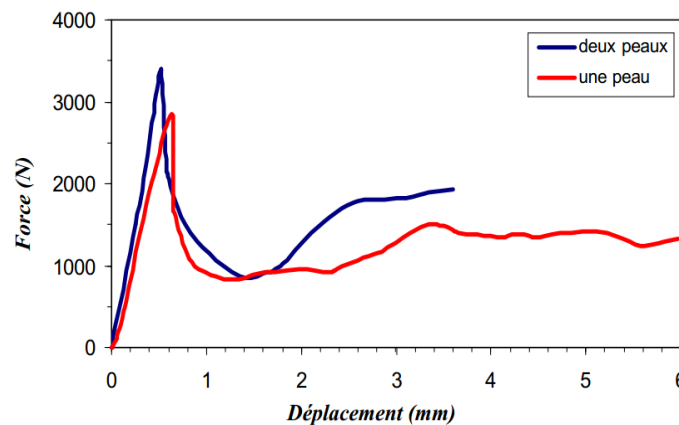


Figure 2.13 : *Courbes force/écrasement du nid d'abeille Aluminium [7].*

Lors de la compression, le comportement observé est le suivant [7][25] :

- ✓ Deux alvéoles voisines du nid d'abeille plissent toujours en opposition : l'une vers l'intérieur de la cellule, l'autre vers l'extérieur de la cellule. Le plissement des nids d'abeille est de type multilobe.
- ✓ Les valeurs locales minimales (points b, d figure 2.11) sont atteintes lorsque la distance entre les points 2-3-4 est inférieure à la moitié de la valeur initiale (création du pli).
- ✓ L'effort moyen de compression est parfaitement proportionnel au nombre de cellules.
- ✓ L'effort moyen de compression augmente lorsqu'on utilise des nids d'abeille de faible hauteur ou de petit diamètre de cellule ou encore des matériaux à résistance élevée.
- ✓ La longueur du plissement total augmente lorsque la dimension de la cellule augmente et est indépendant de la résistance du matériau.
- ✓ Le flambage local s'initie toujours sur l'interface nid d'abeille/plaque de compression sauf pour les faibles valeurs du ratio (épaisseur /diamètre d'une cellule).

McFARLAND [26] et WIERZBICKY [27] se sont intéressés au mode de plissement de l'arête qui forme la jonction entre trois cellules différentes du nid d'abeille hexagonal. En

effet pour réaliser un modèle basé sur la même démarche que celle présentée pour un tube, ils se sont rendu compte que l'essentiel de l'énergie est dissipée au niveau de cette arête. Localement, le nid d'abeille forme un motif constitué de deux plaques collées ou soudées qui forment un angle de 120° .

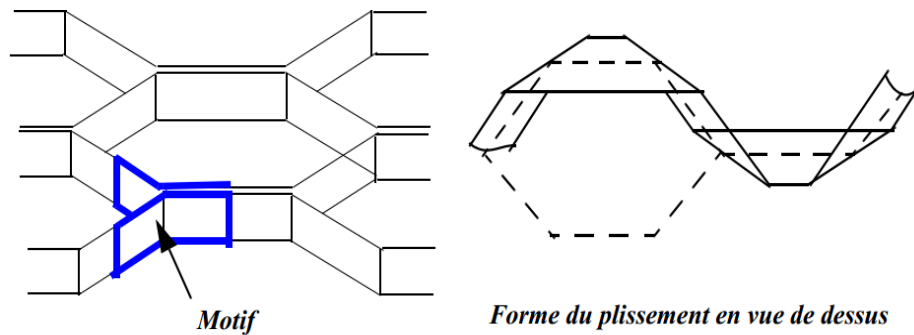


Figure 2.14 : *Géométrie locale des arêtes verticales et du plissement [7].*

Suivant la méthode de fabrication, on observe un décollement local lorsque les bandes sont collées et un plissement différent lorsqu'elles sont soudées (figure 2.15).

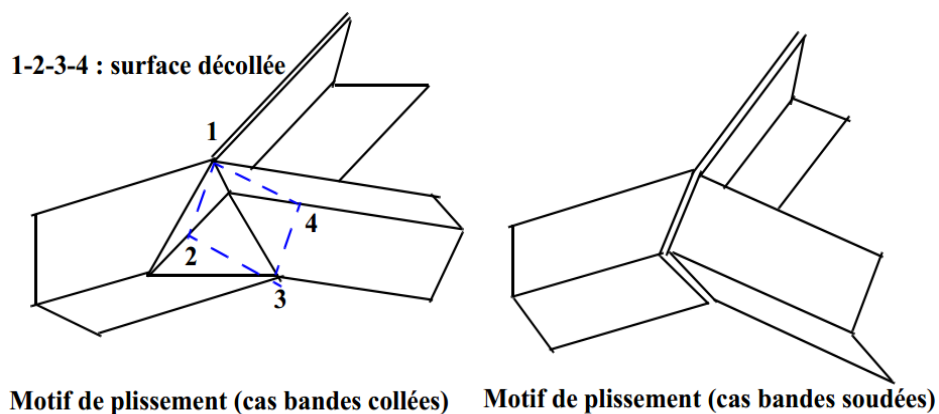


Figure 2.15 : *Déformée au niveau de l'arête d'un motif du nid d'abeille [7].*