

1.1 Introduction

Le développement des technologies modernes exige que l'on utilise des matériaux présentant des propriétés mécaniques spécifiques élevées à leur emploi, mais dont les masses volumiques soient faibles. En raison de leur faible densité, grande résistance, rigidité importante et de leur excellente durabilité, les panneaux sandwichs sont utilisés dans de nombreuses composantes structurales, notamment dans le domaine de l'aéronautique.

Dans les matériaux sandwichs l'âme doit être constituée d'un matériau ayant une masse volumique faible et de bonnes propriétés en cisaillement pour transmettre les contraintes de traction-compression supportées par les peaux. Par ailleurs l'âme doit pouvoir supporter des charges localisées de poinçonnement [1].

1.2 Principe

Les matériaux sandwichs sont constitués de différentes couches qui peuvent être métalliques, plastiques, composites.

Un sandwich est composé de [2]:

- deux couches minces et rigides, formants les «peaux» ;
- un noyau épais, léger et à parois minces avec une structure cellulaire plane et périodique en deux dimensions, appelé “ l'âme”.

Les trois parties du sandwich sont liées par un film d'adhésif, la liaison entre deux couches successives est appelée l'interface. Ces couches peuvent être de nature différentes, d'où la complexité de ces structures à cause de grands nombres des matériaux susceptibles d'être employés [3].

Le rôle principal des peaux est de supporter les charges dans le plan tendit que le rôle principal de l'âme, est de maintenir la distance respective entre les faces, assurant de ce fait une rigidité à la flexion élevée avec un faible poids.

Une structure sandwich de type aéronautique résulte de l'assemblage par collage ou soudure de deux peaux minces sur une âme de plus faible densité, aux caractéristiques mécaniques faibles mais plus épaisse [4][5].

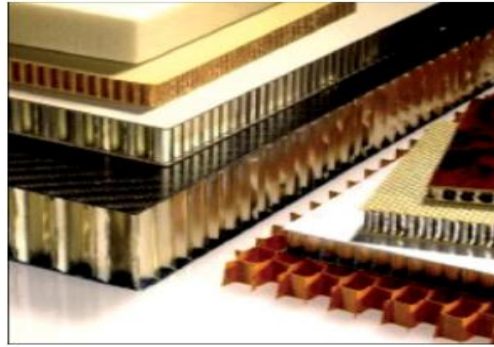


Figure1.1 : *Différents exemples de nids d'abeille [6].*

Il est donc important pour des structures sandwichs de choisir les matériaux constitutifs en faisant un compromis entre la résistance mécanique et la densité. Cela est particulièrement vrai pour l'âme qui doit maintenir écarté les peaux et donc avoir une raideur et une résistance suffisantes dans le sens transverse [7].

1.3 Les éléments constituant les matériaux sandwichs

Le matériau sandwich nids d'abeilles, appelé plus communément NIDA [3]. Le nida est une structure hexagonale qui peut être réalisée en divers matériaux comme le papier, le caoutchouc, le Kevlar ou l'aluminium. Ses caractéristiques mécaniques dépendent du matériau et de la taille des cellules [8].

1.3.1. Les peaux

Généralement de faibles épaisseurs, les peaux sont constituées de tout matériau pouvant être obtenu sous forme de couche. Elles peuvent être en bois, métal ou matériau composite. Le choix de la nature et de la séquence des couches dépendra de l'utilisation des matériaux composites. Les peaux ont pour but de reprendre les efforts de flexion traduit par des contraintes normales (traction ou compression) [2][9].

1.3.2. L'âme

Légère, l'âme a en général une très faible résistance à la flexion. Son but est de reprendre les efforts de compression et de cisaillement [2]. Les matériaux d'âme les plus utilisés se présentent principalement sous deux formes [4]:

- âmes pleines, parmi lesquelles on trouve le balsa (ou bois cellulaire), diverses mousses cellulaires et des résines chargées de microsphères creuses de verres (mousses syntactiques) ;

- âme creuses, essentiellement de type nid d'abeilles et profilé (réseaux métalliques légers, réseaux en papier enduit ou non, réseaux en polycarbonate et en polypropylène).

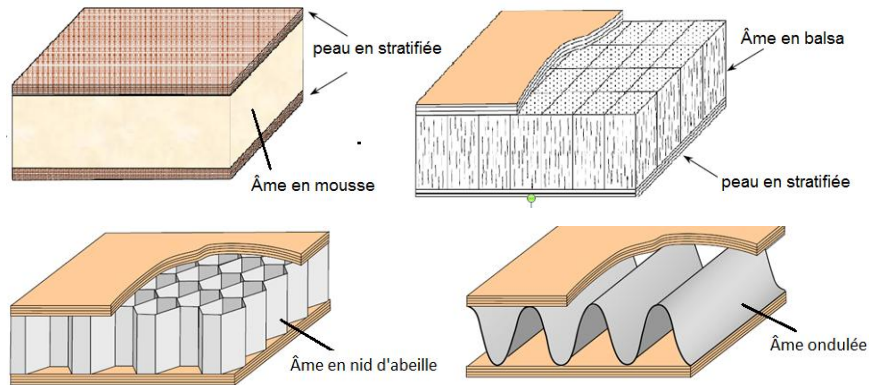


Figure 1.2: Les différentes formes de l'âme [10].

1.3.3. L'interface

L'interface est un composant essentiel intervenant dans la fabrication d'un sandwich. Elle permet un bon assemblage de la structure comme elle encaisse les efforts de cisaillement horizontaux et permet une bonne transmission des contraintes d'un milieu à l'autre. L'assemblage de la structure sandwich peut être réalisé par collage, soudage ou brasage [11].

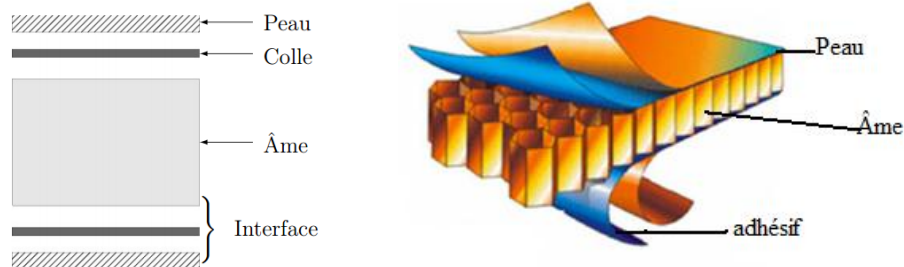


Figure 1.3 : Éléments constitutifs d'un panneau sandwich en nida [10].

1.4 Technique d'élaboration du nid d'abeille

Le procédé de fabrication des structures de type NIDA, ainsi que les matériaux qui les constituent, varient selon le domaine d'application (aéronautique, voiture, industrie du ski...).

1.4.1 Par méthode dite pré-ondulation

Le nid d'abeille est élaboré à partir de feuilles en aluminium d'une épaisseur de quelques dizaines de micromètres, le feuillard (1) (figure 1.4) en aluminium est imprimé avec

de la colle (2), coupé en feuilles et empilé (3), cette pile est mise sous pression et sous température, puis elle est coupée en tranches suivant l'épaisseur désirée (4), elle est ensuite étirée jusqu'à obtention d'une structure à cellules hexagonales (5), les paramètres principaux du nid d'abeille sont la taille de la cellule, l'épaisseur de la paroi et l'angle entre les parois adjacentes, qui peut être facilement contrôlé par le déplacement de la machine dans le processus d'étirage [3].

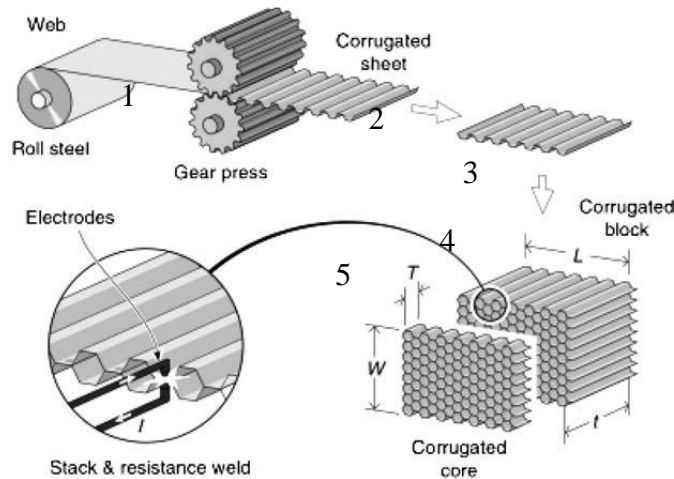


Figure 1.4 : Etapes d'élaboration du nid d'abeille par la méthode pré-ondulation [2].

1.4.2 Par méthode dite d'expansion

Le nid d'abeille est fabriqué le plus souvent avec de l'aluminium, des fibres de verre pré-imprégnées ou des fibres d'aramide (dénomination commerciale : Nomex). De par la méthode de la fabrication (figure 1.5), les propriétés dans le plan et hors-plan sont très différentes.

Comme l'étude effectuée se restreint aux sandwichs à âme nid d'abeille Nomex, il est intéressant d'explicitier à ce stade la fabrication du nid d'abeille Nomex qui se décompose en 3 étapes :

- A partir du carton à base de fibre aramide, une découpe et un collage en fines bandes est réalisé ;
- L'assemblage collé est ensuite extrudé pour former les cellules hexagonales ;
- L'ensemble est ensuite imprégné de résine phénolique qui donne sa rigidité et sa résistance au carton.

Le nida est un matériau bi-composant avec de la résine en surface du carton. Il est usuel lorsque l'on veut décrire les propriétés du nid d'abeille d'utiliser un repère prenant en compte

le processus de fabrication : sens d'expansion W , sens long L et sens transverse T (figure 1.5) [3][7].

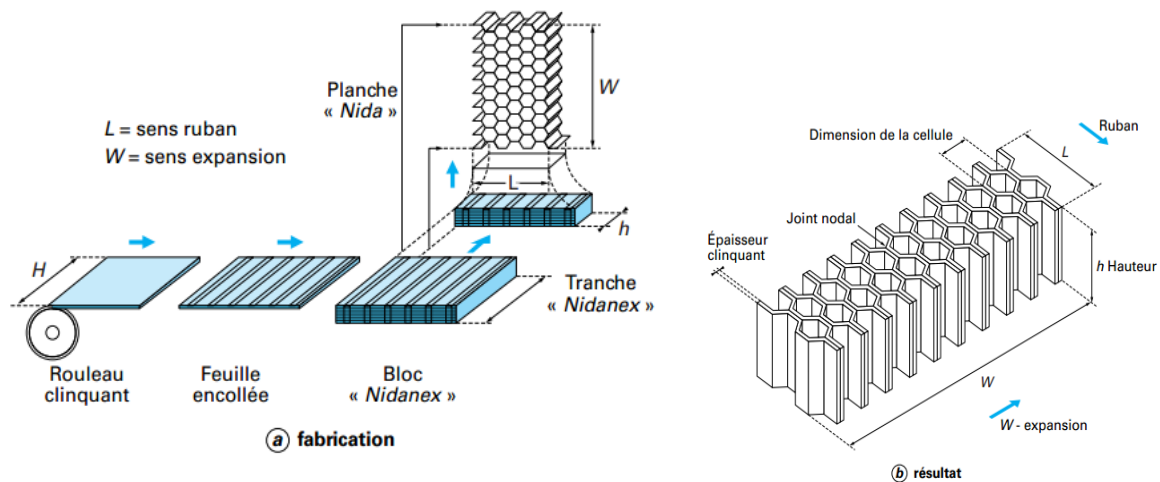


Figure 1.5 : Principe de fabrication des structures en nida par la méthode d'expansion et repère associé [11].

1.5 Les caractéristiques géométriques d'un panneau sandwich

Les différentes configurations cellulaires généralement utilisées pour l'âme du nid d'abeille sont (Fig. 1.6) : hexagonal, flexible, rectangulaire, renforcé, tubulaire,...

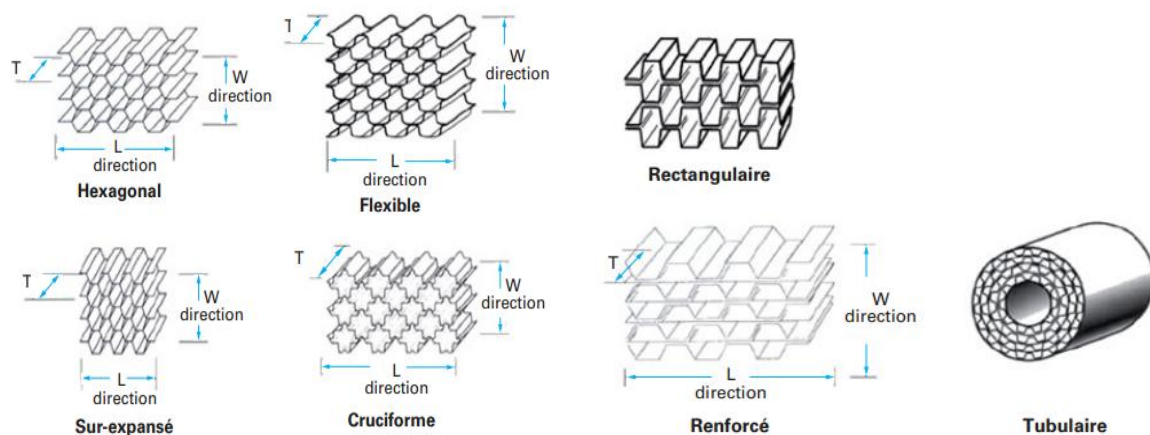


Figure 1.6 : Différentes configurations cellulaires de l'âme du Nid d'abeilles [5][8].

La configuration cellulaire en nid d'abeilles la plus couramment utilisée est le nid d'abeilles hexagonal régulier standard montré par la figure (1.7) [11].

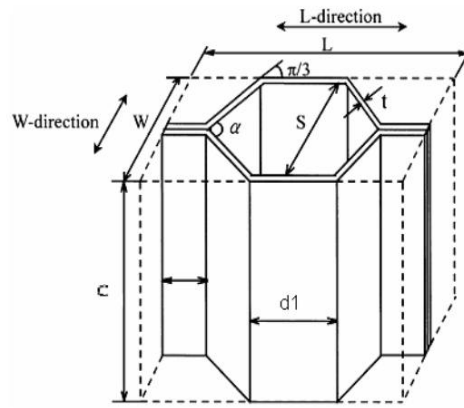


Figure 1.7 : Cellule en nid d'abeille hexagonal régulière [11].

Les caractéristiques géométriques d'un panneau sandwich ainsi celles d'une cellule Nida sont présentées par le tableau 1.1 :

tableau 1.1: Les caractéristiques d'une cellule nida [11]

b	Largeur du panneau
a	Longueur du panneau
t_r	Epaisseur de la peau
h	La hauteur du panneau
α	Angle de la cellule
s	Taille de la cellule
d	Longueur de la paroi
t_c	Epaisseur de la paroi inclinée
h_c	Hauteur du nida

1.6 Modes de rupture des structures sandwich

Dans ce paragraphe, nous présentons les modes de ruptures des structures sandwich afin de mieux cerner le comportement mécanique de ces structures.

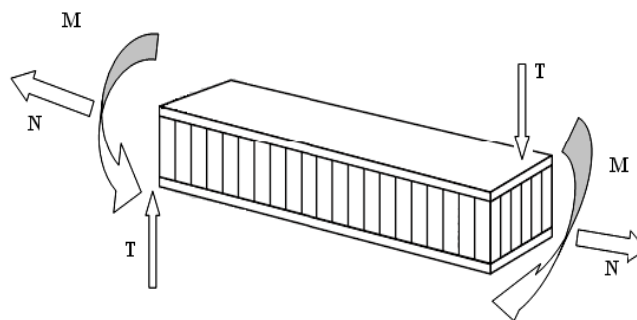


Figure 1.8 : Efforts sur un sandwich [5].

Un sandwich peut être soumis aux sollicitations données par la figure :

- un moment de flexion M ;
- un effort normal N ;
- un effort tranchant T .

a) *Rupture des peaux en traction ou en compression :*

Il s'agit du cas où les contraintes dans les peaux sont supérieures aux contraintes admissibles du matériau constituant les peaux [10].

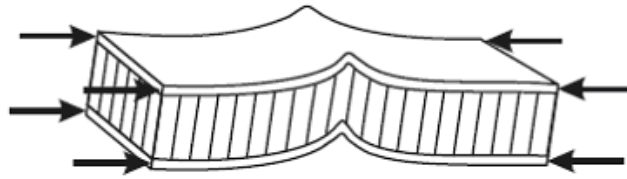


Figure 1.9 : *Rupture des peaux en traction/compression [10].*

b) *Rupture de l'âme en cisaillement :*

Si la contrainte de cisaillement (prépondérante dans l'âme) dépasse la résistance au cisaillement du matériau de l'âme, il y a rupture de l'âme.

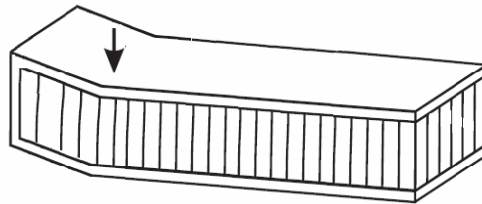


Figure 1.10 : *Rupture de l'âme en cisaillement [10].*

c) *Flambement généralisé des peaux :*

Une poutre sandwich soumise à compression peut céder sous l'effet de conditions d'instabilité concernant toute la poutre : le flambement.

Le flambement généralisé peut aussi survenir quand les contraintes dans les peaux et dans l'âme sont inférieures aux résistances à la rupture. La charge qui cause le flambement du sandwich dépend de paramètres tels que les dimensions dans le plan de la poutre et les conditions aux limites, qui ne peuvent être modifiés que partiellement lors de la conception. [5][10].

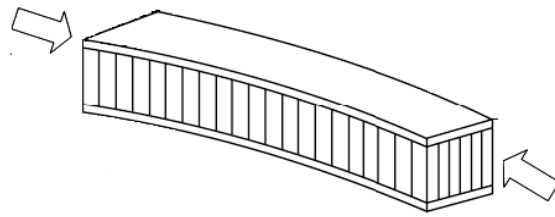


Figure 1.11 : *Flambement généralisé des peaux [10].*

d) Flambement généralisé de l'âme : crimping

Si le rapport longueur/épaisseur est relativement faible, et que la rigidité de cisaillement est négligeable devant la rigidité de flexion, le flambement généralisé prend la forme du flambement de l'âme ou «crimping». La charge totale par unité de longueur capable de produire le flambement de l'âme ne dépend pratiquement pas des propriétés des peaux ; par contre, elle augmente de façon linéaire avec l'épaisseur de l'âme et le module de cisaillement dans l'âme [5][10].

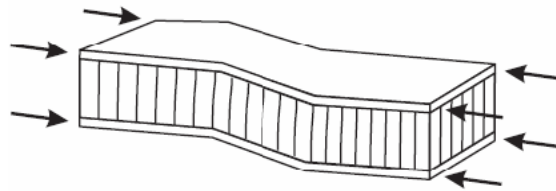


Figure 1.12: *Flambement généralisé de l'âme [10].*

e) Flambement localisé :

Les peaux, considérées par elles-mêmes, flambent très facilement à cause de leur faible épaisseur. C'est l'âme qui empêche leur flambement. Cependant, si la contrainte de compression dans les peaux dépasse une certaine limite, il se peut que l'âme ne soit plus capable d'empêcher le flambement. Dans ce cas, le flambement localisé des peaux, ou «wrinkling», se produit [5][10].

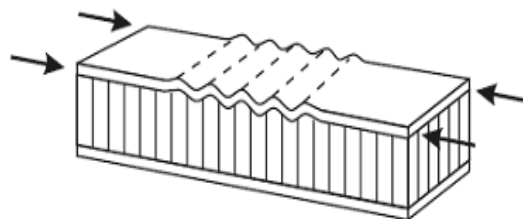


Figure 1.13 : le flambement localisé des peaux « Wrinkling »[10].

Contrairement au flambement généralisé, le flambement localisé peut prendre des configurations différentes qui ne dépendent ni de la géométrie de la structure ni des conditions aux limites. Par contre, il est influencé par le module élastique des peaux, élastique de l'âme, et de cisaillement de l'âme.

Dans le cas d'une âme en nid d'abeilles, mise à part les ruptures par «wrinkling», il peut survenir aussi un autre mode de rupture par flambement localisé de la peau en fossettes, appelé «dimpling» [5].

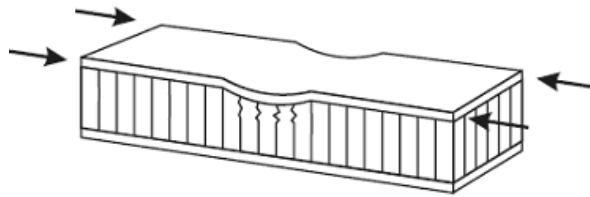


Figure 1.14: flambement localisé de la peau « *Dimpling* » [10].

f) Modes locaux de rupture :

L'indentation locale est un mode localisé de rupture due à une concentration de contraintes résultant, soit de l'application d'une charge localisée, soit de la position d'un appui de type ponctuel ou linéique [5][10].

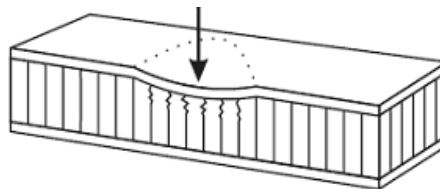


Figure 1.15 : *Indentation localisée* [10].

1.7 Avantage des structures sandwichs

Les matériaux sandwichs présentent plusieurs avantages tels que [5]:

- la résistance à la flexion élevée,
- faible masse volumique,
- grande rigidité,
- résistance au flambage élevée,
- résistance considérable à la fatigue,
- absorption d'énergie mécanique des chocs,
- faible coût d'utilisation,

- bonne isolation thermique, bonne isolation acoustique, etc.

Ces avantages sont liées directement à la géométrie des sandwichs : une âme légère et résistante au cisaillement, deux peaux fines sont résistantes à la traction /compression, un grand moment d'inertie.

1.8 Applications des panneaux sandwichs

Les fabricants de matériaux pour âmes de structures sandwichs prévoient l'entrée des composites sandwichs dans un nombre croissant d'applications où la résistance, la rigidité, et l'allègement seront des critères importants [8].

Historiquement, la construction en sandwich est un concept qui a été inventé dans les années 1820. Cependant, il a fallu un siècle pour que l'utilisation en masse commence, précisément dans le domaine militaire. En effet, l'une des premières applications de la construction en sandwich est la fabrication d'un avion militaire britannique de la Seconde Guerre Mondiale, le Mosquito (voir figure 1.16) [12].



Figure 1.16: *Avion Mosquito produit par De Havilland au cours de la seconde guerre mondiale [8].*

Ces dernières années, la plupart des avions civils ont également adopté cette construction pour de nombreux composants.

Dans 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.

Dans le secteur ferroviaire, la technique de construction en sandwich a été sélectionnée pour la fabrication des cabines de trains à grande vitesse (TGV).

Ils sont aussi utilisés pour l'amortissement des vibrations dans les machines outils, la résistance au feu dans les bâtiments, la mise en point de prothèses, d'implants médicaux, etc.

C'est pourquoi les structures sandwiches sont aujourd'hui largement utilisées dans de nombreux secteurs industriels. On retrouve des structures sandwiches sous forme d'éléments plans à faces parallèles certes, mais aussi d'autres formes. Parmi les nombreuses applications, on peut citer [5][10][12]:

- les transports terrestres (carrosserie industrielle où le remplacement du contreplaqué apporte la légèreté) ;
- transport frigorifique ;
- l'aéronautique (ailerons, dérives, ailes, etc.) ;
- l'aérospatiale ;
- le nautisme (coque, pont et habillage intérieur) ;
- la marine ;
- l'énergie (pales d'éolienne) ;
- les loisirs (skis, surfs...) ;
- la construction (cloisons de parois extérieures de maisons, éléments de façades, portes ou décoration intérieure, baraques de chantier, caravanes) ;
- le génie civil ; le stockage des fluides (cuves) ; l'électronique (antennes et dômes), etc