

I-1 Introduction

Le développement des technologies modernes exige que l'on utilise des matériaux présentant des propriétés mécaniques élevées spécifiques à leur emploi, mais dont les masses volumiques soient faibles. L'objectif est notamment de réduire la masse des structures. Les matériaux composites sont des matériaux qui répondent aux exigences précédentes. En raison de leur faible densité, grande résistance, rigidité importante et de leur excellente durabilité, les matériaux composites ont d'abord été utilisés dans de nombreuses composantes structurables, notamment dans le domaine de l'aéronautique de nos jours, la diminution de leurs coûts de production permet l'utilisation de ces matériaux dans des applications de plus en plus variées (automobile, navigation, construction etc.). Parmi les matériaux composites les plus utilisés, on notera les matériaux sandwichs. Les structures sandwichs occupent un large créneau dans la construction des pièces composites. Historiquement ce sont les premières structures composites allégées et performantes, l'objectif de ce premier chapitre est de positionner la problématique des matériaux sandwichs en nous attachant à mettre en évidence toutes leurs particularités propres.

I-2 Qu'est Ce Qu'un Matériau Sandwich ?

Les matériaux composites sandwichs sont des matériaux composés de leurs peaux en métal ou matériaux composite laminés et un moyen composé d'un matériau de faible résistance ou de mousse polymère la peau et le moyeu sont joints par collage pour assurer le transfert des forces et les change entre les deux parties conditionnelle sandwich.

Le principe de la technique sandwich consiste à appliquer une âme (constituée d'un matériau ou d'une structure légère possédant de bonnes propriétés en compression) deux "feuilles" ou peaux (possédant de bonnes caractéristiques en traction) l'objectif d'un tel procédé est de constituer une structure permettant de concilier légèreté et rigidité.

La structure sandwich est un cas particulier de stratifiés où les couches internes sont souvent plus épaisses et composées de matériaux plus souples. Toutefois la plaque en sandwich est symétrique par rapport au plan médian, et fait à partir de deux faces plus être FGM dans un sandwich, il ne faut pas oublier un troisième composant : l'adhésif c'est ce dernier qui permet un bon assemblage de la structure et aussi une bonne transmission des contraintes d'un milieu à l'autre. Sa principale caractéristique doit être une bonne résistance en cisaillement. Dans le cas de peaux en matériau composite, l'insertion de cette troisième phase peut être évitée par l'utilisation d'une résine auto-adhésive.

De parts la construction des matériaux sandwichs, on peut adapter leurs propriétés mécaniques en faisant varier la nature des peaux (identiques ou non) et de l'âme ainsi que l'épaisseur de chacune des phases. En règle générale, les peaux ont la même épaisseur (t_f) le rapport t_f / t_c (t_c étant l'épaisseur de l'âme) est compris entre 0,1 et 0,01 [9]. On peut classer les sandwichs en trois catégories selon la valeur du rapport d / t_f (d étant la distance séparant l'axe neutre de chacune des peaux) . Pour un sandwich symétrique (peaux de même épaisseur).

$$d = t_c + t_f$$

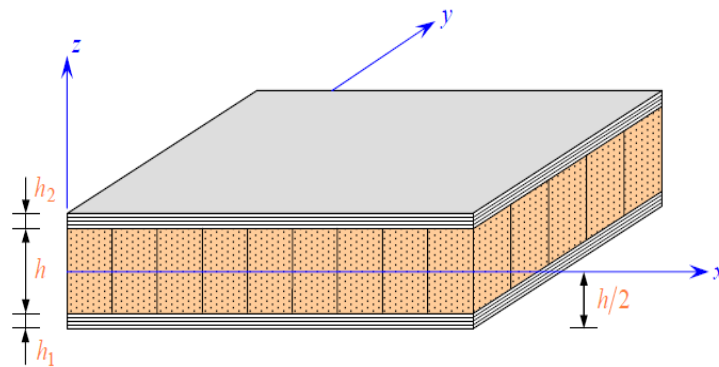


Figure (I-1) :schéma d'un sandwich

En fonction des valeurs du rapport d / t_f , on peut classer les sandwichs de la manière suivant:

- Pour le rapport d / t_f est supérieur à 100, on parle de sandwichs à peaux très fines.
- Pour un rapport d / t_f compris entre 100 et 5.77 le sandwich est considéré comme ayant des peaux fines.

On définira les bornes limites par rapport à la contribution de chaque constituant vis-à-vis de la rigidité en flexion et cisaillement du sandwich.

En plus de leur bonne rigidité en flexion, de leur bonne résistance au flambement et de leur légèreté, les matériaux sandwichs possèdent également de bonnes propriétés d'isolation thermique et phonique. Ceci explique leur emploi de plus fréquent comme cloison. Ces matériaux sont de plus en plus utilisés dans l'aéronautique ou l'industrie du transport en tant que structures primaires ou secondaires, comme par exemple les coques de bateaux rapides, les planchers d'avions.

I-3 Présentation :

Ce paragraphe permettra de fixer le vocabulaire (lexique, terminologie) de base utilisé dans ce travail. Un sandwich typique est représenté sur la (figure I-2) est constitué [8]:

- **deux peaux fines ;**
- **d'une âme ou cœur en sandwich**

Ces différentes couches sont liées par un film de colle, la liaison entre deux couches successives est couramment appelée l'interface.

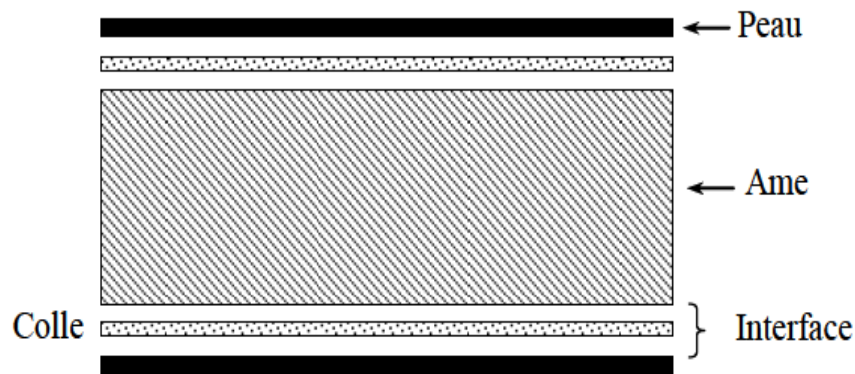


Figure (I-2) sandwich typique

I-3-1 L'Âme :

Elle peut être réalisée avec les matériaux suivants :

Mousses : Ces matériaux légers peu onéreux, facilement usinables et ont cependant de très faibles caractéristiques mécaniques.

Balsa : Est un bois bien connu pour ces différentes utilisations et de leurs principales qualités que la légèreté, le haut pouvoir d'isolation thermique et acoustique et la non déformation aux variations thermiques.

Nid d'abeille : Cette structure est réalisée généralement à partir de matériau en plaques minces (alliage d'aluminium, papier polyamide). Des raies de colle sont disposées en bande régulières sur les plaques qui sont collées entre elles pour former un bloc, ce dernier est coupé en tranches qui seront, transformées à leur tour en planche de nida ' nid d'abeille par expansion. Il existe deux types d'âmes :

a) Les âmes pleines :

Les âmes le plus couramment utilisées sont :

- * Le balsa ou bois cellulaire (Figure I.3 a)
- * Diverses mousses cellulaires (Figure I.3 b)
- * Des résines chargées de microsphères creuses
- * Des résines chargées de microsphères creuses de verre appelé mousses syntactiques.

b) Les âmes creuses :

Elles sont présente essentiellement en nid d'abeille (figure I.3.b) elles sont :

- *Des alliages métalliques légers
- *Des papiers kraft
- *Du papier polyamide, type papier Nomex

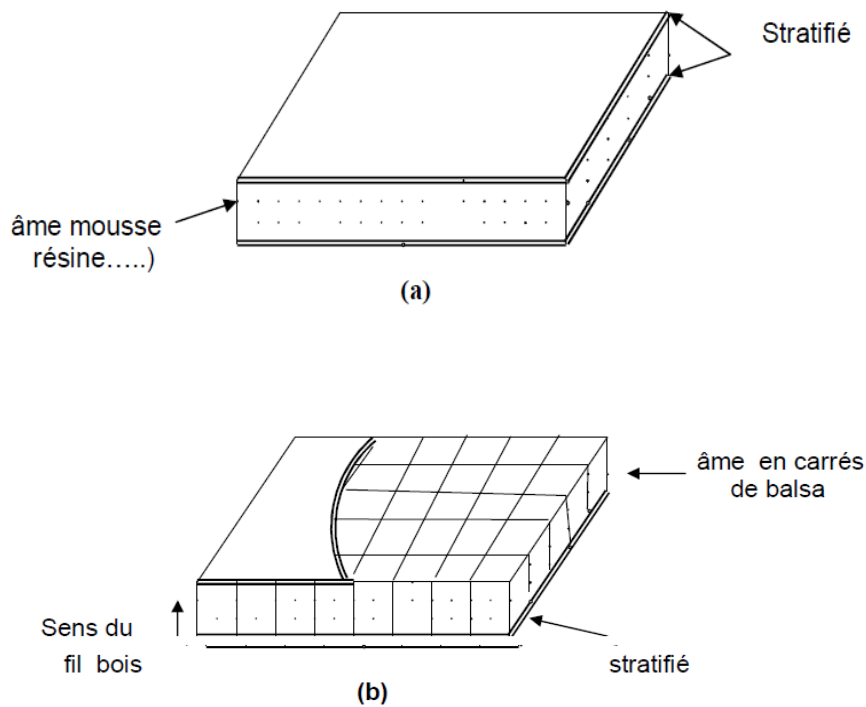


Figure (I.3): Matériaux sandwichs à âmes pleines

I-3-2 Les Peaux

les peaux sont le plus souvent des stratifiés à renfort fibreux (verre , carbone , kevlar...) dans le cas de panneaux sandwichs, les peaux peuvent être du carbone/ époxyde, kevlar / époxyde ou encore bore /époxyde , ou métallique ' Al, Acier , Inox , ou des feuilles d'alliages légers, par leur rapport rigidité / poids meilleur, un certain nombre de structures sandwichs métalliques sont remplacées par des sandwichs composites.

Les matériaux sandwichs sont caractérisés par :

- * Une grande légèreté a titre de comparaison la masse surfacique de la coupole de la basilique Saint – Pierre (45 mètres de portée) et de 2600 Kg / m² (construction en pierre).

La masse surfacique d'une même coupole en sandwich acier/ mousse de polyuréthane est de 33 Kg / m² [10].

* Une grande rigidité flexionnelle due à l'écartement des peaux Excellentes caractéristiques d'isolation thermiques .En revanche, les matériaux sandwichs n'amortissent pas et leur tenue au feu n'est pas bonne pour certaines catégories d'âmes et le risque de flambement est plus élevé que pour les structures classiques.

I-3-3 L'interface :

Le mode d'assemblage du sandwich peut être le collage, le soudage ou brasage l'aspect géométrique de l'âme est souvent compliqué et peut conduire à des propriétés mécaniques locales extrêmement complexes. On est donc amené à simplifier le modèle correspondant aux matériaux de l'âme pour des raisons pratiques et numériques. Ainsi les différentes théories fondent généralement l'hypothèse d'un matériau homogène pour l'âme ce qui implique que la contrainte de cisaillement transverse y est constante (ou quasi constante).on pourra par exemple utiliser des méthodes d'homogénéisation basées sur l'énergie. De plus, nous supposerons aussi que , quel que soit le mode d'assemblage des différentes couches , le lien est parfait .

I-4 Sollicitation Et Ruine Des Matériaux Sandwichs

Les principaux charges supportées par ces structures sont la flexion, la torsion, la compression ou l'extension un sandwich peut être donc soumis à un

- Moment de flexion
- Moment de torsion
- Effort normal
- Effort tranchant

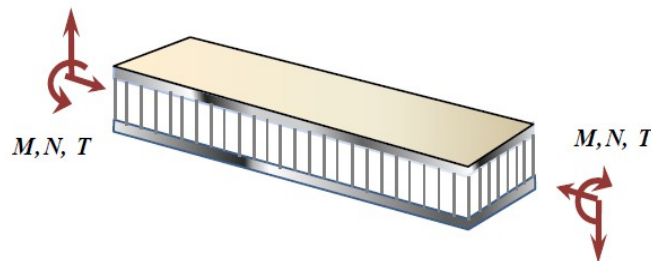
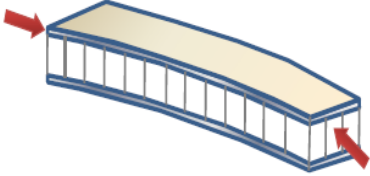
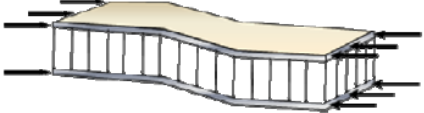
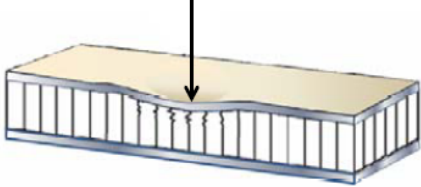
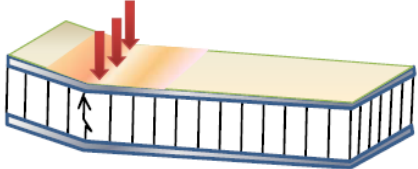


Figure (I.4) : Différent sollicitations (M, N, T) appliquées à un sandwich.

Tableau (I-1) :

Les différents modes de ruine résultants de ces sollicitations

<p style="text-align: center;">Flambement généralisé des peaux</p> <p>Le flambement généralisé peut survenir quand les contraintes dans les peaux et dans l'âme sont inférieures aux résistances à la rupture. La charge de flambement du sandwich dépend des paramètres tels que les dimensions dans le plan de la poutre et les conditions aux limites, qui ne peuvent être modifiées que partiellement lors de conception. D'autres grandeurs également importantes dans la définition de la charge de flambement dépendent directement, du type de sandwich comme la rigidité de flexion du sandwich, l'épaisseur des peaux, les propriétés élastiques des peaux, l'épaisseur de l'âme ou le module de cisaillement de l'âme.</p>	
<p style="text-align: center;">Flambement généralisé des peaux "crimping"</p> <p>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 d'un flambement de l'âme (figure ci-contre). Le flambement de l'âme ne dépend pratiquement pas des propriétés des peaux, par contre il augmente de façon linéaire avec l'épaisseur de l'âme et le module de cisaillement dans l'âme.</p>	
<p style="text-align: center;">Mode local de rupture par indentation</p> <p>L'indentation locale est un mode 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.</p>	
<p style="text-align: center;">Rupture de l'âme par cisaillement</p> <p>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. Si l'on se trouve dans ce cas, on peut soit utiliser un matériau pour l'âme qui possède une résistance au cisaillement plus élevé, soit augmenter l'épaisseur de l'âme.</p>	

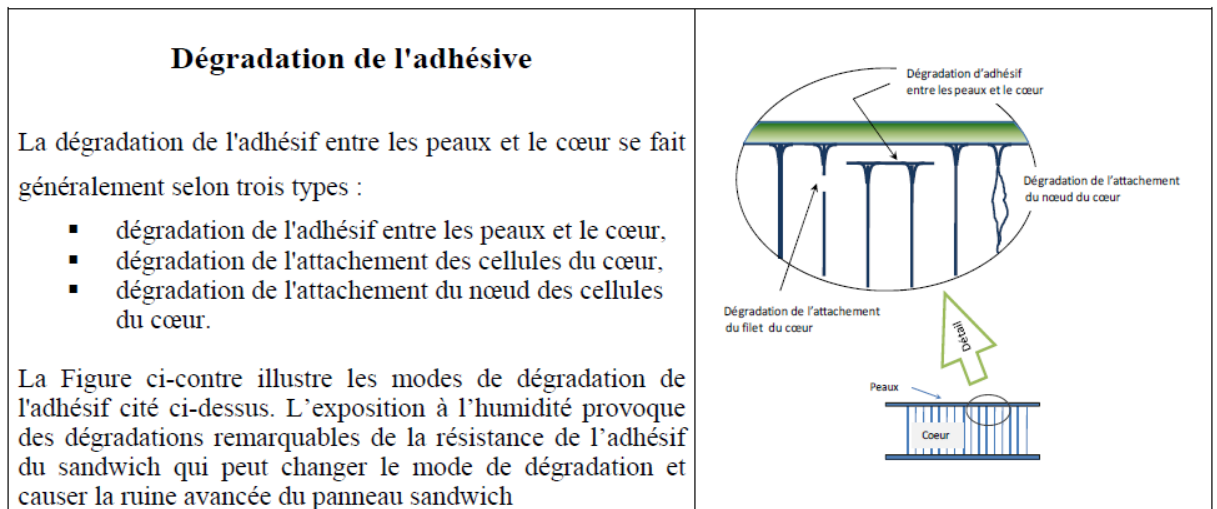


Tableau (I-1) Différent Modes De Ruine Des Panneaux Sandwiches

I-5 Théories Des Plaques Sandwiches :

Un matériau sandwich est constitué figure (I-1) d'un matériau de faible masse volumique (cœur) sur lequel sont collées des couches (les peaux) à rigidité et résistance élevées. La fonction essentielle de l'âme du sandwich est de transmettre par cisaillement transverse, les actions mécaniques d'une peau à l'autre. Les peaux peuvent être constituées par des stratifiés ou par des matériaux métalliques d'épaisseur h_1 (peau inférieure) et d'épaisseur h_2 (peau supérieure).

L'épaisseur de l'âme sera notée h_c et l'épaisseur totale du sandwich $H(H=h_1+h_c+h_2)$. En chaque point de la structure sandwich, le système de coordonnées sera choisi de manière que le plan (x,y) soit le plan moyen.

I-5-1 Hypothèses De La Théorie Des Matériaux Sandwichs

La théorie des matériaux sandwichs est basée sur les hypothèses suivantes :

- l'épaisseur de l'âme est plus élevée que celle des peaux ($h_c \gg h_1, h_2$)
- les déplacements de cœur u_c et v_c suivant les directions x et y sont des fonctions linéaires de la coordonnée z .
- les déplacements de cœur u_c et v_c suivant les directions x et y sont uniformes dans l'épaisseur des peaux.

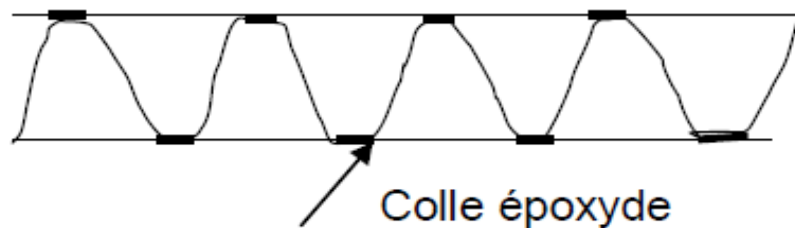
- Le déplacement transverse w est indépendant de la variable z : la déformation ε_z est négligée.
 - L'âme ne transmet que les contraintes de cisaillement transverse σ_{xz}, σ_{yz} : les contraintes σ_{xx} et σ_{yy} , σ_{xy} et σ_{zz} sont négligées.
 - Les contraintes de cisaillement transverse τ_{xz} et τ_{yz} sont négligées dans les peaux.
- Enfin la théorie traite les problèmes d'élasticité en faible déformations.

I-6. Techniques d'assemblages des matériaux Sandwichs

I.6.1 Le collage de peau sur l'âme :

Pour que les structures sandwichs jouent pleinement leur rôle, il est nécessaire de veiller à avoir une solidarisation parfaite de l'ensemble âme – peaux de manière à répartir les efforts entre âme et peaux.

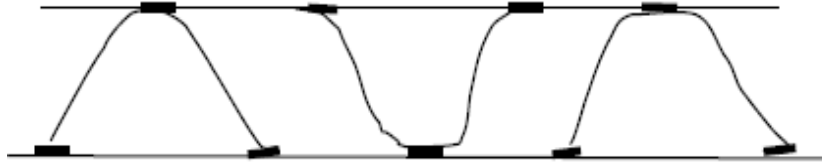
L'assemblage est réalisé selon la (Figure I.5) par un collage à l'aide de résines compatibles avec les matériaux en présence.



(a) : Collage De Tôle Ondulée Ou Raidisseurs Sur Tôle



(b) : Panneaux Avec Tubes Carré



(c) : Panneaux Avec (w) inversés

Figure (I-5) : Panneaux réalisés par collage à partir de profils divers.

I.6.2 Technique De Pliage :

Après mise en œuvre les panneaux sandwichs peuvent être formés par pliage comme il est indiqué sur la (Figure I.6).

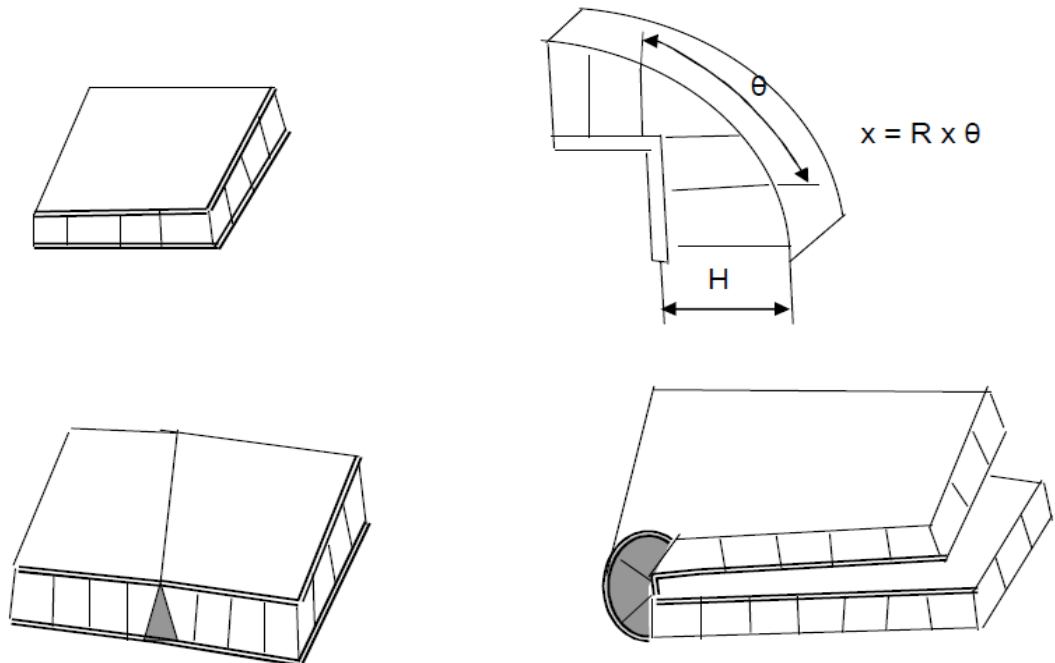


Figure (I.6) : Pliage de panneaux sandwichs

I.7 Domaines D'applications Des Matériaux Sandwichs :

Les panneaux sandwichs sont de plus en plus utilisés dans la conception des structures minces. Ils trouvent leurs applications dans l'aéronautique, l'automobile, la construction navale et ferroviaire.

I.7.1 Construction aérospatiale :

Les portes trappes de train d'atterrissages, carénages divers (entre aile de fuselage, mâts de réacteurs, glissières de volets) sont des pièces secondaires réalisés en panneaux sandwichs et par cuisson de stratifiés composites (carbone/ époxyde, kevlar /époxyde) sur nida nomex ou aluminium collés avec des adhésifs époxydes en films.

Les capots des moteurs sont les plus souvent réalisés avec des sandwichs constitués de peaux en carbone / époxyde collés sur des âmes en nida aluminium [11]

Afin d'obtenir la résistance à la chaleur nécessaire, on utilise des adhésifs époxydes phénoliques ou polyamides.

Les panneaux acoustiques sont des structures sandwichs dont la peau intérieure, coté moteur est constituée d'une peau perforée sur laquelle est collé un tissu microporeux. Des nombreuses pièces d'hélicoptères sont constituées de pièces monolithiques ou de sandwichs avec peaux en composites collées sur nida .

Dans les domaines astronautique et d'armement, on a besoin de tenue à la chaleur et aux variations thermiques encore plus élevées. Les réflecteurs solaires sont en peaux de carbone/époxyde et l'âme en nida nomex.

I.7.2 Construction Automobile Et Ferroviaire :

Les matériaux sandwichs sont également utilisés et assemblés par collage dans la construction de camions, d'autobus, dans ce domaine on peut utiliser des peaux en stratifié verre/polyester et d'âme en mousse polystyrène expansé.

Le métro et tramways, demandant des démarrages fréquents, constituent un bon marché pour les matériaux sandwichs. Les portes d'accès sont en panneaux sandwichs avec des peaux en composites verre/ polyester ou en aluminium collées par des adhésifs intérieurs sont aussi en panneaux sandwichs avec âme en nida aluminium ou nomex

I-8 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous sommes attachés à présenter et à définir la notion de matériaux sandwich. Dans un premier temps nous avons présenté les principales propriétés mécaniques des structures sandwiches, ainsi que les différents modes d'endommagement. Le chapitre suivant va porter sur la présentation des matériaux à gradient de propriétés "FGM" tous en définissant leur concept et leurs caractéristiques puis nous définissons les lois qui régissent ce matériau.