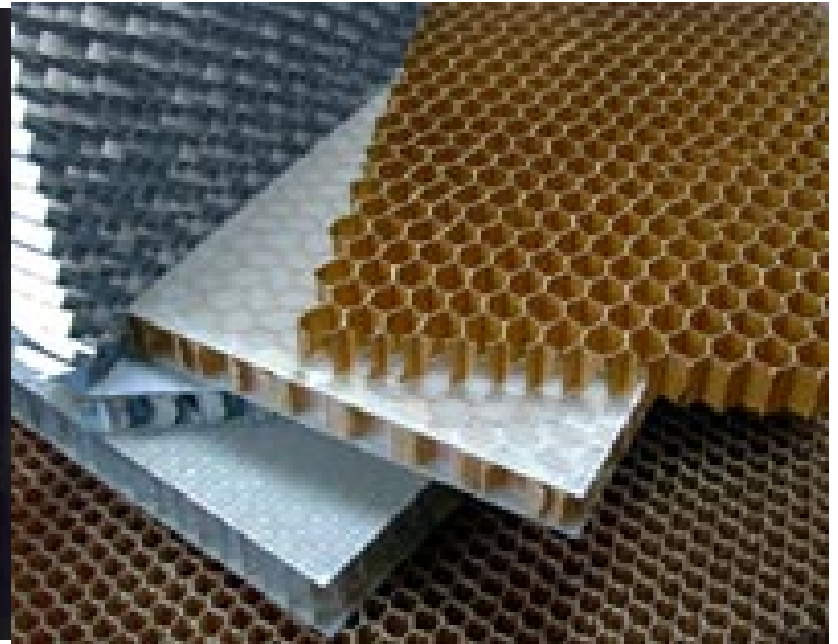
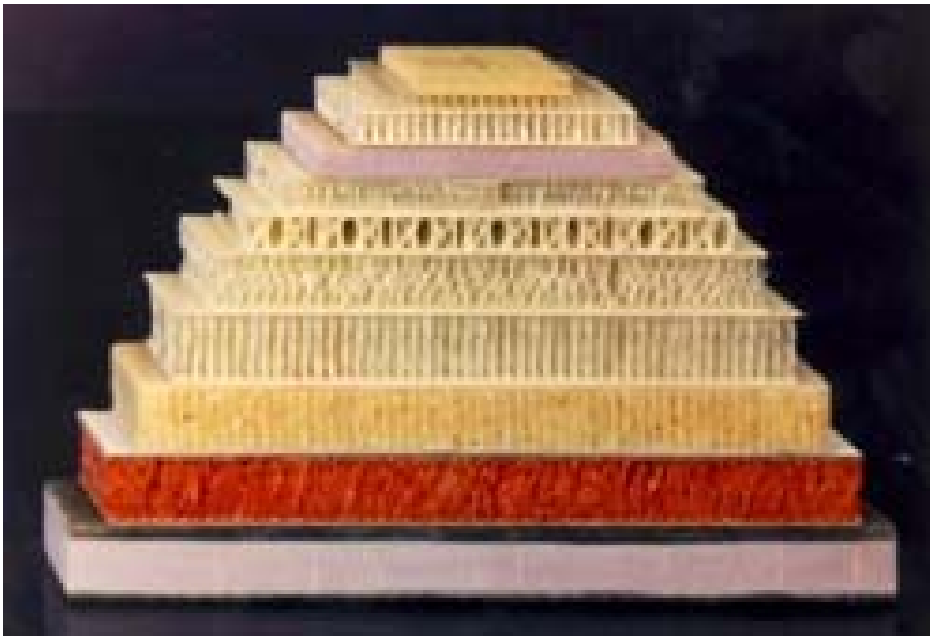


Structure sandwich



Une structure sandwich est obtenue à partir de deux peaux ou semelles, réalisées dans un matériau ayant de très bonnes caractéristiques mécaniques, collées sur une âme réalisée avec un matériau très léger et ayant de faibles caractéristiques mécaniques.

Une telle structure présente en flexion des rapports résistance/masse et rigidité/masse très importants.

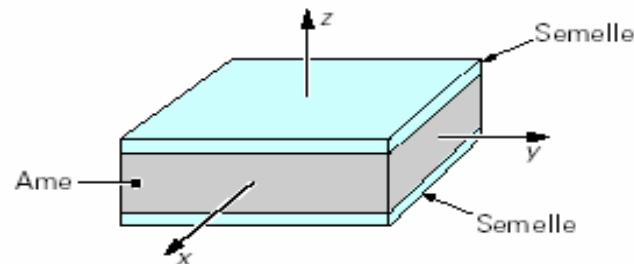
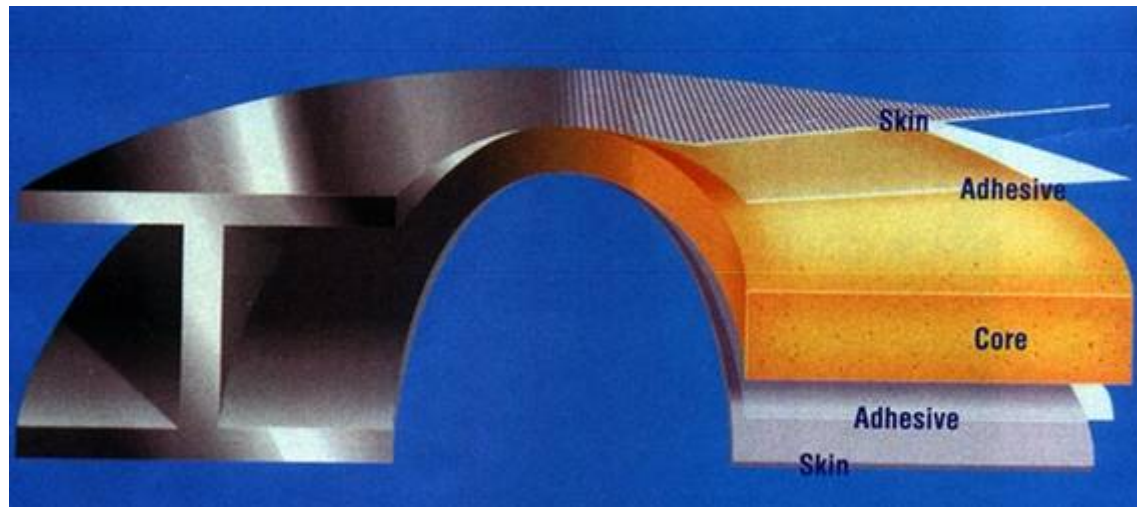
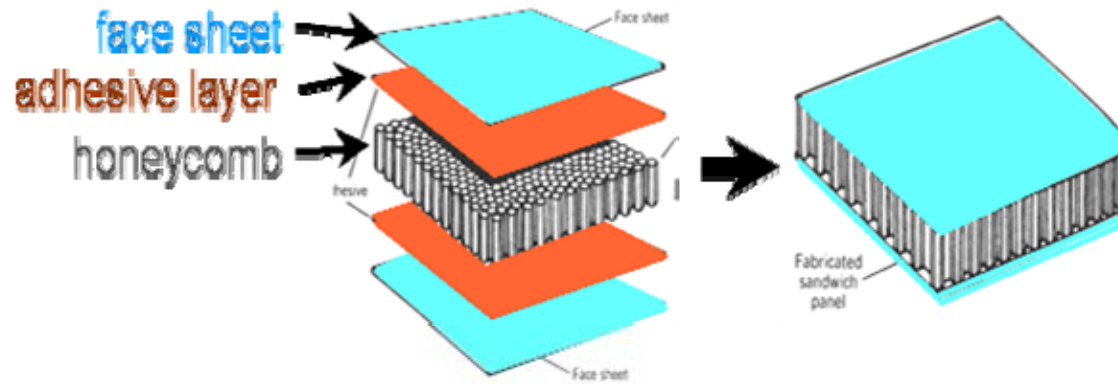


Schéma	Plaque monolithique	Plaques sandwiches	
Caractéristique			
Rigidité relative	100	700	3700
Résistance relative	100	350	925
Masse relative	100	104	108

Plaque sandwich

Sandwich construction



- **L'âme ou élément central** peut être soit en nid d'abeilles, en mousse, en bois de balsa, etc. **Son rôle principal est de résister aux efforts de cisaillement.**

- **Les peaux externes** d'égale épaisseur ou non, peuvent être fabriquées avec différents matériaux, en feuille ou en plaque. **Un module d'élasticité élevé ainsi qu'une grande résistance à la compression et à la traction sont les principales qualités recherchées**

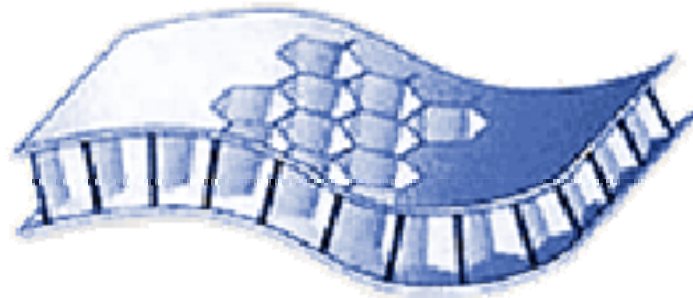
Âmes		Peaux
Nid d'abeilles	aluminium aramide polypropylène	acier aluminium
Mousse plastique	polystyrène expansé polychlorure de vinyle polyéthylène acrylique polyuréthane phénolique	stratifié bois, laminé contre-plaqué alliages ultra légers
Bois de balsa		plastiques renforcés ...

Types d'âme des structures sandwichs

Dans les faits, c'est le **constituant de l'âme** qui permet de **classer les différentes structures sandwichs**. Parmi les âmes les plus utilisées, citons celles en nid d'abeilles, en mousse et en bois de balsa.

L'âme en Nid d'abeilles

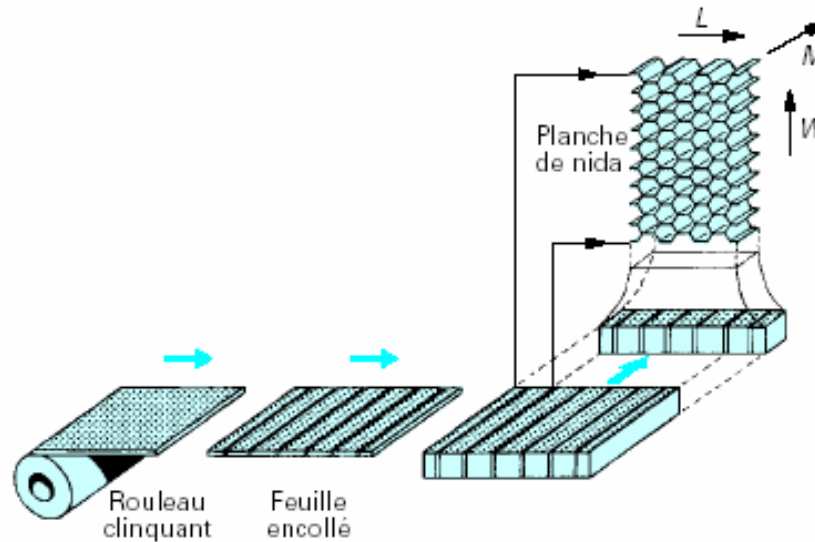
L'âme en nid d'abeilles, connue sous le nom « **Nida** », est un matériau structural souple constitué de mailles hexagonales, réalisée à partir de différents matériaux comme par exemple le papier ou l'aluminium.



Structure sandwich à âme Nida et peaux en stratifié

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.

Le Nida a des **propriétés mécaniques supérieures** à celles des **mousses**. Sa masse volumique peut varier entre 15 et 160 kg/m³ ; son épaisseur entre 3 et 150 mm.



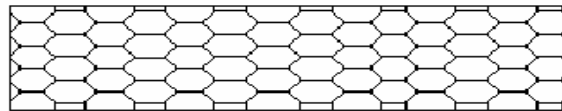
Mode de production des nids d'abeilles

Lorsque des structures sandwichs constituées d'une âme Nida sont soumises à un chargement, **les efforts en flexion sont absorbés par les deux peaux** tandis que les **efforts en cisaillement se répartissent entre les peaux et l'âme en Nida**. L'ensemble confère à cette structure sandwich légèreté, rigidité, stabilité dimensionnelle et résistance à la corrosion (Nidas non métalliques).

Parmi les âmes Nida les plus utilisées, nous retrouvons:

1) L'âme Nida métallique

L'aluminium et les alliages ultra légers sont les matériaux les plus utilisés pour fabriquer les Nidas métalliques. Par exemple, le nid d'abeilles « Aéroweb » est constitué de mailles hexagonales en aluminium. Étant donné la faible densité et les performances physiques et mécaniques élevées du Nida Aéroweb, il est utilisé principalement comme âme destinée à prendre les efforts de cisaillement dans des constructions sandwichs collées légères.



vue en plan



vue de côté

Structure du Nida

Cependant à **température élevée** les propriétés mécaniques de tous les types de Nidas métalliques disponibles dépendent des propriétés de l'aluminium et de la tenue à la chaleur de l'adhésif utilisé pour le collage des feuilles.

Propriétés				
Masse volumique du Nida (kg/m³)	29	54	62	83
Épaisseur de la paroi des alvéoles (mm)	0,064	0,038	0,102	0,064
Résistance au cisaillement τ_{xz} (MPa)	0,6	1,5	1,8	2,9
Module de cisaillement G_{xz} (MPa)	120	270	310	430
Résistance au cisaillement τ_{yz} (MPa)	0,44	1,0	1,2	1,8
Module de cisaillement G_{yz} (MPa)	70	170	200	270
Résistance en compression σ_z (MPa)	0,7	2,1	2,9	4,6
Taille des alvéoles (mm)	19	6,3	13	6,3

Propriétés mécaniques et géométriques du nid d'abeilles en aluminium

2) L'âme Nida en papier

L'emploi de papier «Nomex», un produit technique fabriqué de fibres aramides coupées et d'un liant en polymère aramide pour fabriquer des Nidas, procure à l'âme de bonnes propriétés mécaniques.

Le Nida en « Nomex » par rapport au Nida en aluminium à **l'avantage d'être souple et d'avoir une densité inférieure à rigidité égale**. De plus, le **papier** étant non métallique, il a aussi **l'avantage d'être un isolant thermique**.

Propriétés				
Masse volumique du Nida (kg/m ³)	24	32	48	64
Épaisseur de la paroi des alvéoles (mm)	0,05	0,05	0,05	0,08
Résistance au cisaillement τ_{xz} (MPa)	0,7	1,1	1,8	2,5
Module de cisaillement G_{xz} (MPa)	25	34	52	70
Résistance au cisaillement τ_{yz} (MPa)	0,35	0,6	0,9	1,1
Module de cisaillement G_{yz} (MPa)	14	20	29	35
Résistance en compression σ_z (MPa)	0,7	1,1	2,2	3,8
Taille des alvéoles (mm)	6	5	3	5

Propriétés mécaniques et géométriques du nid d'abeilles en polyaramide (Nomex)

3) L'âme Nida en plastique

Le Nida en plastique est un nid d'abeilles extrudé en polypropylène utilisé comme âme de structure sandwich (panneaux). Par exemple, les nids d'abeilles «Nidaplast» se présentent sous forme de panneaux ou de blocs. La nature thermoplastique de ces nids d'abeilles facilite leur mise en forme.

Ils sont thermiquement isolants grâce à l'air emprisonné dans les alvéoles et bénéficient de propriétés d'isolation acoustique de part la nature viscoélastique du polypropylène.

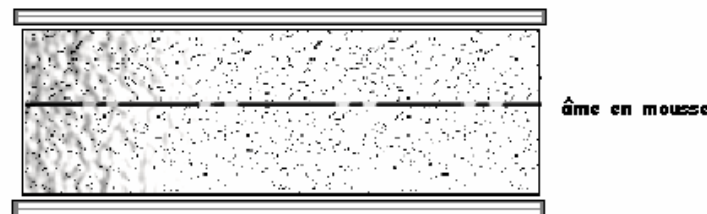
Les sandwichs en Nida polypropylène sont **moins rigides** que ceux en « Nomex » ou en aluminium mais demeurent plus légers et moins dispendieux

4) L'âme en mousse

Les mousses sont des matières plastiques cellulaires. De nature thermoplastique ou thermodurcissable, rigides ou souples.

Ayant une masse volumique variant entre 30 et 300 kg/m³ et des épaisseurs de 3 à plus de 40 mm, elles sont thermoformables et sculptables ce qui permet de réaliser des pièces complexes. Leurs propriétés mécaniques sont bonnes mais demeurent limitées. Elles adhèrent bien à la résine et adsorbent peu d'eau. De plus, les matières plastiques cellulaires (mousses) sont basées essentiellement sur le principe de l'occlusion de l'air au sein d'un solide ayant la plus faible conductivité possible.

Les plus fréquemment utilisées sont produites à partir de PVC, de polystyrène, de polyuréthane ou d'autres polymères synthétiques.



Structure sandwich en mousse plastique avec peaux en stratifié,

5) L'âme en bois de balsa

Le bois de balsa est utilisé pour sa très bonne **résistance à la compression** dans le sens des fibres du bois. Ayant une structure cellulaire, le bois de balsa permet de fabriquer des sandwichs hautement résistants et très légers. Le masse volumique de ce type d'âme varie entre 40 et 250 kg/m³.

Le bois de balsa est aussi un isolant thermique mais pour conserver cette propriété, il doit être traité avec un produit hydrofuge puisqu'il est très hygroscopique.

Le sens des fibres du balsa doit toujours être **perpendiculaire** à la direction des peaux.



âme en bois

Structure sandwich en bois de balsa et peaux en stratifié,

L'application consommant le plus de balsa demeure l'isolation des immenses réservoirs de gaz liquide des méthaniers. Une seule sphère nécessite pas moins de 100 mètres cubes de bois. Le bois de balsa est aussi utilisé pour la fabrication de planchers d'avion comme sur le BOEING 747 (sandwich de balsa et de feuille d'aluminium) et la fabrication de containers transportables pour les avions et les hélicoptères cargos.

Les propriétés mécaniques du bois de balsa sont en général **supérieures** à celles des mousses.

Propriétés	Bois Balsa Belco	Mousse R62.80
Module en flexion (MPa)	2900	27
Résistance à la traction (MPa)	12,70	1,80
Résistance à la compression (MPa)	9,50	1,10
Résistance au cisaillement (MPa)	1,80	0,65

Comparaison entre le Bois Balsa Belco et la mousse

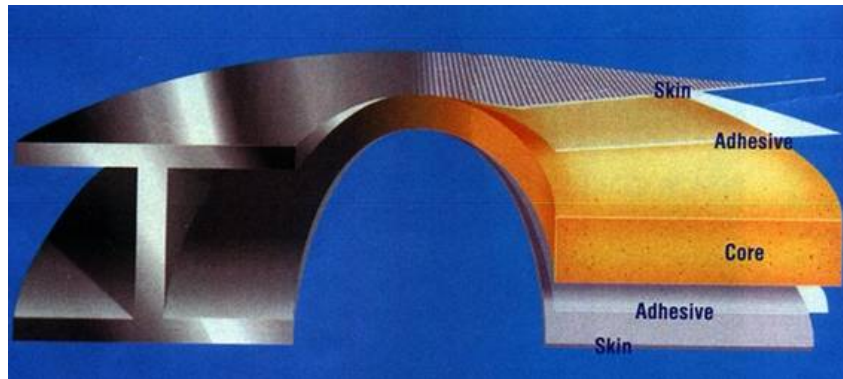
Les feuilles ou peaux

Elles sont constituées le plus souvent:

- Pour les composites à moyennes et hautes performances, de stratifiés à matrice thermodurcissable (phénoplastes, polyesters insaturés, polyépoxydes) et d'un renfort fibreux (mat et tissu) de verre, de carbone ou d'aramide
- Pour les structures portantes (aéronautique) de feuilles métalliques

L'assemblage des peaux de l'âme est réalisé par collage:

- Soit par un film de colle (EP généralement) lorsque la peau est préfabriquée,
- Soit par imprégnation directe à la mise en œuvre (cas de polyesters insaturés).



Conception des structures sandwichs

Bien que généralement conçues pour être soumises à des **efforts en flexion**, les structures sandwichs le sont aussi pour répondre à d'autres exigences, comme l'isolation thermique, acoustique, etc.

Le choix du type de sandwich dépend surtout de son application. Les principaux objectifs du concepteur d'un « sandwich » sont de **choisir** les **matériaux appropriés** constituant la structure ainsi que de **déterminer** les **épaisseurs respectives** des peaux et de l'âme de façon à résister aux moments fléchisseurs, au cisaillement et aux contraintes axiales induites par les forces appliquées sur elles.

Généralement, la conception est basée sur la théorie des sandwichs (théorème des poutres homogènes) et la sélection de matériaux ayant les propriétés appropriées.

1 Sélection des matériaux – âme

D'un point de vue mécanique, le **critère de sélection** du matériau de l'âme est une **résistance élevée au cisaillement**. Son faible coût de production, sa fiabilité dans le temps, sa faible absorption d'eau ou humidité, son comportement face au feu et à la chaleur, ses capacités d'isolation acoustique et thermique peuvent aussi être des critères décisifs dans le choix du matériau.

1.1 Résistance en flexion

Généralement, les structures sandwichs sont plus rigides que les poutres conventionnelles. Cela étant dû à la distribution géométrique efficace et au support des efforts par les peaux qui permettent l'obtention d'un facteur de rigidité $\langle EI \rangle$ plus élevé.

Les peaux doivent adhérer le mieux possible à l'âme puisque le comportement mécanique final de la structure sandwich est directement lié à cette adhérence.

1.2 Résistance aux chocs

La résistance à l'impact d'une structure sandwich composite est largement influencée par la capacité d'absorption de l'énergie par l'âme. Cette capacité d'absorption peut être améliorée en augmentant la densité du matériau qui compose l'âme. Soumis à un impact, on observe un comportement tout à fait différent s'il s'agit d'une âme en mousse ou d'une âme en nid d'abeilles. L'âme en mousse diffusera l'énergie de l'impact à l'intérieur même du sandwich en l'absorbant dans sa structure cellulaire. C'est pourquoi les mousses PVC d'origine thermoplastique ainsi que les mousses thermodurcissables flexibles ont une bonne capacité d'absorption des chocs.

Dans le cas d'une âme en nid d'abeilles, les parois transfèrent l'énergie perpendiculairement d'une peau à l'autre, ce qui peut donc occasionner la déchirure de la peau opposée.

1.3 Résistance à la compression

Les charges de compression sont totalement transférées à l'âme du sandwich. Les structures en nid d'abeilles permettent de supporter des contraintes de compression, normales aux panneaux, élevées. Par contre leur anisotropie favorise leur rupture lorsqu'elles sont chargées dans plusieurs directions comme dans le cas des pièces soumises à des charges hydrostatiques. On préconise alors comme solution une combinaison nid d'abeilles et mousse

1.4 Résistance au décollement (pelage)

Une résistance insuffisante au décollement peut conduire au **délaminage** des peaux et être la cause de ruptures catastrophiques. En général, dans les sandwichs à âme en mousse, la résistance du joint de colle entre les peaux et l'âme doit être supérieure à la résistance au cisaillement de l'âme. Les mousses de **PVC** donnent des forces d'adhésion supérieures à celles obtenues avec le balsa ou le polyméthacrylimide (PMI). Les mousses de polyuréthane (PU), elles, sont fragiles, ce qui rend leur collage difficile. Quant aux âmes en nid d'abeilles, leur surface de contact réduite explique qu'il est difficile d'obtenir une résistance élevée au pelage.

1.6 L'isolation

La diminution de poids, l'isolation acoustique et thermique ainsi que l'amortissement des vibrations sont nécessaires dans plusieurs applications.

Grâce à leur structure cellulaire, beaucoup de mousses obtiennent de très bons résultats en ce qui a trait à l'isolation thermique et acoustique alors que les structures en nid d'abeilles offrent des performances moins probantes, plus limitées.

Par conséquent, lorsqu'il est nécessaire d'avoir de bonnes propriétés en terme d'isolation thermique et acoustique, les structures sandwichs avec âme en mousse sont des choix judicieux. Lorsque la diminution de poids est le seul objectif, les structures sandwichs avec âme en nid d'abeilles devraient être envisagées.

1.5 Absorption d'eau

L'absorption d'humidité et d'eau par l'âme des structures sandwichs peut causer une diminution importante et significative de ses propriétés mécaniques. Dans le cas où les peaux des sandwichs seraient abîmées, l'utilisation d'âmes sensibles à l'eau ou à l'humidité augmente encore plus le risque de délaminage. Même en service normal, l'évaporation interne d'eau absorbée peut causer un délaminage des peaux. Pour solutionner ce problème, un traitement thermique additionnel de l'âme est parfois nécessaire avant la mise en œuvre du sandwich

Modèles de conception analytique

La résistance et le module d'élasticité des peaux conditionnent le comportement à la flexion d'un sandwich.

En flexion, une des peaux du sandwich est sollicitée en traction et l'autre en compression, tandis que l'âme transmet le cisaillement. C'est pourquoi, ce type de construction fait de la structure sandwich, une structure peu flexible, recherchée pour sa rigidité. De plus on peut augmenter l'inertie du panneau en augmentant l'épaisseur de l'âme.

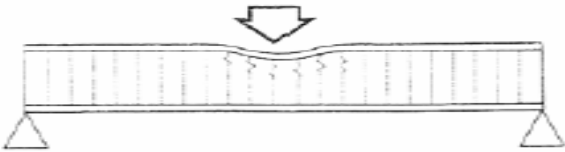
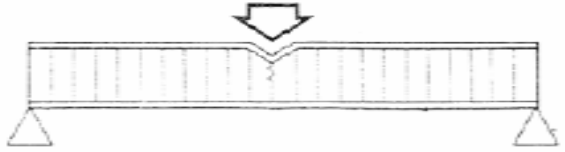

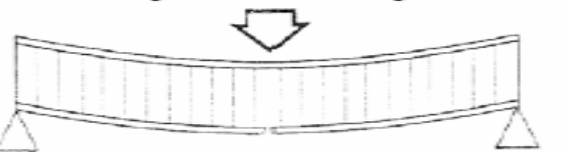
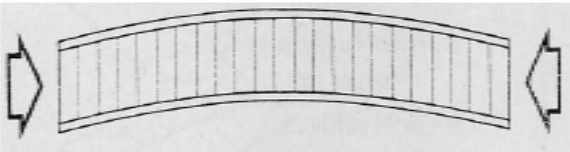
Modèles de conception analytique

Plusieurs paramètres interviennent dans la conception et le calcul d'un panneau sandwich soumis à un effort de flexion :

- La flèche de la déformation, δ ;
- La résistance à la rupture et le module de l'âme et/ou des peaux;
- Le mode de sollicitation statique ou dynamique.

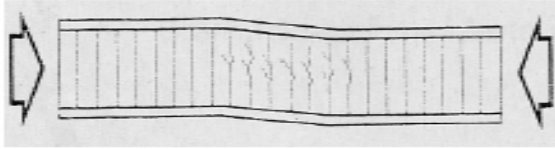
Essais ASTM	Types d'essai
C274	Terminologie concernant les structures sandwichs
C273	Propriétés en cisaillement des âmes
C297	Propriétés en tension de sandwichs
C364	Propriétés en compression de l'âme du sandwich dans la direction perpendiculaire au plan des peaux
C365	Résistance en compression dans la direction parallèle au plan des peaux
C393	Propriétés en flexion de sandwichs
C394	Propriétés en fatigue obtenues par le cisaillement d'âme
D1781	Pelage des sandwichs
E2004	Force de clivage requise pour décoller les peaux du panneau sandwich
D256	Résistance aux chocs de composites renforcés
C271	Densité de l'âme des sandwichs
C272	Absorption d'humidité de l'âme

Certaines normes qui permettent la caractérisation mécanique des structures sandwichs

Problèmes	Descriptions	Solutions possibles
<p>Écrasement local de l'âme Poinçonnement</p> 	<p>Ceci arrive lorsqu'une charge est concentrée en un point de la structure. La rupture se produit lorsque la résistance à la compression de l'âme est insuffisante.</p>	<p>Pour éviter ce problème, on doit utiliser une âme de densité plus élevée.</p>
<p>Indentation de la peau</p> 	<p>Elle peut être causée par l'impact d'un objet à bords contondants.</p>	<p>Une des solutions est d'augmenter l'épaisseur des peaux</p>
<p>Rupture par cisaillement transversale - Pliage</p> 	<p>La rupture est due à la faible résistance au cisaillement de l'âme ou à l'épaisseur insuffisante des peaux.</p>	<p>Augmenter la résistance au cisaillement de l'âme ou modifier la conception afin de mieux distribuer les charges de cisaillement.</p>
<p>Rupture d'une peau</p> 	<p>Elle se produit dans le cas de peaux trop minces.</p>	<p>Augmenter l'épaisseur des peaux ou l'épaisseur de l'âme pour rigidifier d'avantage la structure.</p>
<p>Flambage des peaux</p> 	<p>Causé par une épaisseur de la structure insuffisante ou la faible rigidité de l'âme.</p>	<p>Augmenter l'épaisseur de la structure.</p>

Suite du tableau 2.3 : Modes de rupture des panneaux symétriques

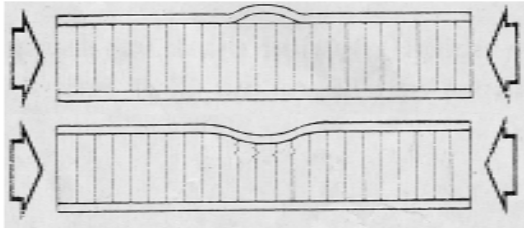
Flambage irrégulier



Ceci arrive lorsque le module ou la résistance au cisaillement est trop faible

Utiliser une âme de résistance plus élevée.

Délaminage ou écrasement de l'âme



Le sens de l'ondulation, produite vers l'intérieur ou vers l'extérieur, dépend du rapport entre la résistance à l'arrachement de l'adhésif et la résistance à la compression de l'âme.

Modes de rupture des panneaux symétriques,

Les applications

En changeant les matériaux constitutifs de l'âme (légère, acoustique et thermiquement isolante, etc.) et les peaux (étanches, résistantes aux intempéries, au feu, à l'eau, aux chocs, etc.), il est possible de concevoir des structures adaptées pour des applications précises . C'est pourquoi les structures sandwichs sont aujourd'hui largement utilisées dans autant de secteurs industriels. Parmi ceux-ci, on peut citer les transports, l'aéronautique, l'aérospatiale, le militaire, les loisirs, etc.