

Principales notations

- b : largeur de la poutre
- D : variable d'endommagement
- e_a : épaisseur de l'âme
- E_a : module d'Young de l'âme
- e_p : épaisseur des peaux
- E_p : module d'élasticité des peaux
- E_s : module du matériau solide, base de la mousse avant expansion
- \bar{E} : module du matériau endommagé
- G_a : module de cisaillement de l'âme
- H : dureté
- K : raideur de l'éprouvette saine
- K_c : ténacité
- \bar{K} : raideur de l'éprouvette endommagée
- L : longueur de la poutre
- l_c : dimension de la cellule de la mousse
- n : nombre de cycles
- N : nombre de cycles à la rupture
- P : charge appliquée
- R : rayon des sphères
- S : section droite de l'élément de volume
- S_D : aire des fissures et des défauts corrigée
- \bar{S} : aire résistante effective
- t : épaisseur des parois ou des arêtes des cellules
- T : température
- W_c : charge critique de transition
- α : profondeur de pénétration
- ε : déformation
- ε_e : déformation élastique
- ε_p : déformation plastique
- ρ_a : masse volumique de l'âme
- ρ_p : masse volumique des peaux
- ρ_s : masse volumique du polymère solide avant expansion
- σ : contrainte
- σ_{es} : limite élastique du matériau solide, avant expansion
- σ_{rs} : contrainte de rupture du matériau solide, avant expansion
- δ : flèche
- δ^* : profondeur de transition ductile fragile
- Γ : taux d'enlèvement de matière

Chapitre I

Les structures sandwich

1. LES STRUCTURES SANDWICH ARTIFICIELLES

Les étagères de certains meubles de grande diffusion, les skis, les tiges et cosses de végétaux, les coques de bateaux de course, les planchers du TGV, les os, les panneaux préfabriqués d'habitations, les carlingues d'avions, les pales d'hélicoptères, les aubes de turbine... ont des structures qui sont de même type : des peaux rigides externes entourent une âme légère. On est en présence de matériaux sandwich qui permettent d'obtenir une rigidité élevée avec une masse minimale.

Un matériau sandwich est constitué de deux peaux aux propriétés mécaniques élevées collées sur une âme légère à faibles caractéristiques mécaniques [1.1]. Ces structures sandwich ont en général des peaux minces : le rapport de l'épaisseur du cœur à l'épaisseur de la peau est compris entre 10 et 100, figure 1.1.

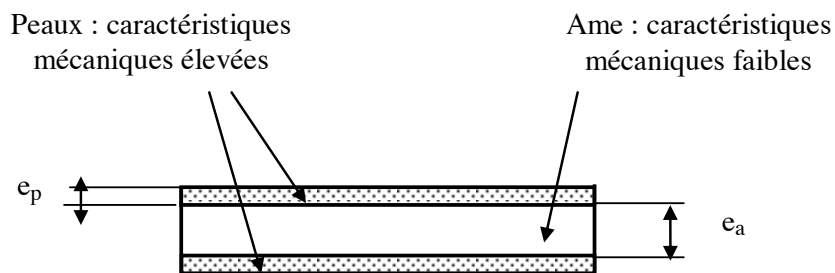


Figure 1.1 : coupe d'une structure sandwich.
 $10 < e_a / e_p < 100$

1.1. Les peaux

Les peaux légères et présentant de bonnes caractéristiques mécaniques sont en métal (aluminium en particulier) ou en matériaux composites stratifiés.

a. Les matrices des peaux en composites stratifiés

Deux principales résines thermodurcissables, dont les propriétés mécaniques sont indiquées tableau 1.1, sont utilisées comme matrices.

- Les résines polyester, bon marché, sont souvent renforcées par des fibres de verre. La mise en œuvre ne nécessite pas de chauffage.
- Les résines époxydiques ont de meilleures caractéristiques mécaniques, sont plus chères et sont utilisées pour des pièces mécaniques plus sophistiquées. Elles sont généralement renforcées par des fibres de carbone pour réaliser des pièces de structure. La qualité de mise en œuvre impose des cycles précis de cuisson.

Propriétés	Densité	Module d'élasticité (GPa)	Résistance à la traction (MPa)	Allongement à la rupture (%)	Température supportée en continu (° C)
Polyester	1,2	2,9 – 3,1	50 – 60	2 – 3	120
Epoxy	1,1 – 1,4	3	50 – 120	3 – 8	150 – 200

Tableau 1.1 : propriétés mécaniques des principales résines.

b. Les renforts des peaux

Les renforts les plus courants sont constitués de fibres de verre, de carbone et parfois d'aramide. Les fibres sont utilisées brutes (sous forme de nappes unidirectionnelles ou broyées) et sous forme de produits textiles (filés, tissés, non tissés, tricots, rubans...).

La fibre de verre

La fibre de verre est le plus ancien matériau textile chimique. Le filage du verre était connu des Egyptiens. La production industrielle des fibres débute vers 1930. La fibre de verre est le renfort le plus répandu dans l'industrie des matériaux composites. De manière générale, le verre est obtenu par fusion à 1 550° C d'un mélange de silice, SiO₂, et d'éléments d'addition essentiellement sous forme d'oxydes. La composition est fonction des applications.

Deux principaux types de fibres de verre sont utilisés comme renforts de matériaux composites. La composition et les propriétés comparées [1.2] sont résumées tableau 1.2. Le verre E d'usage courant est utilisé dans 95% des fabrications de composites stratifiés. Le verre R présente une résistance mécanique supérieure à celle du verre E, résiste mieux à la fatigue et à la température, il est destiné aux applications structurales.

Composition et Propriétés	Verre E	Verre R
Silice SiO ₂	53 – 54 %	60 %
Alumine Al ₂ O ₃	14 – 15,5 %	25 %
Chaux CaO + Magnésie MgO	20 – 24 %	6 %(CaO) + 9 %(MgO)
Oxyde de bore B ₂ O ₃	6,5 – 9 %	
Fluor F	0 – 0,7 %	
Autres	< 1 %	
Diamètre des filaments	5 à 15 μm	10 μm
Densité	2,54	2,5
Module d'élasticité	75 GPa	85 GPa
Contrainte à la rupture	3 – 3,4 GPa	4,6 GPa
Allongement à la rupture	4 %	5 %

Tableau 1.2 : composition et propriétés, verre E et verre R.

Les fibres de verre sont obtenues par fibrage : fusion puis étirage à travers une filière. En fonction des procédés et des fournisseurs, le diamètre des filaments obtenus est compris entre 5 μm et 15 μm. Deux procédés de fibrage sont utilisés :

- le fibrage direct : les filières sont directement alimentées en sortie du four de fusion,
- le fibrage indirect, procédé plus ancien et qui tend à disparaître : des billes de verre fabriquées dans un premier temps alimentent le four filière.

Après la fusion, les filaments sont étirés à grande vitesse par un étirage mécanique, on obtient des filaments continus appelés silionne, ou par un étirage pneumatique qui conduit à des filaments discontinus appelés verranne. Les filaments sont ensuite ensimés. L'ensimage permet de coller les filaments entre eux, de les lubrifier pour faciliter les opérations ultérieures de mise en œuvre textile, mais sert essentiellement à améliorer l'adhérence entre fibres et résine lors de la mise en œuvre du composite. Les fibres de verre sont ensimées par des silanes qui permettent la réalisation de liaisons fortes avec la matrice. Les silanes possèdent deux groupements terminaux à réactivité chimique différente. Le premier est généralement un groupe alcoxy capable de réagir, après hydrolyse, avec les groupements silanols du verre, le deuxième est un groupement du type amine ou vinyle susceptible de réagir avec le polymère. On obtient ainsi des liaisons siloxane (Si – O – Si). Le principe du couplage est schématisé figure 1.2.

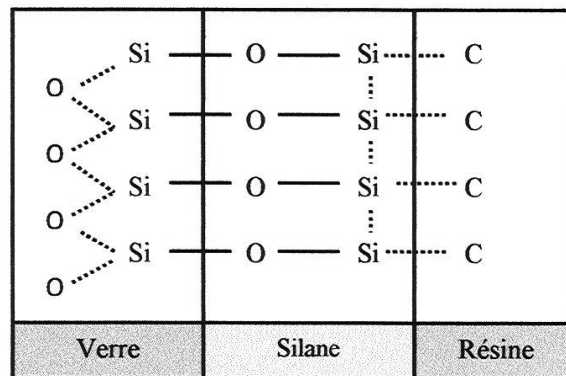


Figure 1.2 : principe du couplage créé par l'ajout de silane.

Les filaments de silionne ou de verranne permettent de former des fils. Par assemblage sans torsion des fils de silionne on obtient des mèches ou *roving*, en assemblant par torsion de la verranne on obtient un filé de fibres.

Les filaments coupés de silionne ou la verranne peuvent être mis sous forme de feutre (appelé mat). Des préformes sont également élaborées : des mèches sont imprégnées d'un liant et durcies par étuvage à la forme de la pièce.

Les fils peuvent être tissés. Les tissus diffèrent selon le mode de croisement entre les fils de chaîne (longitudinaux) et les fils de trame (transversaux). Le mode de croisement constitue l'armure du tissu. Selon l'armure du tissage on distingue les toiles, les sergés, les satins. Des tissages sont spécifiques aux applications industrielles (tissage 3D avec des fils incorporés perpendiculairement au plan du tissu, tissage pour réaliser des formes coniques ou cylindriques...). Les différentes présentations peuvent être proposées pré-imprégnées de résine : la mise en œuvre du matériau composite est alors plus aisée. Il n'y a pas de manipulation de résines, le procédé peut être automatisé et la qualité mécanique du matériau obtenu est excellente.

Le principal avantage des fibres de verre est leur faible coût. La contrainte à la rupture en traction, la résistance au choc, la compatibilité avec les résines et polymères, la résistance à la corrosion sont assez bonnes.

La densité des fibres est cependant relativement élevée (2,5 à 2,6), le module d'élasticité et la résistance à la fatigue (des fibres E en particulier) sont modestes.

La fibre de carbone

La fibre de carbone (plus précisément de carbone plus ou moins graphité) est obtenue à partir d'un précurseur organique, le polyacrylonitrile, lui-même sous forme de fibres. Les fibres de polyacrylonitrile sont oxydées à 300° C puis chauffées à 1 500° C. L'oxygène, l'hydrogène, l'azote sont éliminés, il ne reste que les chaînes hexagonales cycliques de graphite dont les plans sont orientés dans l'axe de la fibre [1.2]. La structure n'est pas parfaite, des défauts subsistent, le module d'élasticité est de l'ordre de 200 GPa. Une pyrolyse permet de réaligner les hexagones dans l'axe de la fibre. On obtient alors des fibres à haut module ou très haut module, de 400 à 600 GPa. Une dernière phase d'oxydation contrôlée en milieu acide a pour but d'accroître la rugosité des fibres afin de favoriser l'adhérence mécanique par ancrage de la résine à la surface de la fibre.

Les caractéristiques mécaniques des fibres à bas module (BM), à haut module (HM) et à très haut module (THM) sont regroupées tableau 1.3.

Caractéristiques	Fibres BM	Fibres HM	Fibres THM
Densité	1,7	1,9	1,95
Diamètre (μm)	8	8	8
Module d'élasticité (GPa)	180	400	600
Contrainte à la rupture en traction (GPa)	1,8	2,2	2

Tableau 1.3 : caractéristiques des fibres de carbone [1.2].

La densité des fibres est faible, le module et la contrainte à la rupture en traction sont élevés. La tenue en température et l'inertie chimique sont bonnes. Le matériau est cependant sensible à l'oxydation à température élevée, en présence de l'oxygène de l'air ou d'acides oxydants.

Le principal inconvénient des fibres est leur prix élevé, si on le compare à celui de la fibre de verre. Les fibres sont également sensibles au choc et à l'abrasion. Leur manipulation doit être soignée, il convient de ne pas plier ou rayer le tissu et d'éviter la présence de poussières.

Les filaments sont regroupés parallèlement, sans torsion, pour former un fil continu. Un fil comprend plusieurs milliers de filaments. Le fil continu peut être employé tel quel, souvent sous forme de rubans, de tresses, de tissus, de tissus hybrides (verre-carbone ou verre-aramide), sous forme de tissus pré-imprégnés par des résines époxydiques, ou sous forme de tissus multidirectionnels.

Les matériaux composites renforcés par des fibres de carbone sont utilisés pour obtenir des produits présentant une grande résistance mécanique, un poids minimal et devant résister à des températures élevées ou à des agressions chimiques. L'utilisation est privilégiée, sous forme de composites monolithiques ou de matériaux sandwich, dans les domaines de l'aéronautique, de l'aérospatiale, de la construction navale, des sports et loisirs. Les applications sont détaillées chapitre VII.

La fibre d'aramide

La première fibre aramide à haute résistance a été proposée en 1971 sous le nom commercial de *Kevlar* par Du Pont de Nemours. Le matériau de base est un polyamide aromatique obtenu par polycondensation en solution à basse température de diamines et de chlorure de diacides aromatiques. N'étant ni fusible ni soluble, le polymère de base est transformé chimiquement avant filage puis régénéré. Les fibres sont ensuite ensimées.

Ce polyamide aromatique est un polymère très cristallin. Les liaisons hydrogène entre les chaînes polymères lui confèrent de bonnes propriétés mécaniques, en particulier une excellente résistance au cisaillement : il supporte ainsi les chocs, les impacts et résiste à l'usure abrasive. De par sa faible densité ses propriétés spécifiques (propriétés rapportées à la densité) sont excellentes.

Les caractéristiques mécaniques de filaments de deux nuances sont indiquées tableau 1.4.

- Le *Kevlar 29* a un module moyen mais présente une résilience élevée. Il est principalement utilisé pour réaliser des blindages.
- Le *Kevlar 49* dont le module et la résistance à la traction sont élevés est utilisé pour les renforcements.

Caractéristiques	<i>Kevlar 29</i>	<i>Kevlar 49</i>
Densité	1,44	1,45
Module d'élasticité (GPa)	60	134
Contrainte de rupture en traction (GPa)	3	3,6
Allongement (%)	4	2

Tableau 1.4 : caractéristiques du Kevlar 29 et du Kevlar 49.

Les fibres résistent à l'humidité, aux solvants, aux hydrocarbures et à la chaleur. La résistance au rayonnement ultraviolet ainsi que l'adhérence avec les matrices polymères sont assez médiocres. L'usinage du matériau composite renforcé est difficile de par l'excellente résistance au cisaillement des fibres.

Le matériau est utilisé si la résistance à l'impact et au cisaillement du matériau sandwich est recherchée (casques, parties exposées des coques de bateaux, des skis ...).

1.2. Les âmes

L'âme est constituée d'un matériau qui présente des propriétés mécaniques modestes mais surtout une masse volumique la plus faible possible. La fonction essentielle de l'âme est de transmettre, par cisaillement, les actions mécaniques d'une peau à l'autre. On distingue les âmes pleines en matériaux poreux ou alvéolaires et les âmes en structure de nids d'abeilles (Nida), tableau 1.5. Des âmes sous forme de structures ondulées sont parfois utilisées.

Les âmes en mousses de polymères, les âmes sous forme de structures en nids d'abeilles et les âmes en bois, matériau cellulaire d'origine naturelle, sont les plus utilisées.

Matériau, âme pleine	Matériau, âme nids d'abeilles
Balsa	Alliage d'aluminium
Contre-plaqué	Papier kraft imprégné
Mousse de polystyrène	Tissu de verre imprégné de résine polyester
Mousse de polyuréthane	Tissu d'aramide imprégné de résine
Mousse de polyacrylique	phénolique
Mousse de polychlorure de vinyle	Polypropylène
Mortier de microbilles	

Tableau 1.5 : types d'âmes pour matériaux sandwich.

a. Structure et propriétés des mousses

La manière la plus simple de réaliser des mousses en polymère thermoplastique expansé consiste à mélanger un produit qui libère des bulles de gaz carbonique pendant la mise en œuvre, lors du chauffage des granulés de polymère. Si le polymère est thermodurcissable, un produit qui réagit et libère un gaz lors de l'élaboration est incorporé.

Les cellules des mousses sont caractérisées par leur dimension, leur forme, leur topologie [1.3]. Les mousses sont des solides cellulaires à trois dimensions, les parois des cellules ont des orientations aléatoires dans l'espace ; ces cellules peuvent être ouvertes (interconnectées) ou fermées (séparées de leurs voisines par des parois), figure 1.3.

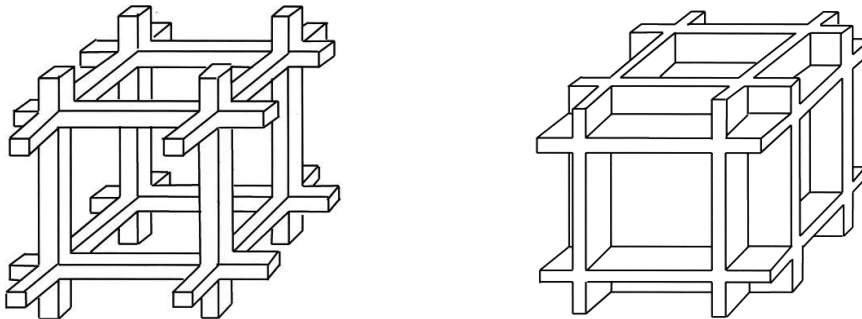


Figure 1.3 : cellule ouverte à gauche et cellule fermée à droite.

La densité ρ des mousses varie de 0,3 à 0,003. Le rapport ρ_a/ρ_s (densité de la mousse divisée par la densité du polymère solide avant expansion) dépend de la géométrie des cellules :

- mousses à cellules fermées :

$$\frac{\rho_a}{\rho_s} = C_i \left(\frac{t}{l_c} \right) \quad (1.1)$$

- mousses à cellules ouvertes :

$$\frac{\rho_a}{\rho_s} = C_j \left(\frac{t}{l_c} \right)^2 \quad (1.2)$$

- ρ_a : densité de la mousse,

- ρ_s : densité du polymère solide avant expansion,

- t : épaisseur des parois ou des arêtes des cellules,
- l_c : longueur des parois ou des arêtes des cellules,
- C_i, C_j : constantes numériques voisines de 1.

Module et résistance en compression

Les propriétés des mousses dépendent de celles du polymère de base et du rapport ρ_a/ρ_s .

Mousses à cellules ouvertes

La courbe contrainte-déformation en compression présente trois domaines, figure 1.4.

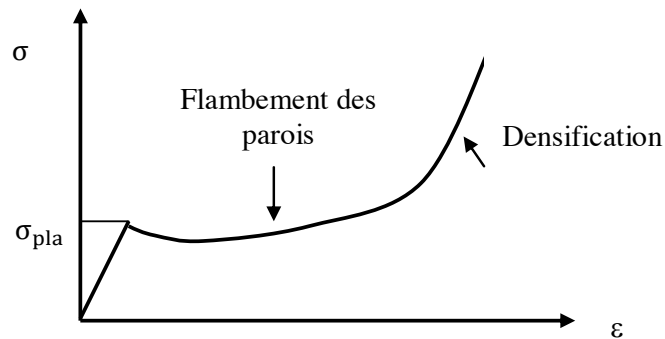


Figure 1.4 : courbe contrainte-déformation, mousse de polymère élastoplastique.

* Le premier domaine, d'élasticité linéaire, correspondant à un fléchissement élastique des parois des cellules ; le module, E_a , de la mousse s'exprime par :

$$E_a \cong E_s \left(\frac{\rho_a}{\rho_s} \right)^2 \quad (1.3)$$

- E_s : module du matériau de base non expansé.

* La deuxième région correspond au flambement des parois.

Si le matériau qui constitue les parois de la mousse est élastique (élastomère), le flambement global se produit quand la contrainte d'effondrement élastique global, σ_{ela} , de la mousse est atteinte :

$$\sigma_{ela} = 0,05 E_s \left(\frac{\rho_a}{\rho_s} \right)^2 \quad (1.4)$$

Si le matériau des parois de la mousse est élasto-plastique, le flambement se produit quand la limite élastique, σ_{pla} , de la mousse est atteinte :

$$\sigma_{pla} = 0,3 \sigma_{es} \left(\frac{\rho_a}{\rho_s} \right)^{3/2} \quad (1.5)$$

- σ_{es} : limite élastique du matériau de base non expansé.

* Le troisième domaine correspond à la densification de la mousse, les parois des cellules entrent en contact, la contrainte de compression croît rapidement.