

Introduction générale

Durant ces dernières années, l'utilisation des matériaux composites a connue dans l'industrie une évaluation considérable, surtout dans le domaine du génie civil, la mécanique, l'aéronautique, l'aérospatiale, ...etc.

Les matériaux composites sont des matériaux qui associent deux matériaux différents aussi bien par leur forme que par leurs propriétés mécaniques afin d'accroître leur performances et ce en tirant avantage de chacun des ces matériaux. En générale, ils possèdent des qualités remarquables qui reposent sur les propriétés mécaniques d'une fibre (carbone, bore, ou organique aramide) qui présente une résistance en traction et une rigidité exceptionnelle (supérieure à celle des meilleurs aciers). Ces fibres sont noyées dans une matrice (métallique ou organique) dont le rôle complexe est de lier les fibres, les maintenir alignées, et de leur transmettre les charges appliquées à la. En réalité les deux constituants des matériaux composites qui sont la matrice et le renfort se combinent pour donner un matériau hétérogène souvent anisotropie, d'où les propriétés seront différentes d'une direction à une autre. Les matériaux composites à matrice organique et à fibre de verre ou de carbone trouvent de plus en plus d'applications dans la réalisation des pièces structurales de dimensions diverses dans de nombreux secteurs industriels tels que le génie civil et la biomécanique, l'aéronautique, la construction d'automobiles, la construction navale. Ces secteurs se sont tournés vers cette alternative vue l'allongement de leur structure avec des propriétés mécaniques égales ou supérieures à celles des pièces en métalliques. Le comportement à long terme de ces types de matériaux est un domaine très important dans leur durée de vie et leur fonctionnement.

Notre travail est constitué de trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous exposons d'une façon claire une synthèse bibliographique sur les matériaux composites, cette synthèse contient des définitions et les différents constituants des matériaux composites et quelques domaines d'application.

Dans le deuxième chapitre, nous développons le comportement mécanique des matériaux composites, en effet l'étude du comportement des plaques composites consiste à la connaissance des propriétés mécaniques et les lois régissant de ce type de matériaux.

Le dernier chapitre a été consacré pour l'analyse du comportement des plaques hybrides en tenant compte les deux effets de vibration et de stabilité, en utilisant la théorie exacte d'élasticité.

CHAPITRE I : Synthèse bibliographique sur les matériaux composites.

I.1 Définitions

I.1.1 Matériaux composites

Dans un sens large, le mot “composite” signifie “constitué de deux ou plusieurs parties différentes”. En fait, l'appellation *matériau composite* ou *composite* est utilisée dans un sens beaucoup plus restrictif, dans ce travail. Nous en donnons pour l'instant la définition générale suivante. Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux matériaux ou plus de natures différentes, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément.

Un matériau composite est constitué de différentes phases nommées renforts et matrice.

Lorsque le matériau composite est non endommagé, les renforts et la matrice sont parfaitement liés et il ne peut pas y avoir ni glissement ni séparation entre les différentes phases. Les renforts se présentent sous forme des fibres continues ou discontinues.

- Le rôle du renfort est d'assurer la fonction de résistance mécanique aux efforts.
- La matrice assure quant à elle la cohésion entre les renforts de manière à répartir les sollicitations mécaniques. L'arrangement des fibres, leur orientation permettent de renforcer les propriétés mécaniques de la structure.

Les pièces structurelles sont réalisées par empilement de nappes en optimisant les directions des renforts en fonction des charges qu'elles doivent subir. La nature de la résine ou du renfort est choisie en fonction de l'application finale visée.

Nous présentons quelques types de matrices et renforts classiquement employés dans l'industrie, génie civil...etc. Les propriétés mécaniques de l'interface entre fibres et matrice sont très importantes dans la réalisation d'une structure composite. En effet, il ne doit y avoir ni glissement ni séparation entre les différentes phases de la structure pour obtenir de bonnes caractéristiques mécaniques élastiques.

I.1.2 Caractéristiques générales des matériaux composites

Un matériau composite consiste dans le cas le plus général d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. Dans le cas de plusieurs phases discontinues de natures différentes, le composite est dit hybride. La phase discontinue est habituellement plus dure avec des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue. La phase continue est appelée la *matrice*. La phase discontinue est appelée le *renfort* ou *matériau renforçant* (figure I.1).

Une exception importante à la description précédente est le cas de polymères modifiés par des élastomères, pour lesquels une matrice polymère rigide est chargée avec des particules élastomères. Pour ce type de matériau, les caractéristiques statiques du polymère (module d'Young, contrainte à la rupture, etc.) ne sont pratiquement pas modifiées par l'adjonction de particules élastomères, alors que les caractéristiques au choc sont améliorées. Les propriétés des matériaux composites résultent :

- des propriétés des matériaux constituants,
- de leur distribution géométrique,
- de leurs interactions, etc.

Tableau I.1 Exemples de matériaux composites, pris au sens large.

Type de composite	Constituants	Domaines d'application
1. Composites à matrice organique :		
Papier, carton	Résine/charges/fibres Cellulose	Imprimerie, emballage, etc.
Panneaux de particules	Résine/copeaux de bois	Menuiserie
Panneaux de fibres Toiles	Résine/fibres de bois Résines	Bâtiment
enduites Matériaux	souples/tissus	Sports, bâtiment
d'étanchéité Pneumatiques	Elastomères/bitume/textiles	Toiture, terrasse, etc.
Stratifiés	Caoutchouc/toile/acier	Automobile, domaines multiples
Plastiques renforcés	Résine/charges/fibres de verre, de carbone, etc. Résines/microsphères	
2. Composites à matrice minérale		
Béton	Ciment/sable/granulats	Génie civil
Composite carbone-carbone	Carbone/fibres de carbone	Aviation, espace, sports, bio-médecine, etc.
Composite céramique	Céramique/fibres céramiques	Pièces thermo-mécaniques
3. Composites à matrice métallique		
	Aluminium/fibres de bore	
	Aluminium/fibres de carbone	Espace

<p>4.Sandwiches Peaux Ames</p>	<p>Métaux, stratifiés, etc. Mousses, nids d'abeilles, balsa, plastiques renforcés, etc.</p>	<p>Domaines multiples</p>
---	---	---------------------------

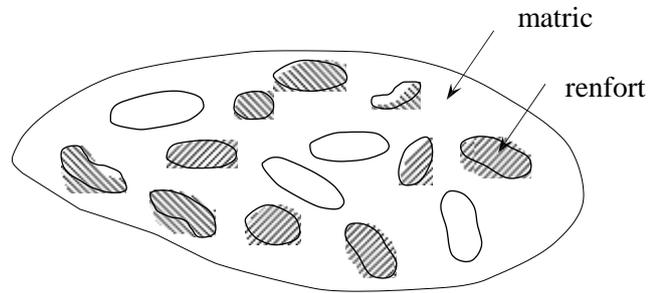


Figure I.1 : un matériau composite.

I.1.3 Matrices

Dans un grand nombre de cas, la matrice constituant le matériau composite est une résine polymère. Les résines polymères existent en grand nombre et chacune à un domaine particulier d'utilisation. Dans les applications où une tenue de la structure aux très hautes températures est requise, des matériaux composites à matrice métallique, céramique ou carbone sont utilisés. Dans le cas des matériaux en carbone des températures de 2200°C peuvent être atteintes. La classification des types de matrices couramment rencontrées est donnée sur la figure I.2.

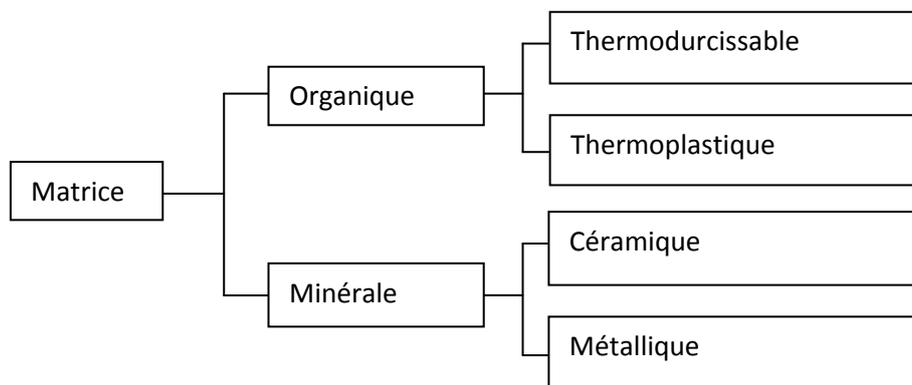


Figure I.2 : Types de matrice.

I.1.4 Additifs et charges

Des produits peuvent être incorporés à la résine pour renforcer et améliorer ses propriétés mécaniques, ils peuvent être également utilisés pour diminuer le coût des matrices en résine, la quantité des produits ajoutés peut varier de :

– quelques dizaines de % dans le cas de *charge*, (charges renforçantes, ex : charges sphériques creuses 5 à 150 µm). Et des charges non renforçantes.

– à quelques % et moins dans le cas d'*additifs* : Des additifs, de type colorant ou agent de démoulage sont largement utilisés (autres ex : pigments et colorants, agents anti-retrait, agents anti-ultraviolets) lors de la conception des structures constituées de matériaux composites [J.-M. Berthelot, 1999].

I.1.5 Renforts

Les renforts assurent les propriétés mécaniques du matériau composite, un grand nombre de fibres sont disponibles sur le marché en fonction des coûts de revient recherchés pour la structure réalisée. Les renforts constitués de fibres se présentent sous les formes suivantes : linéique (fils, mèches), tissus surfaciques (tissus, mats), multidirectionnelle (tresse, tissus complexes, tissage tridirectionnel ou plus).

La classification des types de renforts couramment rencontrés est indiquée sur la figure I.3.

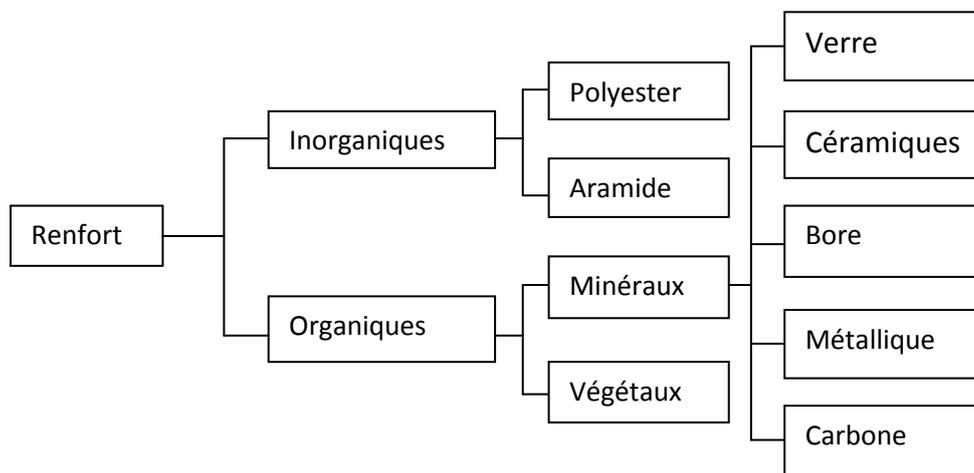


Figure I.3 : types de renforts.

I.1.6 Les fibres

I.1.6.1 Fibres de verre

Les fibres de verre ont un excellent rapport performance-prix qui les placent de loin au premier rang des renforts utilisés actuellement dans la construction de structures composites.

I.1.6.2 Fibres de carbone

Les fibres de carbone ont de très fortes propriétés mécaniques et sont élaborées à partir d'un polymère de base, appelé précurseur. Actuellement, les fibres *précurseur* utilisées sont des *fibres acryliques* élaborées à partir du polyacrylonitrile (PAN). La qualité des fibres de carbone finales dépend fortement des qualités du précurseur. Le principe d'élaboration est de faire subir aux fibres acryliques une décomposition thermique sans fusion des fibres aboutissant à une graphitisation. Le brai qui est un résidu de raffinerie issu du pétrole ou de la houille est également utilisé pour produire des fibres de carbone. Quelques exemples de fibres de carbone classiquement rencontrées : T300, T800, MR40, TR50, IM6, IM7, GY, M55J.

I.1.6.3 Fibres aramides

Les fibres aramides ont des propriétés mécaniques élevées en traction comme les carbonés mais leurs résistances à la compression est faible. La faible tenue mécanique en compression est généralement attribuée à une mauvaise adhérence des fibres à la matrice dans le matériau composite. Pour y remédier, des enzymages des fibres peuvent être utilisés. L'utilisation de composites à fibres hybrides permet également de remédier aux faiblesses des composites à fibres aramides. Des renforts hybrides de type verre-kevlar ou carbone-kevlar sont largement utilisés dans le domaine des loisirs (ski, raquette de tennis).

Quelques exemples de fibres aramides : KEVLAR (Dupont de Nemours, USA), TWARON.

I.1.6.4 Fibres céramiques

Les matériaux composites de type céramiques sont souvent constitués de renforts et de matrice en céramique. Les fibres sont élaborées par dépôt chimique en phase vapeur sur un fil support. Ces fibres sont rencontrées dans des applications où la température est très élevée entre 500°C et 2 000°C. Ces matériaux sont utilisés notamment dans les parties chaudes des moteurs d'avions. Quelques exemples de fibres céramiques :

- fibres de Carbure de Silicium
- fibres de Bore
- fibres de Bore carbure de silicium

I.1.6.5 Caractéristiques mécaniques des fibres

Il existe différents types de fibres. Elles peuvent être scindées en deux groupes, les fibres à haut module et les fibres à haute résistance. Les fibres à haut module ont une résistance faible et celles à forte résistance ont un module faible.

Quelques propriétés mécaniques des fibres sont recueillies dans les tableaux suivants :

Tableau I.2 : Caractéristiques mécaniques de quelques fibres.

Renforts	$\rho(Kg/m^3)$	$\sigma_t^R(MPa)$	$\sigma_c^R(MPa)$	E(GPa)
AS ₄	1800		3599	235
T ₃₀₀	1700	1,2	3654	231
IM6		0,88	1460	
IM8	1800		5171	310
Kevlar ₄₉	1440	2,5	3620	124
Verre E	2580	3,5	3450	69 à 72

D'un fabricant à l'autre, les propriétés mécaniques varient suivant les propriétés physiques et mécaniques moyennes. Elles sont données dans le tableau ci - dessous:

Tableau. I.3 : Propriétés mécaniques des fibres de carbone utilisées en génie civil.

Propriétés en traction	HR	IM	HM
R _t (GPa)	3 à 4,5	47 à 52	1.1 à 2.5
E _{or} (GPa)	230	27.5 à 30	35 à 50
ν	0,30	0,30	0,30
$\rho(Kg / m^3)$	1 750 à 1800	1700 à 1800	1800 à 1950
G(GPa)	50		20

I.1.7 Les résines

Les résines utilisés dans les matériaux composites ont pour rôles de transfère les sollicitations mécaniques aux fibres et de les protéger de l'environnement extérieur. Les résines doivent donc être assez déformables et présenter une bonne compatibilité avec les fibres .En outre, elles doivent avoir une masse volumique faible de manière à conserver aux matériaux composites des caractéristiques mécaniques spécifiques élevées.

On distingue deux grandes familles des résines : thermodurcissables et thermoplastiques.

I.1.7.1 Résines thermodurcissables

Les résines thermodurcissables ont des propriétés mécaniques élevées. Ces résines ne peuvent être mises en forme qu'une seule fois. Elles sont en solution sous forme de polymère non réticulé en suspension dans des solvants. Les résines polyesters insaturées, les résines de condensation (phénoliques, aminoplastes, furanique) et les résines époxy sont des résines thermodurcissables. Les exemples de résines thermodurcissables classiquement rencontrés sont 914, 5208, 70, LY556.

Les matériaux les plus performants ont des caractéristiques mécaniques élevées et une masse volumique faible. Ces caractéristiques sont présentées dans le tableau I.4.

Tableau I.4 : Caractéristiques des résines thermodurcissables.

Résines	$T_f(C^\circ)$	$\rho(Kg/m^3)$	$\varepsilon_t^R(\%)$	$\sigma_t^R(MPa)$	$\sigma_c^R(MPa)$	E(GPa)
Polyesters	60 à 100	1140	2 à 5	50 à 85	90 à 200	2,8 à 3,6
Phénoliques	120	1200	2,5	40	250	3 à 5
Epoxydes	290	1100 à 1500	2 à 5	60 à 80	250	3 à 5

I.1.7.2 Résines thermoplastiques

Les résines thermoplastiques ont des propriétés mécaniques faibles. Ces résines sont solides et nécessitent une transformation à très haute température. Les polychlorures de vinyle (PVC), les polyéthylènes, polypropylène, polystyrène, polycarbonate polyamide sont quelques exemples de ces résines thermoplastiques. Les résines thermoplastiques classiquement rencontrés sont PEEK, K3B.

De même que pour les résines thermodurcissables, les matériaux les plus performants ont des caractéristiques mécaniques élevées et une masse volumique faible :

Ces dernières sont présentées dans le tableau I.5.

Tableau I.5 : Caractéristiques des résines thermoplastiques.

Résines	$T_f(C^\circ)$	$\rho(Kg/m^3)$	$\varepsilon_t^R(\%)$	$\sigma_t^R(MPa)$	$\sigma_c^R(MPa)$	E(GPa)
Polyamide	65 à 100	1140		60 à 85		1,2 à 2,5
Polypropylène	900	1200		20 à 35		1,1 à 1,4

I.1.8 Matériaux isotropes

Un matériau pour lequel, en un point quelconque, les composantes du tenseur C_{ijk} sont identiques dans toutes les directions est un matériau *isotrope*.

$$E_1 = E_2 = E_3 = E$$

$$\nu_{12} = \nu_{13} = \nu_{23} = \nu$$

$$G_{12} = G_{13} = G_{23} = G$$

Dans le cadre de l'élasticité linéaire, un tel matériau est fonction uniquement de deux paramètres caractéristiques indépendants. On peut démontrer qu'un *matériau isotrope* correspond en fait à un matériau *orthotrope* possédant de plus une *symétrie de révolution autour de chacun de ces axes d'orthotropie*. (plus de détails dans les chapitres suivants).

I.1.9 Matériaux orthotropes

Un matériau *monoclinique* suivant deux plans perpendiculaires est dit *orthotrope*. De plus, un matériau qui possède deux plans de symétries perpendiculaires possède obligatoirement le troisième et ce type de matériau est dit *orthotrope*. Un matériau *orthotrope* est caractérisé par 9 constantes élastiques indépendantes si les plans de symétries sont connus. Dans le cas où les plans (\vec{N}_1, \vec{N}_2) , (\vec{N}_1, \vec{N}_3) et (\vec{N}_2, \vec{N}_3) sont des plans de symétries perpendiculaires, il faut vérifier les trois relations de symétrie simultanément. À partir des relations de comportement des matériaux monocliniques, on obtient facilement la relation de comportement des matériaux orthotropes $\bar{\sigma} = \bar{C} \cdot \bar{\varepsilon}$ et $\bar{\varepsilon} = \bar{S} \cdot \bar{\sigma}$ avec $\bar{S} = \bar{C}^{-1}$.

Dans la base d'orthotropie $(\vec{N}_1, \vec{N}_2, \vec{N}_3)$, la relation de comportement exprimée en rigidité $\bar{\sigma} = \bar{C} \cdot \bar{\varepsilon}$. (voire plus détails dans les chapitres suivants)

Parmi ces matériaux on rencontre souvent : les matériaux composites, les matériaux ondulés, les matériaux sandwiches, les matériaux renforcés...etc.

I.1.10 Les plaques

Une plaque est un solide tridimensionnel délimité par deux plans parallèles dont une des dimensions, appelée « épaisseur », est petite par rapport aux autres dimensions caractéristiques. Ce solide particulier comporte généralement un plan moyen de symétrie $z=0$ (plan O, x, y) en $h/2$ (Figure I.4) appelé « surface de référence » ou « surface moyenne » de la plaque. On appelle h l'épaisseur de la plaque ; le plan inférieur est donc le plan $z = -h/2$ et le plan supérieur est le plan $z = h/2$.

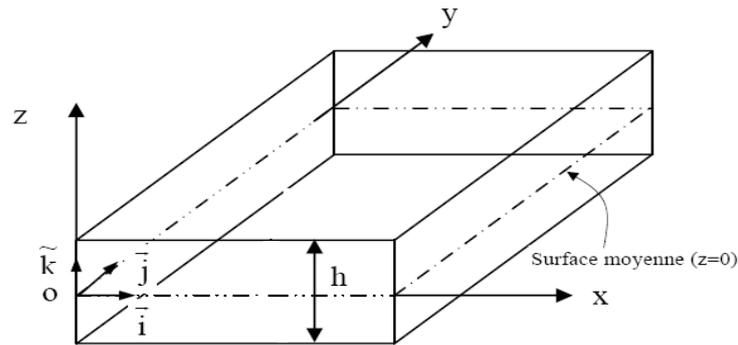


Figure I.4 : géométrie d'une plaque.

I.1.10.1 Cas des plaques orthotropes

Une plaque orthotrope possède des paramètres de rigidité différents selon deux axes perpendiculaires, ces axes étant dans notre problème parallèle aux bords de la plaque. Il existe plusieurs types d'orthotropie :

- une orthotropie de géométrie où la géométrie de la plaque entraîne l'orthotropie à module d'Young constant, - une orthotropie de matériau où la plaque possède deux modules d'Young différents selon les deux directions. Les plaques orthotropes en flexion présentent une coïncidence entre les axes d'orthotropie et les directions principales x, y . Pour un état de contrainte plane ; $\sigma_{zz} = \sigma_{yz} = \sigma_{xz} = 0$

La relation entre le tenseur de déformation et le tenseur de contrainte sous forme matricielle est la suivante :

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & \\ & & S_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (I.1)$$

avec

$$S_{11} = \frac{1}{E_x} \quad S_{12} = \frac{-\nu_{xy}}{E_x} = \frac{-\nu_{yx}}{E_y} \quad S_{22} = \frac{1}{E_y} \quad S_{66} = \frac{1}{G_{xy}}$$

Pour obtenir la relation des contraintes en fonction des déformations on peut inverser la relation précédente qui donne :

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & 0 \\ C_{12} & C_{22} & \\ & & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (I.2)$$

avec :

$$C_{11} = \frac{E_x}{1-\nu_{xy}\nu_{yx}} \quad C_{12} = \frac{\nu_{xy}E_y}{1-\nu_{xy}\nu_{yx}} = \frac{\nu_{yx}E_x}{1-\nu_{xy}\nu_{yx}}$$

$$C_{22} = \frac{E_y}{1-\nu_{xy}\nu_{yx}} \quad G_{66} = G_{xy}$$

Si on prend en considération qu'il y a un cisaillement transversal La relation devienne

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \tau_{23} \\ \tau_{31} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ & C_{22} & 0 & 0 & 0 \\ & & C_{44} & 0 & 0 \\ sym & & & C_{55} & 0 \\ & & & & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \gamma_{23} \\ \gamma_{31} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (I.3)$$

avec :

$$C_{44} = G_{yz}, \quad C_{55} = G_{xz}$$

I.1.10.2 Différentes formes des plaques orthotropes

Selon leurs formes il existe plusieurs types des plaques orthotropes :

- Plaque ondulée
- Plaque, orthotrope constitue d'une plaque isotrope renforcée par des raidisseurs
- Plaque composite

Les coefficients qui caractérisent la matrice de rigidité des plaques orthotropes en flexion sont :

$$D_{11} = \frac{E_x h}{12(1-\nu_{xy}\nu_{yx})} \quad D_{12} = \nu_{xy}D_{22} = \nu_{yx}D_{22} = D_{21}$$

$$D_{22} = \frac{E_x h^3}{12(1-\nu_{xy}\nu_{yx})} \quad D_{44} = G_{23} \cdot h, \quad D_{55} = G_{13} \cdot h \quad . \quad D_{66} = G_{12} \cdot h$$

nous avons donc :

$$D_y = \frac{h^3}{12} Q_y \quad \text{avec } i, j = 1, 2, 6$$

$$D_{ij} = Q_{ij} h, \quad \text{avec } i, j = 4, 5$$

La forme de la matrice de rigidité a la flexion des plaques orthotrope sans l'effet de cisaillement transversal

$$[D] = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 \\ D_{12} & D_{22} & 0 \\ 0 & 0 & D_{66} \end{bmatrix} \quad \text{ou} \quad [D] = \begin{bmatrix} D_x & D_i & 0 \\ D_i & D_y & 0 \\ 0 & 0 & D_{xy} \end{bmatrix}$$

Si on tient compte du cisaillement transversal on a:

$$[D] = \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & 0 & 0 & 0 \\ D_{12} & D_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & D_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & D_{66} \end{bmatrix} \quad (\text{I.4})$$

Les expressions de rigidité précédentes sont sujettes à de légères modifications suivent la nature de la matière employée en particulier tout les valeurs de la rigidité à la torsion D_{xy} fondée sur des considérations purement théoriques doivent être considérées comme une première approximation et il est recommandé d'établir un essai direct pour obtenir les valeurs convenables du module G en donc ci-dessous des valeurs habituelles des rigidités dans certains cas pratiques.

I.1.10.3 Structures composites stratifiées

Les matériaux composites sont modélisés à une échelle intermédiaire entre l'échelle microscopique associée aux constituants de base du composite (le renfort et la matrice) et l'échelle macroscopique liée à la structure. À cette échelle, appelée méso-échelle, une structure stratifiée est schématisée par un empilement de monocouches homogènes dans l'épaisseur et d'interfaces inter-laminaires. La couche et l'interface sont les deux entités appelées méso-constituants, comme illustré sur la figure I.5, qui forment les bases des modèles dédiés à l'étude des structures stratifiées. L'interface inter laminaire est une entité surfacique assurant le transfert des déplacements et des contraintes normales d'une couche à une autre.

En élasticité, les couches sont parfaitement liées et l'interface ne joue aucun rôle particulier. L'étude des composites jusqu'à la phase ultime de la rupture montrera l'utilité d'employer un modèle d'interface pour simuler les phénomènes de délaminage (séparation progressive des couches).

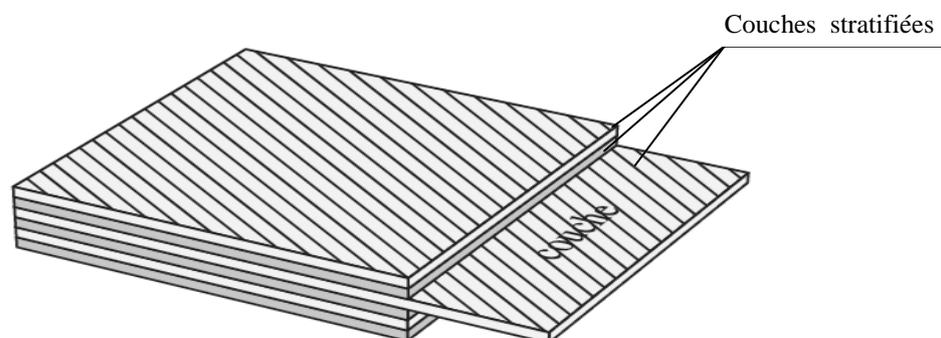


Figure I.5 : Stratifié constitué de couches parfaitement liées.

I.1.10.4 Désignation des structures stratifiées

Les structures stratifiées à base de tissus unidirectionnels sont constituées d'un grand nombre de couches ou plis. L'épaisseur d'une couche dépend de son grammage. L'épaisseur de chacune des couches est généralement très faible, de l'ordre de 0,125mm pour un matériau carbone époxy de type Aéronautique et 0,3 mm pour ceux qui sont utilisés dans l'Industrie nautique. Ces structures stratifiées sont constituées de couches unidirectionnelles avec des fibres orientées de façon différente d'une couche à l'autre afin d'obtenir les propriétés mécaniques souhaitées pour la structure finale.

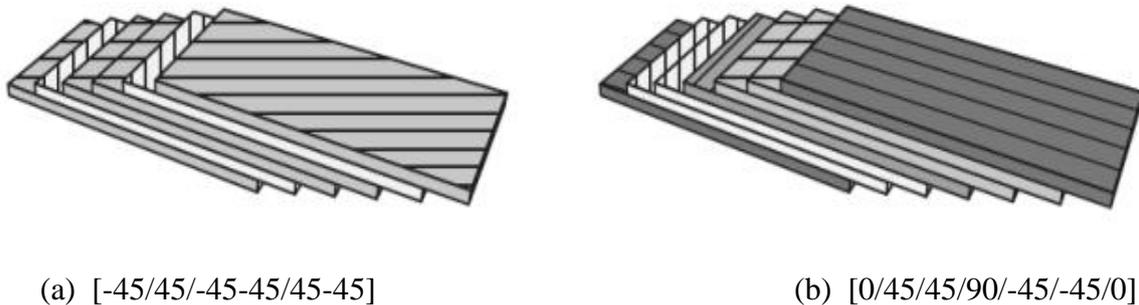


Figure I.6 : désignation du stratifié.

La désignation des structures stratifiées est délicate car il faut préciser les axes de référence, un stratifié est codifié de la façon suivante :

- chaque couche est désignée par un nombre indiquant la valeur en degré de l'angle que fait la direction des fibres avec l'axe de référence x , comme par exemple sur les figures I.6(a) et I.6(b), les couches sont représentées décalées les unes par rapport aux autres. La structure stratifiée est décrite de bas en haut.
- les couches sont nommées successivement entre crochet en allant de la face inférieure à la face supérieure. Les couches successives sont séparées par le symbole « / » comme l'exemple de la figure I.6(a) : [-45/45/ - 45/ - 45/45/ - 45].
- les couches successives d'un même matériau et de même orientation sont désignées par un indice numérique, comme sur la figure I.6(b) : [0/45/90/ - 45/0].
- en cas de stratification hybride (différents matériaux dans un même stratifié), il faut préciser par un indice la nature de la couche.
- en cas de structures symétriques, la moitié est codifiée et le symbole s indique la symétrie : [-45/45/ -45/ -45/45/ -45] devient [-45/45/ -45] s et [0/45/45/90/ - 45/ - 45/0] devient [0/45/90/ - 45/2/0].

I.1.10.5 Cas des structures sandwich

Les structures composites subissant des sollicitations de type flexion ou torsion sont généralement construites en matériaux sandwich. Une structure sandwich est composée d'une âme et de deux peaux en matériaux composites. L'assemblage est réalisé par collage à l'aide d'une résine compatible avec les matériaux en présence (figure I.7).

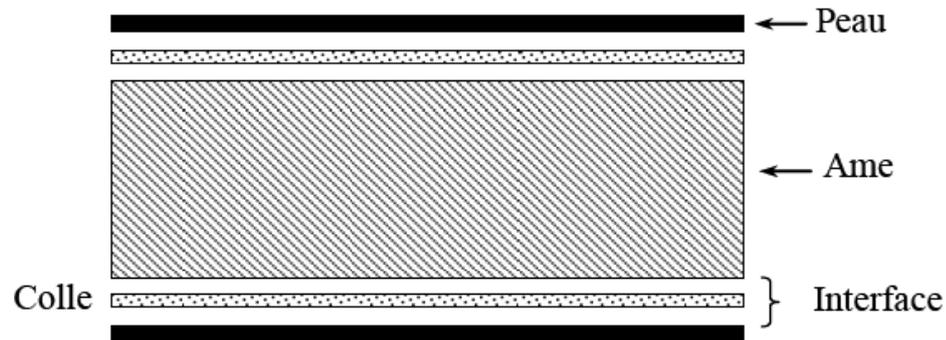
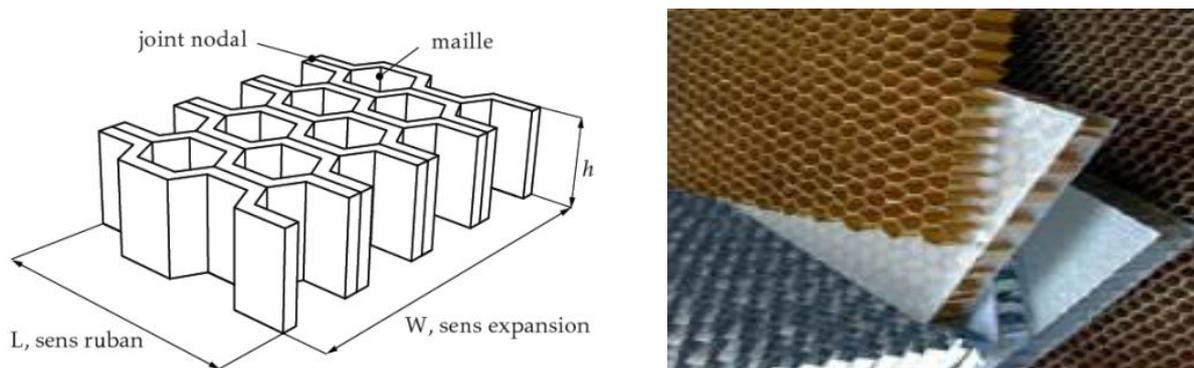


Figure I.7 : structure en matériau sandwich.

Les âmes les plus utilisées sont de type nid d'abeilles, âme ondulée ou mousse, les peaux sont généralement constituées de structures stratifiées. Une âme nid d'abeilles est présentée sur les figures I.8.



Figures I.8 : désignation d'une âme nid d'abeilles.

Ces structures ont une grande rigidité en flexion et torsion. L'âme de la structure sandwich résiste principalement aux contraintes de cisaillement et de compression hors plan, les peaux inférieures et supérieures supportent quant à elles les efforts dans leur plan.

I.2 Quelques domaines d'application des composites

I.2.1 Les composites dans la construction civile

L'utilisation des composites dans la construction civile est un nouveau créneau, qui commence à intéresser nos bâtisseurs. Le nombre de dégâts causés par les séismes à travers le monde a poussé les chercheurs à s'intéresser aux composites. L'handicap majeur de l'utilisation des matériaux composites dans la construction civile, reste leur coût, qui est encore excessif. L'utilisation des composites renforcés de fibres de carbone, en complément des composites à fibre de verre (TD et TP) pourra se développer dans le secteur de la construction civile lorsque leur prix deviendra inférieur à 6€/kg.

Les composites apportent au bâtiment la souplesse des formes, la résistance aux contraintes climatiques, et les composites renforcés de fibres de carbone la résistance aux séismes. L'utilisation des composites dans le bâtiment ne pourra se développer que si les prescriptions techniques actuelles sont mieux adaptées à leur spécificité.

I.2.2 Les composites dans l'automobile

Le secteur de l'automobile utilise pour 95% des composites à matrice polyesters et fibres de verre, mais intègre massivement les composites thermoplastiques depuis 2003. Les composites apportent au secteur de l'automobile une facilité d'entretien et une grande liberté de conception ; l'allègement de 1 kg, obtenu par l'utilisation des composites, autorise un surcoût de 3€/kg gagné ou permet d'économiser 1,5 € de carburant par 100 km. Dans l'automobile, le développement à long terme des composites est menacé par la difficulté de les intégrer dans les chaînes de fabrication et par les exigences de recyclabilité. En Europe, environ 12 millions de véhicules, d'une masse moyenne de 1000 kg sont produits annuellement, soit 12 millions de tonnes de matériaux [Giocosa 1999].

Si à ses débuts, il y a environ 100 ans, une automobile était constituée principalement de bois et d'acier, aujourd'hui elle rassemble de nombreux matériaux appartenant à différentes familles :

- matériaux ferreux : fontes, aciers (environ 70 % de sa masse).
- matériaux non ferreux : aluminium, cuivre, magnésium (environ 5 %).
- matériaux minéraux : verres, céramiques (environ 4 %).
- matériaux organiques : peintures, adhésifs, textiles, fluides, caoutchoucs, thermoplastiques et thermodurcissables renforcés ou non par des fibres (verre, carbone, aramide, naturelles) ou des charges minérales (environ 20 %).

Les matériaux organiques composites à matrice thermoplastique ou thermodurcissable renforcées par des fibres, généralement de verre, courtes ou longues ont fait leur apparition dans l'automobile durant les années 60-70. Même s'ils sont aujourd'hui utilisés presque exclusivement pour remplir certaines fonctions, leur taux d'utilisation ne dépasse pas 10 à 15 % selon les véhicules. A priori, ces matériaux présentent en effet trois handicaps majeurs par rapport aux matériaux métalliques dans le cadre d'une utilisation dans le secteur automobile :

- un prix élevé au kilogramme.
- des caractéristiques mécaniques plus faibles.
- des procédés de mise en œuvre souvent lents à l'exception du procédé d'injection. Pourtant les matériaux composites à matrice organique présentent des avantages importants :
- une faible densité.
- des technologies de mise en œuvre par moulage qui limitent la matière engagée dans la filière, offrent la possibilité d'obtenir des pièces de forme complexe et suppriment les usinages de finition.

I.2.3 Les composites et la construction électrique

La consommation massive des composites GD, sous forme de semi-produits SMC comprimés, dans les domaines électrique et électronique, prends de l'ampleur avec l'utilisation importante de l'audio visuel (TV, microordinateurs, lecteurs de DVD, etc.....). En utilisant les propriétés remarquables des matériaux composites, la construction électrique réalise des équipements fiables, aux fonctions multiples et longues durée de vie. Les cadences de production des composants électriques, pouvant atteindre plusieurs milliers par jour, sont peu compatibles avec celles du procédé de compression SMC. Des exigences croissantes en recyclabilité des produits constituent une menace importante pour ce secteur d'application des composites.

I.2.4 Les composites et la construction industrielle

Le développement des composites TD et TP, avec la possibilité de jouer sur leurs caractéristiques, ont fait que ces matériaux, se sont imposés dans le monde industriel. Les fibres de carbone pourront être utilisées en complément aux fibres de verre à la fois comme renfort et comme capteur, et seront associées à des résines polyesters ou époxy. L'utilisation des matériaux composites peut contribuer à améliorer la sécurité de certains sites industriels sensibles et faciliter la conception des bâtiments. Pour les constructions industrielles standards, les matériaux composites gardent encore leur handicap d'un coût élevé par rapport aux matériaux conventionnels, les métaux. Leur caractérisation en milieu corrosif est encore insuffisamment connue.

I.2.5 Les composites dans les équipements de sports et loisirs

Les performances sportives exigent des matériaux performants. Les matériaux composites répondent bien à ces exigences, malgré un coût relativement élevé. Les sports et loisirs utilisent des composites HP avec un taux de renforts de plus de 70%. Les sports concernés par ces matériaux sont surtout, le tennis, le ski, les sports nautiques etc..... Les composites permettent d'augmenter sur mesure les performances, la fiabilité des articles de sports. La résistance mécanique et élastique des composites TP reste encore trop faible comparée à celle des alliages légers, en particulier pour les composites à matrice en polypropylène et en polyamide.

I.2.6 Les composites et la construction nautique

Dans la construction nautique de plaisance et de pêche, les composites sont indispensables pour les embarcations de taille inférieure à 40 mètres. Le moulage au contact représente encore 85% des composites utilisés dans ce secteur. D'ailleurs c'est le seul domaine exploité en Algérie. Les entreprises étatiques et privées telles que ECOREP, 3S, POLYOR, se sont spécialisées dans la construction des bateaux de pêche et de plaisance. Elles utilisent surtout de la résine polyester et la fibre de verre E. Les problèmes d'environnement sont susceptibles de menacer à terme l'industrie nautique des matériaux composites ; en effet, les nouvelles réglementations européennes limitant les émissions des composés organiques volatiles COV (styrène), qui pourraient constituer une menace pour cette industrie si elle ne s'adapte pas.

I.2.7 Les composites dans l'aéronautique

Avec l'augmentation du prix du pétrole, l'utilisation des matériaux composites est devenue une nécessité. Chaque kilogramme gagné sur la structure d'un avion, fait gagner aux compagnies de voyageurs de l'argent et protège en parallèle l'environnement par réduction des émanations de CO₂

L'aéronautique utilise principalement des composites HP constitués d'une matrice époxy associée à un taux élevé de renforts en fibres de carbone.

L'aéronautique utilise les composites hautes performances pour la fabrication de pièces de structure primaire des appareils en raison de leur légèreté, de leur souplesse de forme et des économies de frais de maintenance qu'ils engendrent. Le gain total de 450 kilos sur un Airbus permet d'accueillir six passagers supplémentaires. Un gain de 100 kilos sur la structure d'une fusée allonge sa trajectoire de 100 kilomètres.