



Université de Relizane
Faculté des Sciences et Technologie
Département de Génie Mécanique
-2021/2022-



Module Comportement Mécanique des Matériaux Composites et
Multi-Matériaux
-S2- MI GM

Semestre: 2

Unité d'enseignement: UEF 1.2.1

Matière: Comportement mécanique des Matériaux Composites et multi-matériaux

VHS: 67h30 (Cours: 3h TD : 1h30)

Crédits: 6

Coefficient: 3

Objectifs de l'enseignement:

L'étude du comportement mécanique des matériaux composites et multi matériaux a pour but de connaître leur réponse à une sollicitation donnée.

Ce cours permet aussi à l'étudiant la compréhension des mécanismes physiques d'endommagement et de fissuration dans les matériaux composites et les multi matériaux. Les connaissances acquises en mécanique de la rupture seront mises à profit pour aborder les mécanismes physiques d'amorçage et de propagation des fissures et l'effet de la microstructure de ces matériaux, et donc du procédé de mise en œuvre utilisé, sur la résistance à la fissuration des matériaux composites et des multi matériaux

Connaissances préalables recommandées:

Structure de la matière S1, Sciences des Matériaux S4, Mécanique des milieux continus S5.

Contenu de la matière:

CHAPITRE 1 Généralités sur les matériaux composites

Définitions de base

Notions de bases

- Les composants
- Les renforts
 - Les fibres
- Les matrices
- Les matériaux composites structuraux

CHAPITRE 2 Approche classique des composites : spécificité du calcul des composites

- Etude des lois de comportement anisotrope 3D
 - Hypothèses de travail
 - Loi de Hooke
 - Propriétés
 - Notations " chapeau "
 - Matériau orthotrope (orthogonal+anisotrope)
 - Matériau isotrope transverse
- Comportement anisotrope 2D
 - Repère du pli
 - Coefficients de souplesse
 - Coefficients de raideur

CHAPITRE 3 Calculs d'homogénéisations des composites

- Homogénéisation pour le calcul des modules
 - Homogénéisation simplifiée- Les modèles à " Bornes "
- Théorie simplifiée des stratifiés
 - Comportement en membrane
 - Comportement en flexion
- Prise en compte des effets hygrothermiques
 - Effets thermiques
 - Effets hygrométriques
 - Superposition des effets thermiques et hygrométriques
- Règles de conception d'une pièce composite

CHAPITRE 4 Critères de rupture classique

- Définition des critères de résistance
 - Le critère de Tsai-Hill
 - Le critère de Tsai-Wu
 - Critère de la contrainte maximale
 - Critère de la déformation maximale
 - Le critère mixte
 - Le critère de Hashin

CHAPITRE 1 :

Généralités sur les matériaux composites

Les matériaux composites sont nés des efforts de la communauté aérospatiale pendant la Seconde Guerre mondiale pour produire des matériaux avec des valeurs de résistance et de rigidité spécifiques nettement supérieures aux matériaux de structure existants. De plus, les alliages structuraux aérospatiaux existants, tels que ceux à base d'aluminium, étaient sujets à des dommages dus à la corrosion et à la fatigue, et les matériaux composites offraient une approche pour surmonter ces problèmes. À la fin de la guerre, les plastiques renforcés de fibres de verre avaient été utilisés avec succès dans les moteurs de fusée à enroulement filamentaire et démontrés dans diverses autres applications de prototypes d'avions structuraux. Ces matériaux ont été largement utilisés dans les années 1950 et ont apporté d'importantes améliorations dans la réponse structurelle et la résistance à la corrosion. Les applications commerciales dans les équipements sportifs grand public dans les années 1960 ont fourni un marché plus large, ce qui a amélioré les capacités de conception et de production, établi la familiarité et la confiance des consommateurs et réduit les coûts.

Les dépenses de défense pendant la guerre froide ont assuré des ressources suffisantes pour la recherche et le développement de nouveaux matériaux de haute technologie et un marché pour leur application. Le nombre important de nouveaux avions militaires et le grand nombre de systèmes commandés ont fourni un environnement idéal pour le développement et l'insertion matériaux composites à hautes performances. La crise énergétique des années 1970 a fourni une incitation significative à l'introduction des matériaux composites dans les avions commerciaux, et l'expérience réussie dans les avions militaires a été un facteur important dans leur acceptation dans l'industrie commerciale. Des améliorations spectaculaires de l'efficacité structurelle sont devenues possibles au cours de cette période, grâce à l'introduction de fibres de carbone à haute performance. L'amélioration des capacités de fabrication et des méthodologies de conception a fourni le contexte d'une augmentation significative de l'utilisation de matériaux composites pour les structures d'aéronefs et d'engins spatiaux militaires et commerciaux.

Au cours des 30 dernières années, les matériaux composites ont gagné une fraction de masse croissante de structures d'avions et d'engins spatiaux. Au cours des années suivantes, d'importants investissements gouvernementaux et privés ont été réalisés dans la recherche, le développement, la fabrication, les essais et la démonstration des services de vol de matériaux et de structures composites. Des programmes parallèles étaient également en cours pour l'utilisation de composites dans les véhicules terrestres et navals militaires et civils. Par exemple, le développement de structures en fibre de verre pour les bateaux et d'autres applications marines a connu un énorme succès et représente désormais une part importante du volume de production de composites. Au cours de ces années, la confiance dans l'utilisation de matériaux composites a considérablement augmenté. Ce fut également une période de grande innovation dans le développement des méthodes de fabrication, d'assemblage et de réparation.

Définitions de base :

Les matériaux composites ne sont pas nouveaux. Ils sont utilisés depuis l'antiquité. Le bois et le torchis sont des composites de tous les jours.



Les composites sont utilisés non seulement pour leurs propriétés structurelles, mais aussi pour des applications électriques, thermiques, tribologiques et environnementales. Les matériaux composites modernes sont généralement optimisés pour atteindre un équilibre particulier de propriétés pour une gamme d'applications donnée. Compte tenu de la vaste gamme de matériaux pouvant être considérés comme des composites et du large éventail d'utilisations pour lesquelles les matériaux composites peuvent être conçus, il est difficile de s'entendre sur une définition unique, simple et utile. Cependant, en tant que définition pratique courante, les matériaux composites peuvent être limités pour mettre l'accent sur les matériaux qui contiennent un constituant de matrice continu qui se lie et donne la forme à un réseau d'un constituant de renforcement plus solide et plus rigide.

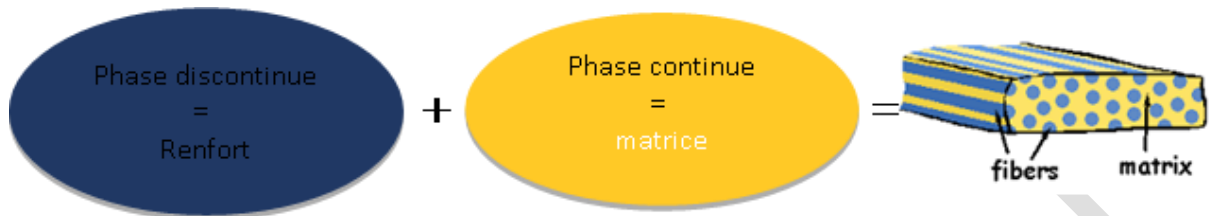
Notions de bases :

- [Les composants](#)

UN MATÉRIAU COMPOSITE consiste dans le cas le plus général d'une ou plusieurs phases discontinues de natures différentes, le composite est dit hybride. La phase discontinue est habituellement dure avec des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue. La phase continue est appelée matrice. La phase discontinue est appelée renfort matériau renforçant.

Les propriétés des matériaux composites résultent :

- Des propriétés des matériaux constituants,
- De leur distribution géométrique ;
- De leur interaction, etc.



- o [La liaison](#) entre les fibres et la matrice est créée lors de la phase de fabrication du matériau composite. Ceci a une influence fondamentale sur les propriétés mécaniques du matériau composite.

Ainsi, pour accéder à la description d'un matériau composite, il sera nécessaire de spécifier :

- La nature des constituants et leurs propriétés,
 - La géométrie du renfort, sa distribution ;
 - La nature de l'interface
- o [Les renforts](#)
 - [Les fibres](#) : Les fibres sont constituées de milliers de filaments, chaque filament ayant un diamètre compris entre 5 et 15 micromètres, ce qui permet de les fabriquer à l'aide de machines textiles ; par exemple, dans le cas de la fibre de verre, on peut obtenir deux semi-produits comme le montre la figure 1.

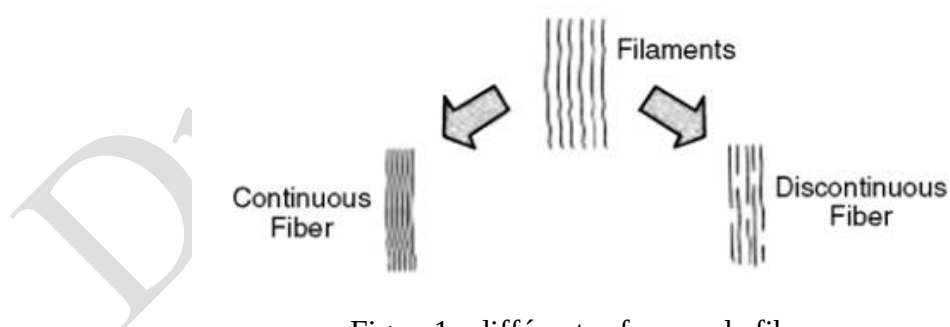


Figure1 : différentes formes de fibres

Ces fibres sont vendues sous les formes suivantes :

- Les fibres courtes, d'une longueur de quelques centimètres ou fractions de millimètres sont des feutres, mats et fibres courtes utilisés dans le moulage par injection.
- Les fibres longues, qui sont coupées lors de la fabrication du matériau composite, sont utilisées telles quelles ou tissées.

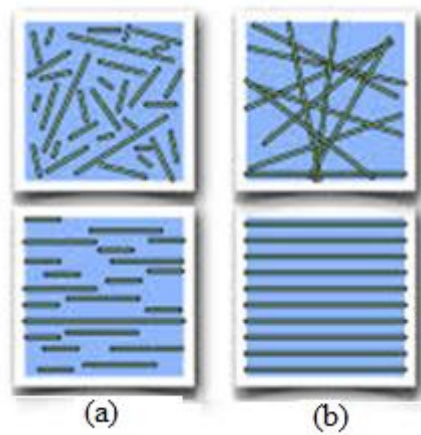


Figure 2 : Différentes formes de fibre

Les principaux matériaux fibreux sont :

- Verre
- Aramide ou Kevlar, (très léger)
- Carbone (haut module ou haute résistance)
- Bore (haut module ou haute résistance)
- Carbure de silicium (résistant aux hautes températures)

Lors de la formation de renfort fibreux, l'assemblage de fibres pour réaliser des formes fibreuses pour la fabrication de matériau composite peut prendre les formes suivantes :

- **Unidimensionnel** : câbles, fils ou rubans unidirectionnels ;
- **Bidimensionnel** : tissés ou non tissés (feutres ou mats) ;
- **Tridimensionnel** : parfois appelés tissus multidimensionnels avec des fibres orientées dans plusieurs directions (>2).

Avant la formation des renforts, les fibres sont soumises à un traitement de surface pour :

- Diminue l'action abrasive des fibres lors du passage dans les machines de formage.
- Améliorer l'adhérence avec le matériau de la matrice.

D'autres types de renforts, sphères pleines ou vides (microsphères) ou poudres, sont également utilisés.

Vu la quantité importante relative aux fibres utilisées dans la fabrication des composites. On remarque immédiatement l'importance industrielle de la fibre de verre (produite en grande quantité). Les fibres de carbone et de Kevlar sont réservées aux composants à hautes performances.

Voici quelques notes sur les fibres :

- ✓ Fibre de verre : Les filaments sont obtenus en tirant le verre (silicium + carbonate de sodium et carbonate de calcium ; $T > 1000^{\circ}\text{C}$) à travers les petits orifices d'une plaque en alliage de platine.
- ✓ Fibre Kevlar : Il s'agit d'une fibre aramide, de couleur jaunâtre. Ce sont des polyamides aromatiques obtenus par synthèse à -10°C , puis fibrillés et étirés pour obtenir un haut module d'élasticité.
- ✓ Fibre de carbone : Des filaments de polyacrylonitrile ou de brai (obtenus à partir de résidus des produits pétroliers) sont oxydés à haute température (300°C), puis chauffés encore à 1500°C sous atmosphère d'azote. Ensuite, seules les chaînes carbonées hexagonales restent (fig.3). Des filaments noirs et brillants sont obtenus. Un module d'élasticité élevé est obtenu par étirage à haute température.
- ✓ Fibre de bore : Le filament de tungstène (diamètre 12mm) sert à catalyser la réaction entre le chlorure de bore et l'hydrogène à 1200°C . Les fibres de bore obtenues ont un diamètre d'environ 100mm.
- ✓ Carbure de silicium : Le principe de fabrication est analogue à celui de la fibre de bore : dépôt chimique en phase vapeur (1200°C) de méthyl trichlorosilane mélangé à de l'hydrogène.

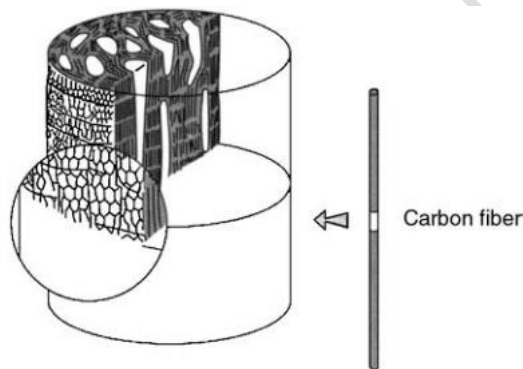
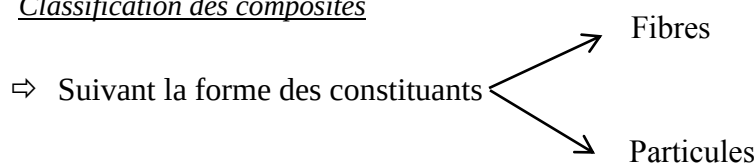


Figure 3 : Structure de fibre de Carbone

- Les matrices : Les matériaux de la matrice comprennent les éléments suivants :
 - ✓ Matrice polymérique : résines thermoplastiques (polypropylène, polyphénylène sulfone, polyamide, polyétheréthercétone...) et résines thermodurcissables (polyesters, phénoliques, mélamines, silicones, polyuréthanes, époxy).
 - ✓ Matrice minérale : carbure de silicium, carbone. Ils peuvent être utilisés à des températures élevées.
 - ✓ Matrice métallique : alliages d'aluminium, alliages de titane, eutectiques orientés.

Classification des composites



⇒ Suivant la nature des constituants

Composites à matrice organique
Fibres minérales : ex (C, verre)
Fibres organiques : ex (kevlar)
Fibres métalliques : ex (Al)

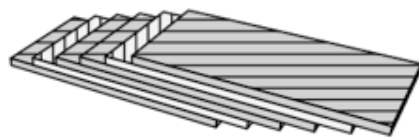
Composites à matrice minérale (C, Al_2O_3 , SiO_2 , Cr_2O_3 , MgO , SiC ...)

Composites à matrice métallique :
ex (alliages d'aluminium)

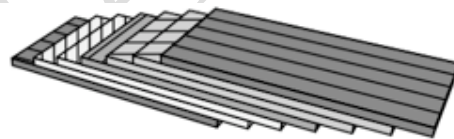
○ Les matériaux composites structuraux

✓ Structures en stratifiées

Les structures stratifiées sont constituées de couches successives de matériaux composites. Ces couches sont également nommées plis. Elles sont liées par de la résine. Ces pièces structurelles sont réalisées en optimisant les directions des renforts en fonction des charges qu'elles doivent subir. L'interface inter-laminaire assure le transfert des déplacements et des contraintes normales d'une couche à une autre.



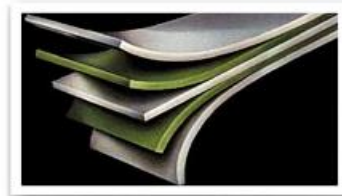
(a) $[-45/45/-45/-45/45/-45]$



(b) $[0/45/45/90/-45/-45/0]$



(a)



(b)

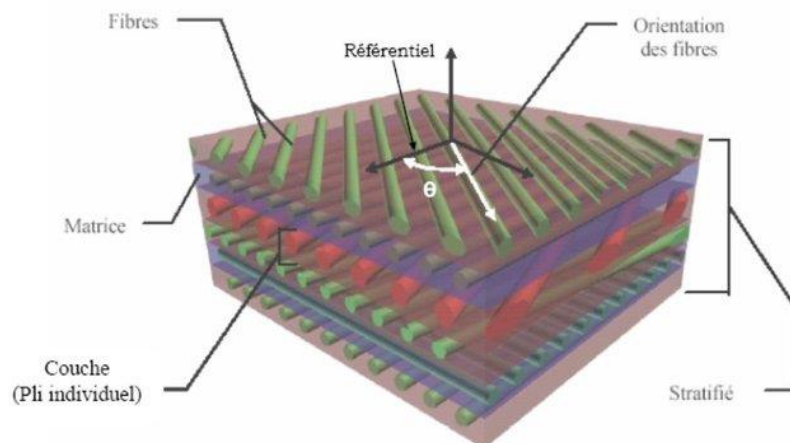


Figure 4 : Structures stratifiées

✓ Structures en sandwich

Les structures composites subissant des sollicitations de type flexion ou torsion sont généralement construites en matériaux sandwichs. 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. Les âmes les plus utilisées sont de type nid d'abeilles, âme ondulée ou mousse. Ces structures ont une grande rigidité en flexion et torsion.

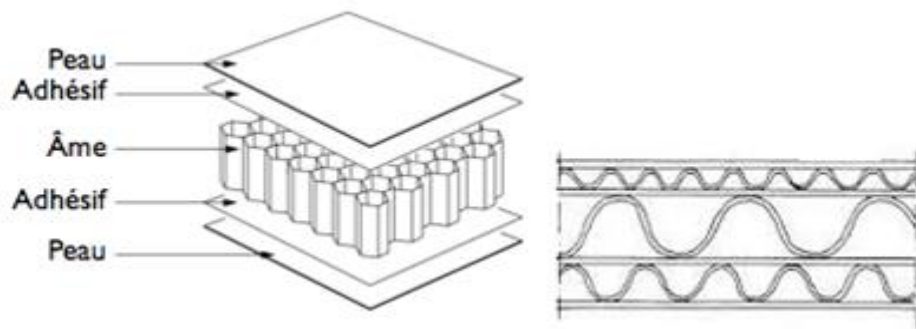


Figure 5 : Structures Sandwichs

EXEMPLES TYPIQUES D'INTÉRÊT SUR L'UTILISATION DE MATÉRIAUX COMPOSITES

Dans le domaine des avions commerciaux, on peut comparer les préoccupations des constructeurs aux principales propriétés caractéristiques des matériaux composites. Les soucis des constructeurs sont la performance et l'économie. Les caractéristiques des composants composites comprennent les éléments suivants :

- L'économie de poids entraîne une économie de carburant, une augmentation de la charge utile ou une augmentation de l'autonomie qui améliore les performances.
- Une bonne résistance à la fatigue améliore la durée de vie, ce qui implique des économies sur le coût à long terme du produit.
- Une bonne résistance à la corrosion signifie moins d'exigences d'inspection, ce qui se traduit par des économies sur les coûts de maintenance.

Par ailleurs, compte tenu du coût de la solution composite par rapport à la solution classique, on peut affirmer que les composites répondent à la demande des avionneurs.