



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE ABOU-BEKR BELKAID – TLEMCEEN



MEMOIRE

Présenté à :

FACULTE DES SCIENCES – DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

Pour l'obtention du diplôme de :

MASTER EN PHYSIQUE

Spécialité : physique des polymères

Par :

Mademoiselle AMINA MIDOUN

Sur le Thème :

**Étude comparative du comportement mécanique
des matériaux composites à matrice polymère : cas
d'un matériau composite élastique unidirectionnel
à fibres de verre et d'un matériau composite
élastique unidirectionnel à fibres de carbone**

Soutenu le 08 juillet 2019 devant le jury composé de :

Président : M. HAMOUNI	Professeur	Université de Tlemcen
Encadreur : S. KHALDI	Professeur	Université de Tlemcen
Examineur : M. BENHAMOU	MCB	ESSA-Tlemcen

Mes remerciements

- *Ce travail a été réalisé au Laboratoire de recherche sur les Macromolécules de la Faculté des Sciences de l'Université de Tlemcen sous la direction du professeur Smain Khaldi. Je tiens à lui exprimer mes sincères remerciements et ma profonde gratitude pour son suivi constant et ses précieuses orientations.*
- *Je tiens aussi à remercier, vivement, le professeur Mohammed Hamouni, d'avoir bien voulu accepter, de présider le jury de cette soutenance.*
- *Le docteur Mohammed Benhamou, maitre de Conférences à l'Ecole Supérieure en Sciences Appliquées de Tlemcen, a bien voulu accepter de juger le présent travail, qu'il trouve ici l'expression de mes vifs remerciements.*

Table des matières

Mes remerciements	1
Avant-propos	3
1. Introduction Générale	5
2. Position du problème.....	7
3. Données retenues	8
4. CONCEPTS GENERAUX	9
5. RESULTATS ET DISCUSSIONS	22
5.1 Influence de la nature du matériau de renfort et de sa fraction volumique sur la masse volumique des composites.....	23
5.2 Influence de la nature du renfort et de sa fraction volumique sur la porosité et la qualité des matériaux composites.	34
5.3 Effets de la nature du matériau du renfort et de sa fraction volumique sur les modules de Young longitudinal et spécifique des matériaux composites.	45
5.4 Etude comparative des modules de Young longitudinaux des composites	62
5.5 Etude comparative des modules de Young spécifiques des matériaux composites.	65
5.6 Etude comparative des modules de Young spécifiques des composites	68
Conclusions	78

Avant-propos

- Dans le travail réalisé dans ce mémoire de master de physique des polymères, notre prétention n'est pas de présenter des résultats originaux, mais d'approfondir la compréhension du cours sur les matériaux composites dispensé en deuxième année de ce cursus et, surtout, de procéder, à sa bonne application.
- Les notions que nous utilisons dans ce mémoire de master sont déjà connues. Elles sont souvent rapportées par de nombreux auteurs dans la littérature scientifique traitant du comportement mécanique des matériaux composites.
- Les différents travaux que nous avons consultés et sur lesquels nous nous sommes fortement appuyés pour effectuer ce travail sont rapportés dans nos références bibliographiques.

1. INTRODUCTION GENERALE

1. Introduction Générale

Les matériaux composites sont des matériaux à hautes performances mécaniques, façonnables à volonté au gré du concepteur et doués d'un potentiel illimité. Les matériaux composites se développent aujourd'hui dans pratiquement tous les domaines et sont à l'origine de formidables challenges dans diverses réalisations de haute technologie [1].

Le but de ce travail est le suivant : connaissant les caractéristiques des constituants précurseurs (verre, carbone et époxyde) nous cherchons à prédire celles des matériaux composites : époxyde/verre E, époxydes/verre R, époxyde/carbone HM et époxyde/carbone HR.

- Dans une première étape de notre travail, nous examinons influence de la nature du renfort et de sa fraction volumique sur la masse volumique des matériaux composites : époxyde/verre E, époxyde/verre R, époxyde/carbone HM et époxyde/carbone HR.
- Dans une deuxième étape, nous examinons influence de la nature du renfort et de sa fraction volumique sur la porosité et, par voie de conséquence, sur la qualité des matériaux composites : époxyde/verre E, époxyde/verre R, époxyde/carbone HM, et époxyde/carbone HR. Nous précisons, ainsi, les intervalles de variation de la fraction volumique du renfort (verre ou carbone) qui induisent, respectivement, une bonne, une médiocre et une mauvaise qualité de ces matériaux composites.
- Dans une troisième étape de ce travail, nous examinons l'influence de la nature du renfort et de sa fraction volumique sur les modules de Young longitudinaux des matériaux composites: époxyde/verre E, époxyde/verre R, époxyde/carbone HM et époxyde/carbone HR.
- Dans une quatrième étape de notre travail, nous examinons l'influence de la nature du renfort et de sa fraction volumique sur les modules de Young spécifiques des matériaux composites: époxyde/verre E, époxyde/verre R, époxyde/carbone HM et époxyde/carbone HR. A cet effet, nous examinons, successivement, le cas des matériaux composites chargés en traction et celui des matériaux composites chargés en flexion.

- Enfin, il faut rappeler que dans chacune de ces quatre étapes nous établissons les lois de variation des grandeurs physiques étudiées et effectuons une étude comparative de ces grandeurs physiques lorsque la nature du renfort et sa fraction volumique varient.

Références bibliographiques

[1] Jean Marie Berthelot (2005). *Matériaux composites : comportement mécanique et analyse des structures*, Edition TEC & DOC, 11 rue Lavoisier 75008 Paris, France.

2. Position du problème

Le problème que nous examinons dans ce mémoire de master de physique des polymères se pose comme suit :

Connaissant les caractéristiques (module de Young, masse volumique) d'une matrice en résine époxyde et de quatre matériaux minéraux de renfort (verre E, verre R, carbone HM, carbone HR), nous cherchons à prédire les caractéristiques (masse volumique, porosité, qualité, module de Young, module de Young spécifique, rigidité) des quatre matériaux composites suivants : époxyde/verre E, époxyde/verre R, époxyde/carbone HM et époxyde/carbone HR, lorsque la nature du matériau de renfort change et sa fraction volumique varie.

A chaque étape de notre travail, nous établissons les lois de variation de ces grandeurs physiques et procédons à leur étude comparative lorsque la nature du matériau de renfort change et sa fraction volumique varie.

3. Données retenues ^[1]

Pour effectuer ce travail, nous avons retenu les données suivantes, que nous jugeons suffisantes du point de vue nombre et de bonne qualité :

- **Matrice en résine époxyde :**

Module de Young : $E = 3.45 \text{ GPa}$

Masse volumique : $\rho = 1200 \text{ kg/m}^3$

- **Fibres de verre E :**

Module de Young : $E = 73 \text{ GPa}$

Masse volumique : $\rho = 2600 \text{ kg/m}^3$

- **Fibres de verre R :**

Module de Young : $E = 86 \text{ GPa}$

Masse volumique $\rho = 2550 \text{ kg/m}^3$

- **Fibres de carbone HM :**

Module de Young : $E = 380 \text{ GPa}$

Masse volumique $\rho = 1950 \text{ kg/m}^3$

- **Fibres de carbone HR :**

Module de Young : $E = 260 \text{ GPa}$

Masse volumique $\rho = 1750 \text{ kg/m}^3$

- **Matériau composite époxyde/verre E :**

Masse volumique mesurée : $\rho_{\text{ex}} = 2040 \text{ kg/m}^3$

- **Matériau composite époxyde/verre R :**

Masse volumique mesurée : $\rho_{\text{ex}} = 2010 \text{ kg/m}^3$

- **Matériau composite époxyde/carbone HM :**

Masse volumique mesurée : $\rho_{\text{ex}} = 1650 \text{ kg/m}^3$

- **Matériau composite époxyde/carbone HR :**

Masse volumique mesurée : $\rho_{\text{ex}} = 1550 \text{ kg/m}^3$

4. CONCEPTS GENERAUX

4.1 Matériau composite ^[1]

Un matériau composite peut être défini comme une combinaison d'au moins deux matériaux différents à l'échelle macroscopique ou plusieurs matériaux non miscibles (mais ayant une forte capacité d'adhésion), l'assemblage final ayant des propriétés supérieures aux propriétés de chacun des matériaux constitutifs. On appelle de façon courante "matériaux composites" des arrangements de fibres noyées dans une matrice dont la résistance mécanique est beaucoup plus faible (Figure1). La matrice assure la cohésion et l'orientation des fibres, elle permet également de transmettre les sollicitations auxquelles sont soumises les pièces. Les matériaux ainsi obtenus sont hétérogènes et anisotropes.

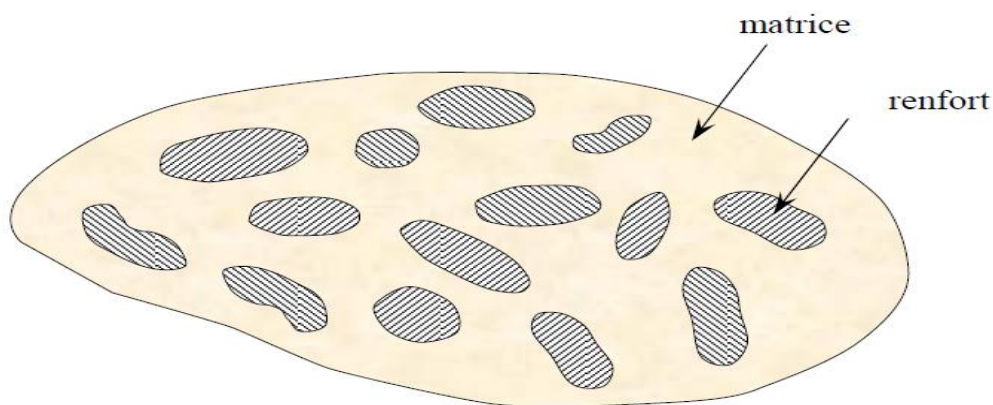


Figure 1 : Schéma d'un matériau composite ^[2]

4.2 Constituants des matériaux composites

4.2.1 La matrice ^[3]

Dans un matériau composite, la phase continue est appelée la matrice et désigne la matière solide qui entoure les renforts pour former une masse compacte. Le premier rôle de la matrice est de maintenir les renforts dans une forme compacte et de donner la forme voulue au produit final. Elle sert également à protéger les fibres contre l'abrasion et un environnement agressif et aussi de contrôler le fini de surface et d'assurer le transfert de charges entre les fibres.

Selon la nature de la matrice, les matériaux composites sont classés suivant des composites à matrice organique, composites à matrice métallique ou composites à matrice minérale.

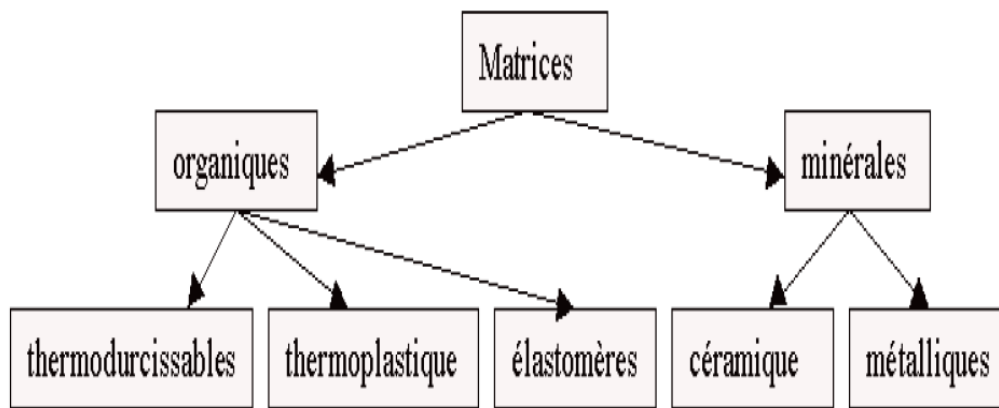


Figure 2 : différents types des résines [1-4]

4.2.2 Le renfort [1-4]

Le renfort est une armature, ou squelette du matériau composite qui a pour rôle d'assurer la tenue mécanique (résistance à la traction, rigidité) du matériau composite. Le renfort peut se présenter sous formes de fibres courtes ou de fibres continues, souvent de nature filamentaire, de fibres organiques ou de fibres inorganiques. Les fibres possèdent généralement une bonne résistance à la traction.

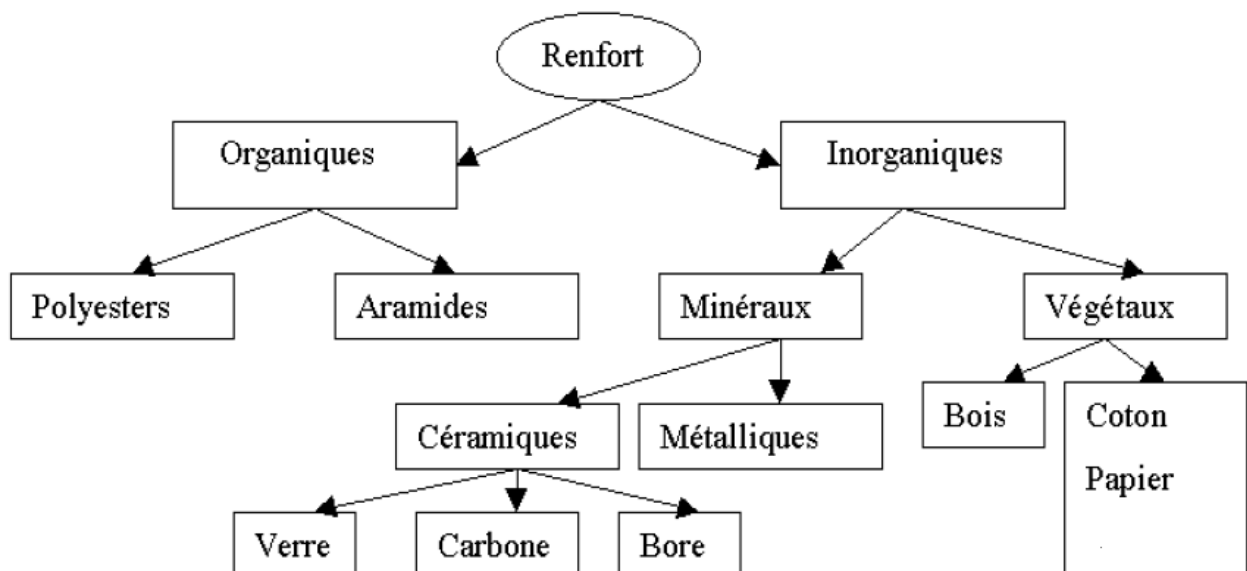


Figure 3 : différents type de renforts [1-4]

4.3 Les fibres ^[5]

La rupture des matériaux à haute résistance ou haut module est généralement provoquée par la propagation de fissures. Les matériaux en forme de fibre sont intrinsèquement plus résistants à la rupture qu'en forme massive car la taille des défauts est limitée par le faible diamètre. Dans un composite fibreux, la tenue mécanique est assurée principalement par les fibres. Par sa nature filamenteuse, la rupture de quelques fibres a pour résultat la redistribution du chargement sur les autres fibres, ce qui empêche la rupture catastrophique de la structure. Les fibres les plus souvent rencontrées dans les composites sont les suivantes :

4.3.1 Fibre de verre ^[1-4]

Ce type de fibre est très répandu dans des applications à basse performance ainsi que dans des applications haute performance telles que les réservoirs de propulseurs de fusée. Leurs avantages incluent un prix compétitif, une disponibilité et une résistance élevée.

Voici, à titre d'exemple, deux types de verre utilisés dans la fabrication des fibres de verre :

Verre E : utilisé dans les composites de grande diffusion.

Verre R : utilisé pour dans les composites à hautes performances.

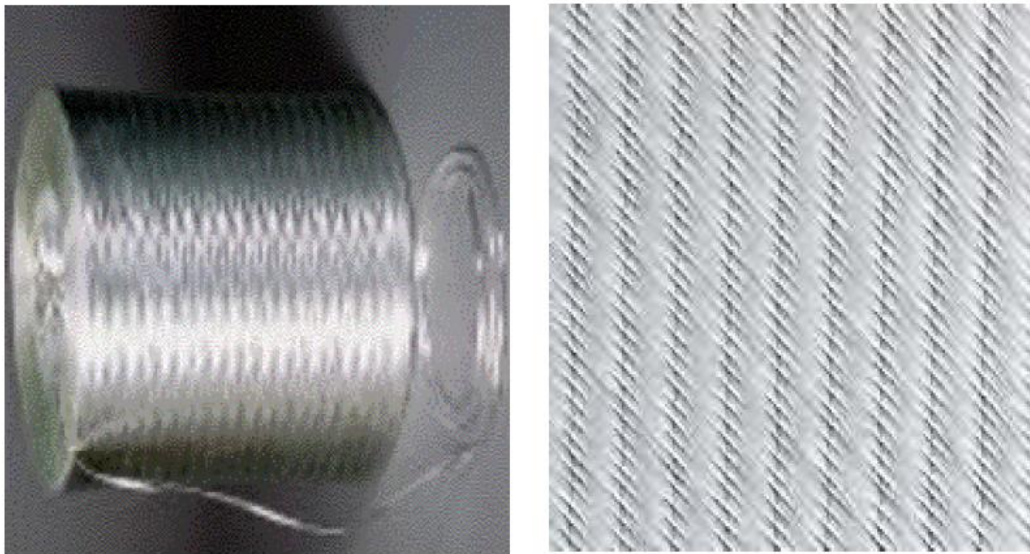


Figure 4 : différents types de fibre de verre ^[1-4]

4.3.2 Fibre de carbone [1-4]

Actuellement, les fibres de carbone sont les plus répandues pour les matériaux composites à hautes performances. Les deux avantages principaux de ces fibres sont leur fabrication plus adaptée à la production à grande échelle que d'autres fibres hautes performances et leurs excellentes propriétés mécaniques plus facilement transférables aux matériaux composites. Leur prix reste toutefois élevé pour les produits grand public. Ces fibres sont utilisées dans les applications à hautes performances.

Voici, à titre d'exemple, deux types de carbone utilisés dans la fabrication des fibres de carbone :

- Carbone HM (Haut Module) pour une combustion de 1800 à 2000°C.
- Carbone HR (Haute Résistance) pour une combustion de 1000 à 1500 °C.

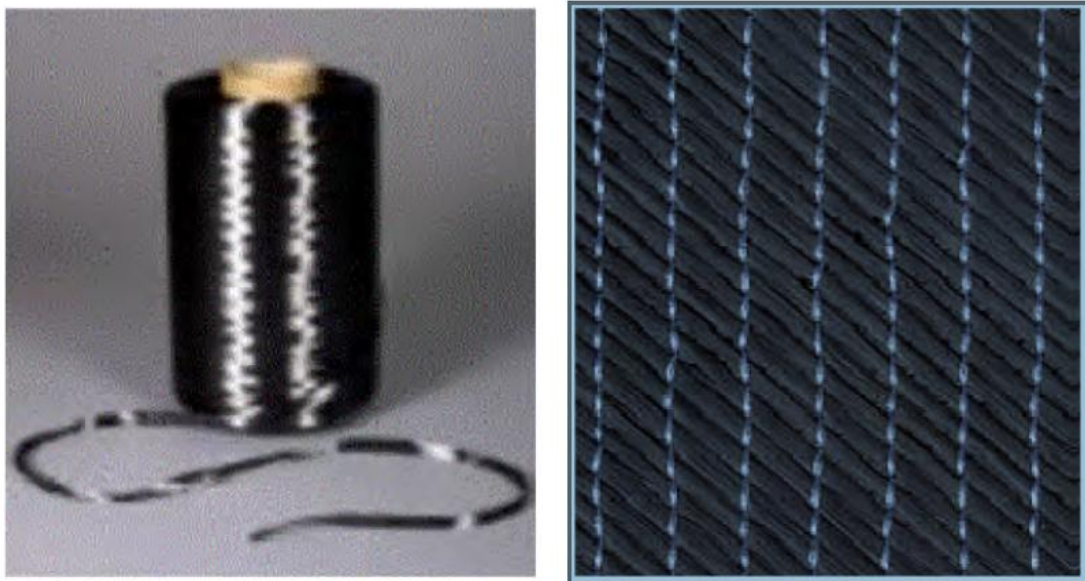


Figure 5 : différents types de fibre carbone [1-4]

4.4 Les résines époxydes ^[2]

Les résines les plus utilisées après les résines polyesters insaturées sont les résines époxydes. Elles ne représentent cependant que de l'ordre de 5% du marché mondial des composites, à cause de leur prix élevé (de l'ordre de cinq fois plus que celui des résines polyesters).

Du fait de leurs bonnes caractéristiques mécaniques, les résines époxydes, généralement utilisées sans charges, sont les matrices des composites à hautes performances (construction aéronautiques, espace, missiles, etc.).

Les résines époxydes conduisent donc à un ensemble de performances élevées.

Toutefois, pour bénéficier réellement de ces performances, il est nécessaire d'avoir des durées de transformation et surtout de recuit très longues (de plusieurs heures à plusieurs dizaines d'heures), et à des températures qui sont relativement élevées (50 à 100 °C).

Parmi les avantages des résines époxydes, nous retiendrons:

- de bonnes propriétés mécaniques (en traction, flexion, compression, choc, fluage, etc.) supérieures à celles des polyesters.
- Une bonne tenue aux températures élevées : 150°C à 190°C
- Une excellente résistance chimique
- Un faible retrait au moulage (de 0.5 à 1 %).
- Une très bonne mouillabilité des renforts.
- Une excellente adhérence aux matériaux métalliques.

Parmi les inconvénients, nous citerons:

- Un temps de polymérisation long
- Un coût élevé
- La nécessité de prendre des précautions lors de la mise en œuvre
- Une sensibilité à la fissuration

4.5 Masse volumique ^[2]

L'un des paramètres les plus importants qui déterminent les caractéristiques mécaniques d'un matériau composite est sa composition, c'est-à-dire la proportion relative de matrice et de renfort. Cette proportion peut être exprimée soit en fraction volumique soit en fraction massique. Les fractions massiques sont plus faciles à mesurer lors de l'élaboration du matériau composite. Cependant, les fractions volumiques interviennent directement

dans les modèles théoriques qui décrivent le comportement mécanique des matériaux, en général, et des matériaux composites, en particulier.

La masse volumique d'un matériau composite s'écrit en fonction des fractions volumiques suivant : [2]

$$\rho_c = \rho_f \cdot \Phi_f + \rho_m \cdot (1 - \Phi_f) \quad (1)$$

Avec :

ρ_c : Masse volumique du matériau composite

ρ_m : Masse volumique de la matrice

Φ_f : Fraction volumique du renfort

ρ_f : Masse volumique du renfort.

4.6 La porosité [2]

Il arrive, parfois, que la masse volumique obtenue expérimentalement diffère de la valeur de la masse volumique calculée à partir des masses des constituants. Ce désaccord, lorsqu'il dépasse la précision expérimentale, peut être attribué à la présence de porosités dans le matériau composite ainsi élaboré. La connaissance de la masse volumique calculée ρ_{ct} et la masse volumique mesurée expérimentalement ρ_{ex} permet d'estimer la fraction volumique Φ_p des porosités présentes dans le matériau composite.

La présence de porosités dans un matériau composite peut entraîner une diminution significative de ses caractéristiques mécaniques. Elle augmente, aussi, la sensibilité du matériau composite à l'environnement extérieur telle que l'augmentation de l'absorption de l'humidité et la diminution de la résistance aux produits chimiques.

D'où l'importance d'avoir une bonne estimation de la proportion de porosités afin d'évaluer la qualité d'un matériau composite :

Pour un matériau composite de bonne qualité : $\Phi_p < 1\%$

Pour un matériau composite de qualité médiocre : $1\% < \Phi_p < 5\%$

Pour un matériau composite de mauvaise qualité : $\Phi_p > 5\%$

La porosité d'un matériau composite s'écrit en fonction des fractions volumiques suivant : [2]

$$\Phi_p = \frac{\rho_{ct} - \rho_{ex}}{\rho_{ct}} \quad (2)$$

Avec :

Φ_p : La fraction de porosité.

ρ_{ct} : Masse volumique théorique calculée

ρ_{ex} : Masse volumique mesurée expérimentalement

4.7 Module de Young longitudinal ^[2]

Le module de Young longitudinal est déterminé dans un essai de traction longitudinal, le module de Young ou module d'élasticité est la constante qui relie la contrainte de traction (ou de compression) et le début de la déformation d'un matériau élastique isotrope.

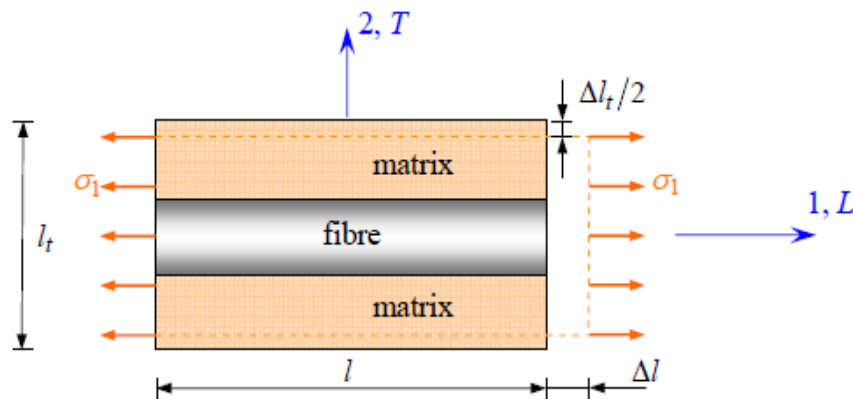


Figure 6 : schéma simplifié d'une traction longitudinale ^[2]

Avec :

1, L : la direction longitudinale.

2, T : la direction transverse.

σ_1 : la contrainte suivant la direction 1 (direction longitudinale)

Le module de Young longitudinal est déterminé par la loi des mélanges. La variation du module de Young est linéaire entre les valeurs E_m du module de

la matrice et E_f du module des fibres, lorsque la fraction volumique Φ_f des fibres varie entre zéro et un. [2]

$$E_{Lc} = E_f \cdot \Phi_f + E_m \cdot (1 - \Phi_f) \quad (3)$$

Avec :

E_{Lc} : Module de Young du matériau composite.

E_f : Module de Young du renfort (fibre).

E_m : Module de Young de la matrice.

Φ_f : La fraction volumique du renfort (fibre)

4.8 Module de Young spécifique [2]

4.8.1 Cas d'une éprouvette chargée en traction [2]

On considère une éprouvette chargée en traction par une charge $\vec{F}$

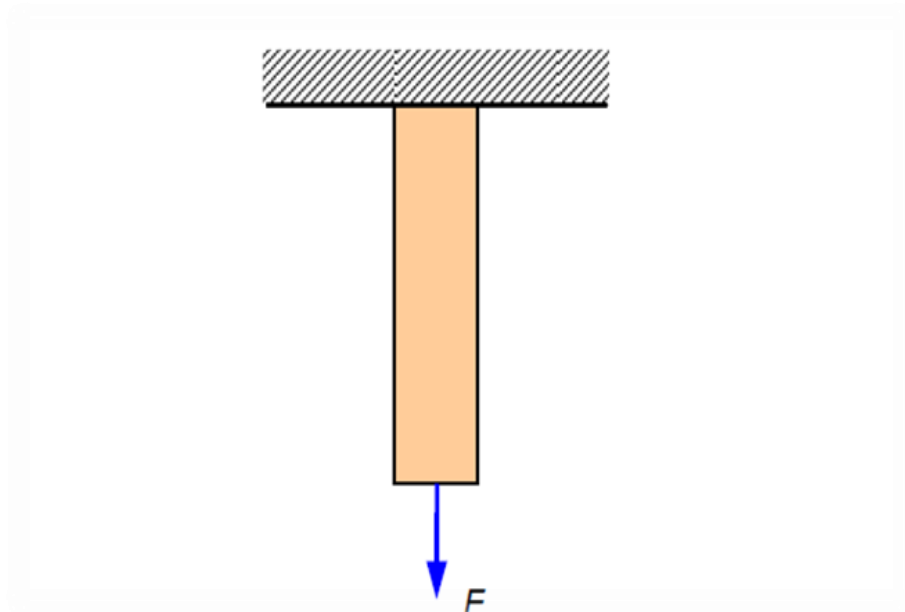


Figure 7 : éprouvette chargée en traction [2]

La relation entre la charge et l'allongement Δl de l'éprouvette est donnée par :

$$F = \frac{E \cdot S}{l} \cdot \Delta l \quad (4)$$

Où :

E est le module d'Young longitudinal du matériau composite, **S** la section de l'éprouvette et **l** longueur. La rigidité qui caractérise les performances mécaniques du matériau composite dans le domaine élastique est donnée par :

$$K = \frac{E \cdot S}{l} \quad (5)$$

Dans le cas de deux matériaux composites A et B, le rapport des rigidités est :

$$\frac{K_A}{K_B} = \frac{E_A \cdot S_A}{E_B \cdot S_B} \cdot \frac{l_B}{l_A} \quad (6)$$

Le rapport des masses des deux éprouvettes A et B s'écrit :

$$\frac{m_A}{m_B} = \frac{S_A \cdot l_A}{S_B \cdot l_B} \cdot \frac{l_A}{l_B} \quad (7)$$

Après l'introduction des masses volumiques des deux matériaux et la combinaison des relations (3) et (4), on obtient :

$$\frac{K_A}{K_B} = \frac{E_A / \rho_A}{E_B / \rho_B} \cdot \frac{m_A}{m_B} \cdot \left(\frac{l_A}{l_B} \right)^2 \quad (8)$$

La comparaison des rigidités doit se faire à longueurs identiques.

C'est-à-dire pour $l_A = l_B$:

$$\frac{K_A}{K_B} = \frac{E_A / \rho_A}{E_B / \rho_B} \cdot \frac{m_A}{m_B} \quad (9)$$

L'utilisation des matériaux composites dans divers domaines (Espace, aviation, sport, bâtiment, etc.), a conduit à comparer des structures à masses égales, pour $m_A = m_B$ le rapport des rigidités s'écrit :

$$\frac{K_A}{K_B} = \frac{E_A/\rho_A}{E_B/\rho_B} \quad (10)$$

Le meilleur matériau est celui qui possède la valeur de E/ρ la plus élevée, conduisant à la valeur de la rigidité la plus élevée du matériau composite. Le terme E/ρ est appelé module spécifique d'Young du matériau composite.

4.8.2 Cas d'une éprouvette chargée en flexion ^[2]

Un calcul similaire au précédent peut être effectué dans le cas d'une poutre en matériau composite chargée en flexion.

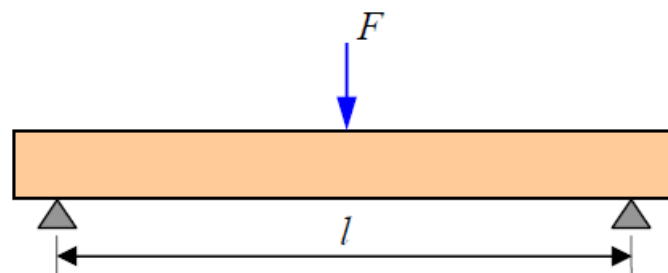


Figure 8 : poutre chargée en flexion ^[2]

Dans ce cas la charge F s'exprime en fonction de la flèche f par :

$$F = 48 \cdot \frac{E \cdot I}{l^3} \cdot f = K \cdot f \quad (11)$$

I est le moment d'inertie de la section droite de la poutre et l la distance entre les appuis, K est la rigidité de la poutre chargée en flexion.

Supposons que l'éprouvette soit cylindrique de rayon r , le moment d'inertie s'écrit :

$$I = \frac{M}{4} \cdot r^4 \quad (12)$$

La masse m est donnée par :

$$m = \rho \cdot M \cdot r^2 \cdot l \quad (13)$$

Dans le cas de deux matériaux **C** et **D**, le rapport des rigidités s'écrit :

$$\frac{K_C}{K_D} = \frac{E_C / \rho_C^2}{E_D / \rho_D^2} \cdot \left(\frac{m_C}{m_D} \right)^2 \cdot \left(\frac{l_D}{l_C} \right)^5 \quad (14)$$

Le meilleur matériau est celui qui possède la valeur E/ρ^2 du module spécifique la plus élevée.

4.9 Constitution d'un composite unidirectionnel [2]

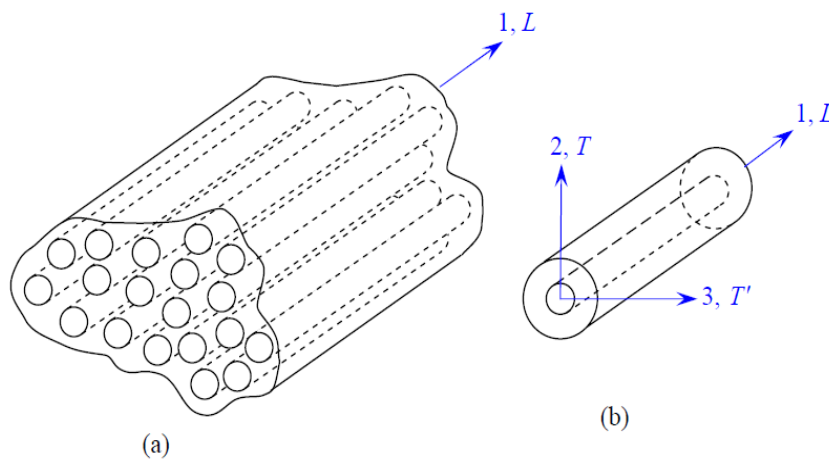


Figure 9 : composite unidirectionnel [2]

Avec :

1,L : la direction longitudinale.

2,T : la direction transverse .

3,T : la direction perpendiculaire de 1,L et 2,L

Un composite unidirectionnel est constitué des fibres parallèles disposées dans une matrice (figure 9.a). Ce type de matériau constitue la configuration de base des matériaux composite à fibres, d'où l'importance de son étude.

La cellule élémentaire d'un tel matériau peut être considérée, en première approximation, comme constituée (figure 9.b) d'une fibre entourée d'un cylindre de matrice à base circulaire ou mieux hexagonale. Cette cellule possède un axe de révolution, que nous notons l'axe 1. Cette direction parallèle aux fibres est appelée direction longitudinale, et pour cette raison l'axe 1 est également noté l'axe L. Toute direction normale aux fibres est appelée direction transversale, et le composite est considéré comme étant isotrope transverse : il est isotrope dans le plan normal à la direction 1.

Le plan transverse sera repéré par les directions 2 et 3, notée également T et T', ces directions étant équivalentes.

Références bibliographiques

[1] Mémoire de master «Caractérisation du Comportement Micromécanique d'un Matériau Composite par Différentes Approches Mathématiques», Université Mentouri Constantine, Saber Benferdi, 2010/2011

[2] Jean Marie Berthelot (2005). Matériaux composites « comportement élastique d'un matériau composite unidirectionnel, constitution d'un matériau composite unidirectionnel, Edition TEC & DOC, 11 rue Lavoisier 75008 Paris, France ».

[3] Jérémie Aucher. Etude comparative du comportement d'un composite à matrice thermoplastique ou thermodurcissable. Autre .INSA de Rouen, 2009.

[4] Glossaire des matériaux composites. Centre d'Animation Régional en matériau Actives-CARMA-

[5] Anh Tuan Tran. Etude du délaminage en mode II de composites unidirectionnels Soumis à des sollicitations rapides : approche globale et approche locale. Mécanique des matériaux [physics.class-ph]. Arts Métiers Paris Tech, 2011.

5. RESULTATS ET DISCUSSIONS

5.1 Influence de la nature du matériau de renfort et de sa fraction volumique sur la masse volumique des composites : époxyde/verre E, de époxyde/verre R, de époxyde/carbone HM et époxyde/carbone HR

5.1.1. Cas du matériau composite époxyde/verre E

Pour calculer la masse volumique théorique de ce matériau composite nous utilisons la loi des mélanges suivante :

$$\rho_c = \rho_f \cdot \Phi_f + \rho_m \cdot (1 - \Phi_f) \quad (15)$$

Avec :

ρ_c : Masse volumique du matériau composite.

ρ_m : Masse volumique de la matrice : résine époxyde

ρ_f : Masse volumique du matériau de renfort : verre E

Ainsi, la masse volumique du matériau composite époxyde/verre E est donnée par la relation suivante :

$$\rho_{c(evE)} = \rho_{vE} \cdot \Phi_{vE} + \rho_e \cdot (1 - \Phi_{vE}) \quad (16)$$

Où :

$\rho_{c(evE)}$: Masse volumique théorique du matériau composite époxyde/verre E

ρ_{vE} : Masse volumique du renfort verre E

Φ_{vE} : La fraction volumique du renfort verre E

ρ_e : Masse volumique de la matrice en résine époxyde

La masse volumique du composite unidirectionnel époxyde/verre E, a été calculée avec les données suivantes :

Masse volumique du verre E $\rho_{vE} = 2600 \text{ kg/m}^3$

Masse volumique de l'époxyde $\rho_e = 1200 \text{ kg/m}^3$

Dans ces conditions, la loi de variation de la masse volumique du matériau composite unidirectionnel époxyde/verre E en fonction de la fraction volumique du renfort verre E s'écrit :

$$\rho_{c(evE)} = 1400 \cdot \Phi_{vE} + 1200 \quad (17)$$

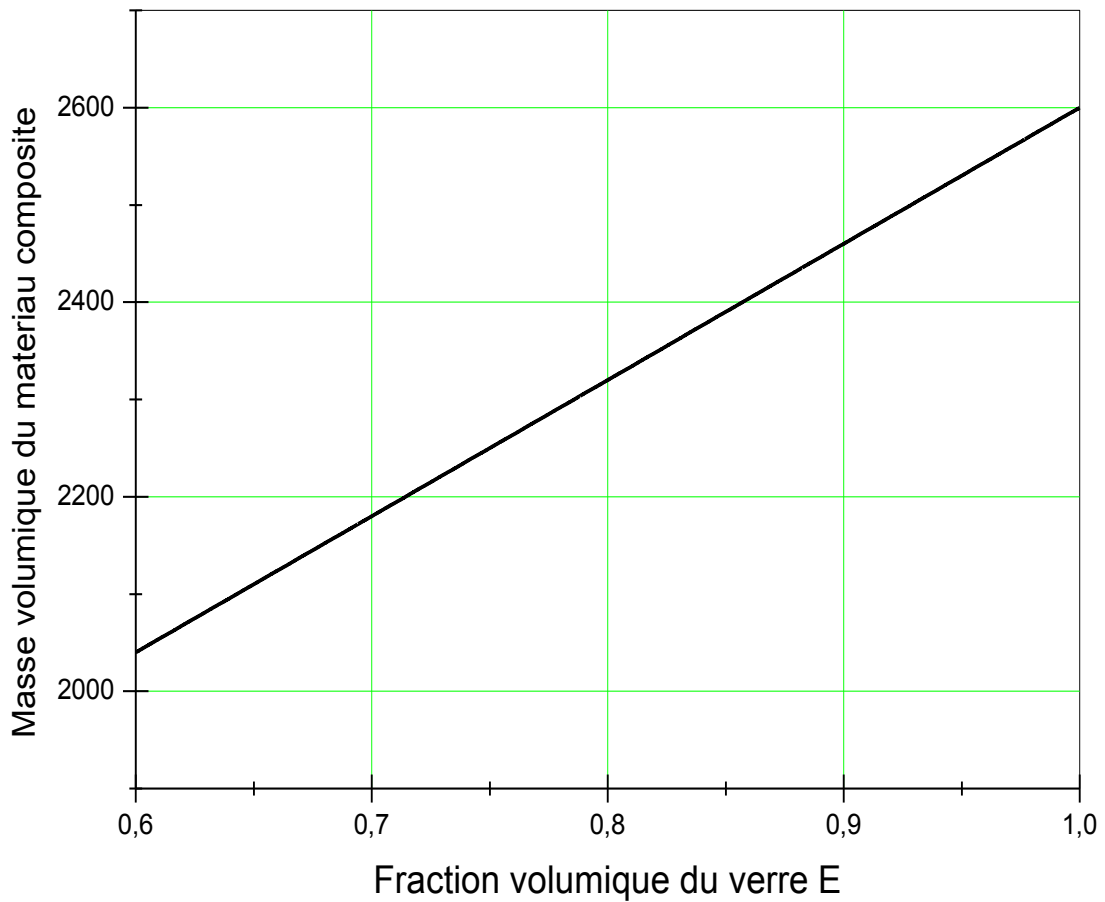


Figure 10 : variation de la masse volumique de l'époxyde/verre E en fonction de la fraction volumique du verre E

La figure 10 représente la variation de la masse volumique du matériau composite époxyde/verre E en fonction de la fraction volumique du matériau de renfort verre E.

Comme attendu, l'augmentation de la fraction volumique du renfort provoque une augmentation de la masse volumique du matériau composite époxyde/verre E.

La variation de la masse volumique du composite époxyde/verre E est linéaire entre les valeurs $\rho_{ex} = 2040 \text{ kg/m}^3$ de la masse volumique mesurée expérimentalement et celle du renfort seul $\rho_{vE} = 2600 \text{ kg/m}^3$

5.1.2. Cas du matériau composite époxyde/verre R

La masse volumique théorique de ce matériau composite s'obtient aussi à partir de la loi des mélanges comme suit :

$$\rho_{c(evR)} = \rho_{vR} \cdot \Phi_{vR} + \rho_e \cdot (1 - \Phi_{vR}) \quad (18)$$

Avec :

$\rho_{c(evR)}$: Masse volumique théorique du composite époxyde/verre R

ρ_{vR} : Masse volumique du renfort verre R

Φ_{vR} : La fraction volumique du renfort verre R

ρ_e : Masse volumique de la matrice en résine époxyde

Pour calculer la masse volumique du matériau composite unidirectionnel époxyde/verre R, nous avons retenu les données suivantes :

Masse volumique du verre R : $\rho_{vR} = 2550 \text{ kg/m}^3$

Masse volumique de l'époxyde : $\rho_e = 1200 \text{ kg/m}^3$

La loi de variation de la masse volumique du matériau composite unidirectionnel époxyde/verre R en fonction de la fraction volumique du renfort verre R s'écrit :

$$\rho_{c(evR)} = 1350 \cdot \Phi_{vR} + 1200 \quad (19)$$

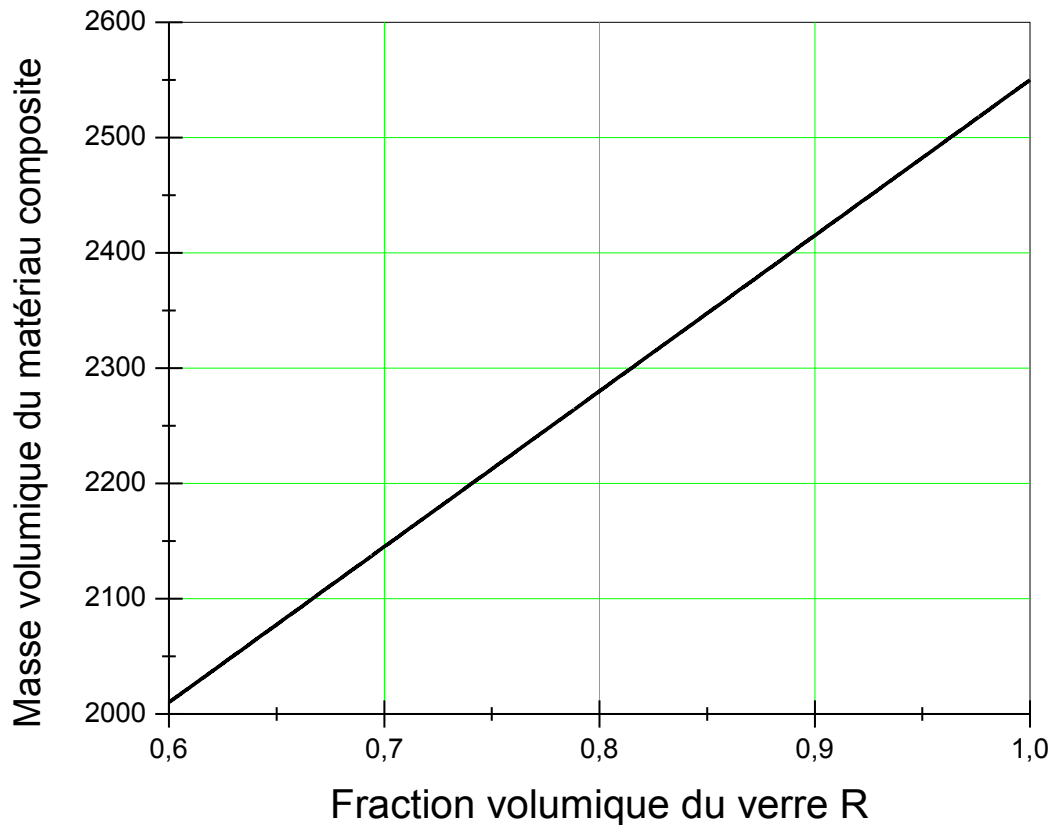


Figure 11 : variation de la masse volumique de l'époxyde/verre R en fonction de la fraction volumique du verre R

La figure 11 représente la variation de la masse volumique du matériau composite époxyde/verre R en fonction de la fraction volumique du matériau de renfort verre R.

Comme attendu, l'augmentation de la fraction volumique du renfort provoque une augmentation de la masse volumique du matériau composite époxyde/verre R.

La variation de la masse volumique du composite époxyde/verre R est linéaire entre les valeurs $\rho_{ex} = 2010 \text{ kg/m}^3$ de la masse volumique mesurée expérimentalement et celle du renfort seul $\rho_{vR} = 2550 \text{ kg/m}^3$

5.1.3. Cas du matériau composite époxyde/carbone HM

Pour calculer la masse volumique théorique du matériau composite unidirectionnel époxyde/carbone HM nous utilisons également la loi des mélanges suivante :

$$\rho_{c(ecHM)} = \rho_{cHM} \cdot \Phi_{cHM} + \rho_e \cdot (1 - \Phi_{cHM}) \quad (20)$$

$\rho_{c(ecHM)}$: Masse volumique théorique (calculée) du composite époxyde/carbone HM

ρ_{cHM} : Masse volumique du renfort carbone HM

Φ_{cHM} : La fraction volumique du renfort carbone HM

ρ_e : Masse volumique de la matrice époxyde

Pour calculer la masse volumique du matériau composite unidirectionnel époxyde/carbone HM, nous avons retenu les données suivantes :

Masse volumique du renfort carbone HM : $\rho_{cHM} = 1950 \text{ kg/m}^3$

Masse volumique de la matrice époxyde : $\rho_e = 1200 \text{ kg/m}^3$

La loi de variation de la masse volumique du matériau composite unidirectionnel en fonction de la fraction volumique du renfort carbone HM s'écrit :

$$\rho_{c(ecHM)} = 750 \cdot \Phi_{cHM} + 1200 \quad (21)$$

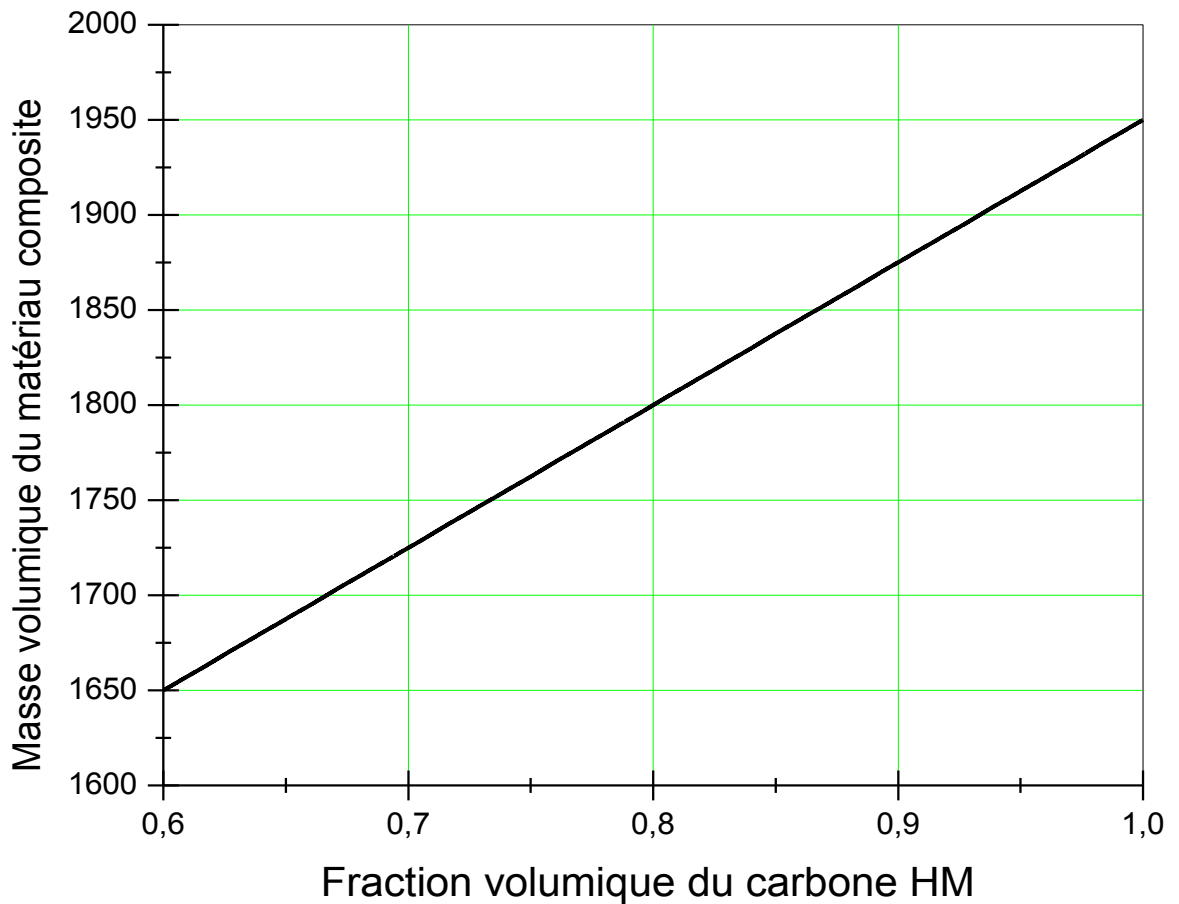


Figure 12: variation de la masse volumique du composite époxyde/carbone HM en fonction de la fraction volumique du carbone HM

La figure 12 représente la variation de la masse volumique du matériau composite époxyde/carbone HM en fonction de la fraction volumique du carbone HM.

Nous constatons, que l'augmentation de la fraction volumique du renfort carbone HM induit une augmentation de la masse volumique du matériau composite époxyde/carbone HM.

Cette figure montre que la masse volumique du matériau composite époxyde/carbone HM varie entre $\rho_{c(ecHM)} = 1650 \text{ kg/m}^3$ et $\rho_{c(ecHM)} = 1950 \text{ kg/m}^3$ quand la fraction volumique du verre HM passe de 0,6 à 1.

5.1.4. Cas du matériau composite époxyde/carbone HR

Pour déterminer la masse volumique théorique du matériau composite époxyde/carbone HR nous utilisons la loi des mélanges suivante :

$$\rho_{c(ecHR)} = \rho_{cHR} \cdot \Phi_{cHR} + \rho_e \cdot (1 - \Phi_{cHR}) \quad (22)$$

$\rho_{c(ecHR)}$: Masse volumique du matériau composite époxyde/carbone HR

ρ_e : Masse volumique de la matrice polymère époxyde

Φ_{cHR} : Fraction volumique du renfort carbone HR

ρ_{cHR} : Masse volumique du renfort carbone HR

Pour déterminer la masse volumique du matériau composite unidirectionnel époxyde/carbone HR, Nous avons retenu les données suivantes :

Masse volumique du renfort carbone HR : $\rho_{cHR} = 1750 \text{ kg/m}^3$

Masse volumique de la matrice polymère époxyde : $\rho_e = 1200 \text{ kg/m}^3$

Nous obtenons la loi de variation de la masse volumique du matériau composite unidirectionnel en fonction de la fraction volumique du carbone HR suivante :

$$\rho_{c(ecHR)} = 550 \cdot \Phi_{cHR} + 1200 \quad (23)$$

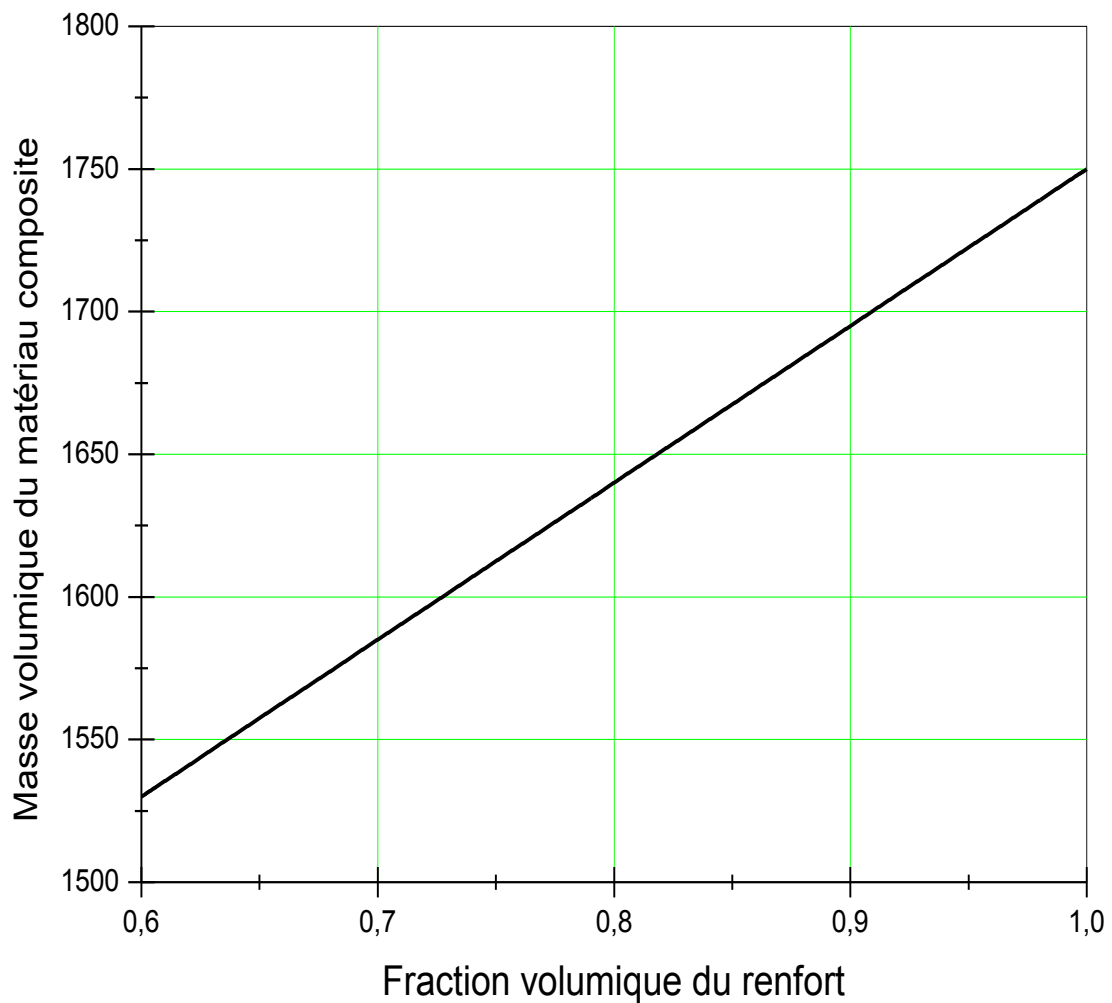


Figure 13 : variation de la masse volumique de l'époxyde/carbone HR en fonction de la fraction volumique du carbone HR

La figure 13 représente la variation de la masse volumique du matériau composite époxyde/carbone HR en fonction de la fraction volumique du carbone HR.

Nous constatons, que l'augmentation de la fraction volumique du renfort carbone HR provoque une augmentation de la masse volumique du matériau composite époxyde/carbone HR.

Sur cette figure on constate que la masse volumique du matériau composite époxyde/carbone HR varie entre $\rho_{c(ecHR)} = 1530 \text{ kg/m}^3$ et $\rho_{c(ecHR)} = 1750 \text{ kg/m}^3$ quand la fraction volumique du verre HR passe de 0.6 à 1.

5.1.5. Etude comparative des masses volumiques

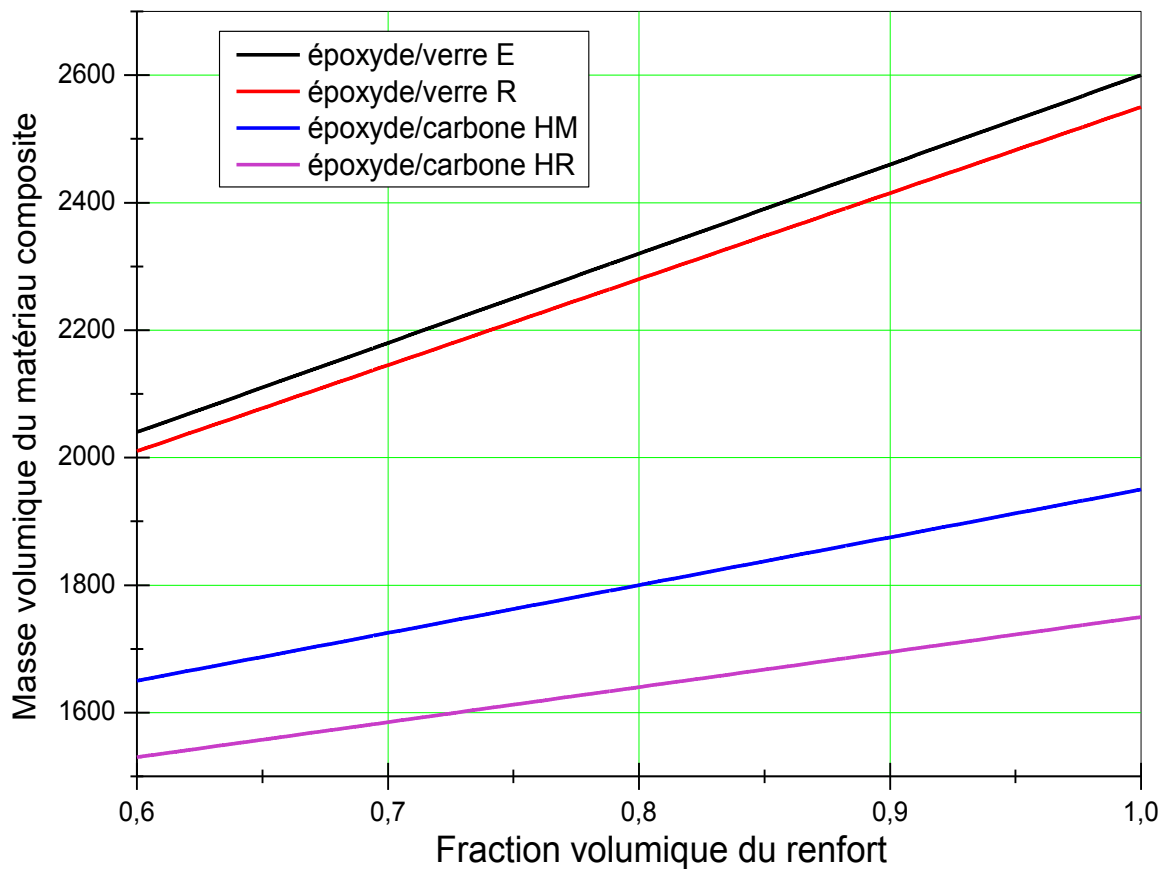
Pour comparer les variations des masse volumiques des matériaux composites : époxyde/verre E et époxyde/verre R, époxyde/carbone HM et époxyde/carbone HR en fonction de la fraction volumique du renfort, nous nous appuyons sur les lois de variation établies précédemment:

$$\rho_{c(evE)} = 1400 \cdot \Phi_{vR} + 1200 \quad (24)$$

$$\rho_{c(evR)} = 1350 \cdot \Phi_{vR} + 1200 \quad (25)$$

$$\rho_{c(ecHM)} = 750 \cdot \Phi_{cHM} + 1200 \quad (26)$$

$$\rho_{c(ecHR)} = 550 \cdot \Phi_{cHR} + 1200 \quad (27)$$



**Figure 14 : variation des masses volumiques des matériaux composites :
époxyde/verre E, époxyde/verre R, époxyde/carbone HM époxyde/carbone HR
en fonction de la fraction volumique du renfort**

La figure 14 représente les variations des masses volumiques des matériaux composites époxyde/verre E, époxyde/verre R, époxyde/carbone HM et époxyde/carbone HR en fonction de la fraction volumique du renfort.

Comme rapporté précédemment, nous remarquons que l'augmentation de la fraction volumique du renfort provoque une augmentation des masses volumiques des matériaux composites époxyde/verre E, époxyde/verre R, époxyde/carbone HR et époxyde/carbone HM.

L'examen de cette figure montre que les masses volumiques des composites à base de verre E et R croient plus rapidement que celles que des composites à base carbone HM et HR. Ceci est dû au fait que les masses volumiques, des verres E et R, soient supérieures à celles des carbones HM et HR.

5.2 Influence de la nature du renfort et de sa fraction volumique sur la porosité et la qualité des matériaux composites : époxyde/verre E, époxyde/verre R, époxyde/carbone HM et époxyde/carbone HR.

5.2.1 Cas du matériau composite époxyde/verre E

Pour déterminer la porosité du matériau composite époxyde/verre E nous utilisons la loi de variation de la fraction de porosité du matériau composite époxyde/verre E en fonction de la fraction volumique du verre E .

$$\Phi_{p(evE)} = \frac{\rho_{vE} \cdot \Phi_{vE} + \rho_e \cdot (1 - \Phi_{vE}) - \rho_{ex(evE)}}{\rho_{vE} \cdot \Phi_{vE} + \rho_e \cdot (1 - \Phi_{vE})} \quad (28)$$

Avec :

$\Phi_{p(evE)}$: La fraction de porosité de matériau composite époxyde/verre E.

ρ_{vE} : Masse volumique du renfort verre E.

$\rho_{ex(evE)}$: Masse volumique mesurée expérimentalement de l'époxyde/verre E.

Φ_{vE} : Fraction volumique du renfort verre E.

Nous avons retenu les données suivantes :

Masse volumique du renfort verre E : $\rho_{vE} = 2600 \text{ kg/m}^3$.

Masse volumique de la matrice époxyde : $\rho_e = 1200 \text{ kg/m}^3$.

Masse volumique mesurée expérimentalement du composite époxyde/verre E : $\rho_{ex(evE)} = 2040 \text{ kg/m}^3$.

La loi de variation de la porosité du matériau composite époxyde/verre E en fonction de la fraction volumique du renfort, est donnée par la relation suivante :

$$\Phi_{p(evE)} = \frac{1400 \cdot \Phi_{vE} - 840}{1200 + 1400 \cdot \Phi_{vE}} \quad (29)$$

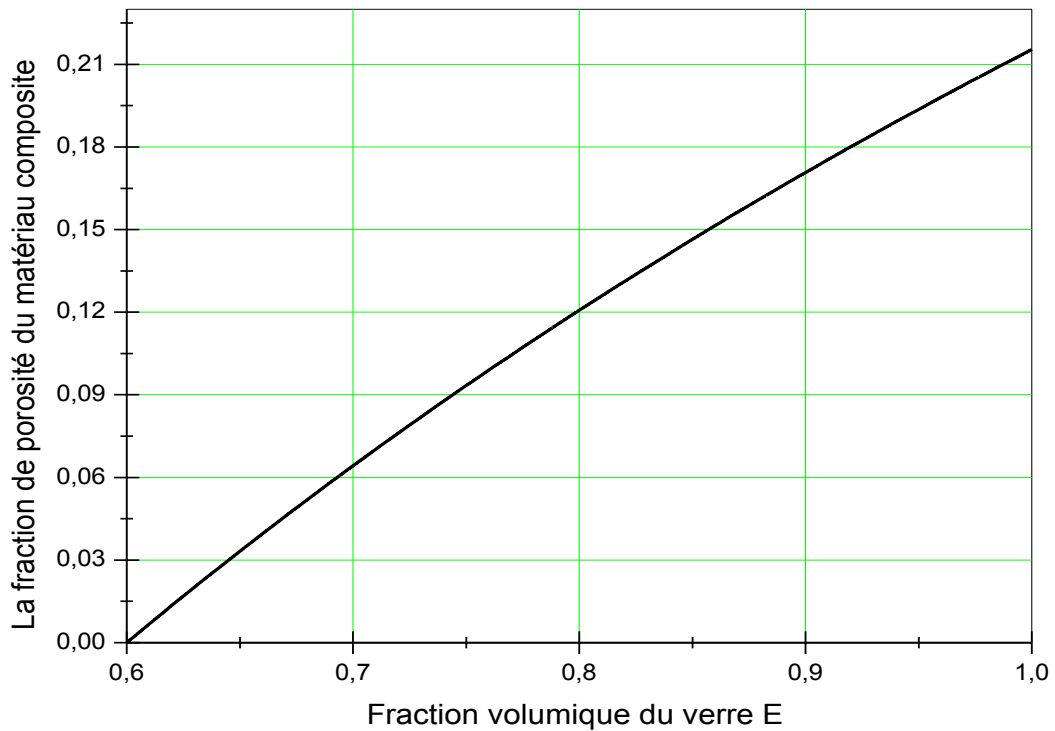


Figure 15 : variation de la porosité du composite l'époxyde/verre E fonction de la fraction volumique du renfort verre E

La figure 15 représente la variation de la porosité du matériau composite époxyde/verre E en fonction de la fraction volumique du renfort verre E

Cette figure montre que lorsque la fraction volumique du renfort verre E augmente la porosité du matériau composite époxyde/verre E croît.

Le choix de l'intervalle de variation de la fraction volumique $[0,6, 1]$ a été dicté par le fait que la porosité du matériau composite époxyde/verre s'annule pour $\Phi_{VE}=0,6$ et est maximale pour $\Phi_{VE}=1$.

Cet intervalle de variation de la fraction volumique du renfort nous permet de préciser les différentes qualités de ce matériau composite.

En effet, en vertu des critères de qualité adoptés dans la littérature scientifique spécialisée :

Pour $0,60 \leq \Phi_{VE} \leq 0,62$, l'époxyde/verre E a une porosité $0 \leq \Phi_P \leq 0,013$ et sera de bonne qualité.

Pour $0,62 \leq \Phi_{VE} \leq 0,68$, l'époxyde/verre E a une porosité $0,013 \leq \Phi_P \leq 0,052$ et sera de qualité médiocre.

Pour $0,68 \leq \Phi_{VE} \leq 1,00$, l'époxyde/verre E a une porosité $0,052 \leq \Phi_P \leq 0,215$ et sera de mauvaise qualité.

5.2.2 Cas du matériau composite époxyde/verre R

Pour déterminer la porosité du composite unidirectionnel époxyde/verre R nous utilisons la loi de variation de la porosité du matériau composite époxyde/verre R en fonction de la fraction volumique du verre R

$$\Phi_{p(evR)} = \frac{\rho_{vR} \cdot \Phi_{vR} + \rho_e \cdot (1 - \Phi_{vR}) - \rho_{ex(evR)}}{\rho_{vR} \cdot \Phi_{vR} + \rho_e \cdot (1 - \Phi_{vR})} \quad (30)$$

Avec :

$\Phi_{p(evR)}$: Fraction de porosité du composite époxyde/verre R

ρ_{vR} : Masse volumique du renfort verre R

$\rho_{ex(evR)}$: Masse volumique mesurée expérimentalement du matériau composite époxyde/verre R.

ρ_e : Masse volumique de la matrice époxyde.

Φ_{vR} : La fraction volumique du renfort verre R.

Nous avons retenu les données suivantes :

Masse volumique du renfort verre R : $\rho_{vR} = 2550 \text{ kg/m}^3$

Masse volumique de la matrice époxyde : $\rho_e = 1200 \text{ kg/m}^3$

La masse volumique mesurée expérimentalement du matériau composite époxyde/verre R est $\rho_{ex(evR)} = 2010 \text{ kg/m}^3$

La loi de variation de la porosité du matériau composite époxyde/verre R en fonction de la fraction volumique du renfort, est donnée par la relation suivante :

$$\Phi_{p(evR)} = \frac{1350 \cdot \Phi_{vR} - 810}{1200 + 1350 \cdot \Phi_{vR}} \quad (31)$$

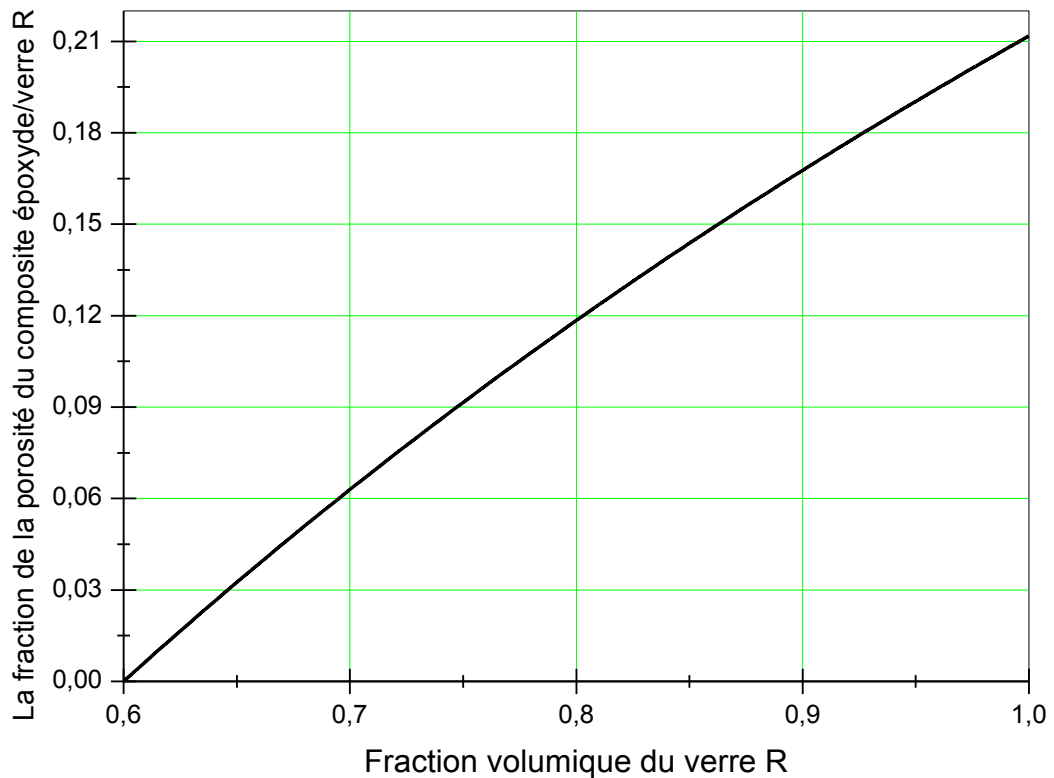


Figure 16 : variation de la porosité de matériau composite époxyde/verre R en fonction de la fraction volumique du verre R

La figure 16 représente la variation de la fraction de porosité du composite époxyde/verre R en fonction de la fraction volumique du renfort verre R.

Nous constatons également que lorsque la fraction volumique du renfort augmente la porosité du matériau composite croît.

En effet, en vertu des critères de qualité adoptés dans la littérature scientifique spécialisée :

Pour **$0.60 \leq \Phi_{VR} \leq 0.62$** , l'époxyde/verre R a une porosité **$0 \leq \Phi_P \leq 0.013$** et sera de bonne qualité.

Pour **$0.62 \leq \Phi_{VR} \leq 0.68$** , l'époxyde/verre R a une porosité **$0.013 \leq \Phi_P \leq 0.050$** et sera de qualité médiocre.

Pour **$0.68 \leq \Phi_{VR} \leq 1.00$** , l'époxyde/verre R a une porosité **$0.050 \leq \Phi_P \leq 0.211$** et sera de mauvaise qualité.

5.2.3 Cas du composite époxyde/carbone HM

Pour déterminer la porosité du composite unidirectionnel époxyde/carbone HM nous utilisons la loi de variation de la porosité du matériau composite époxyde/carbone HM en fonction de la fraction volumique du carbone HM .

$$\Phi_{p(ecHM)} = \frac{\rho_{cHM} \cdot \Phi_{cHM} + \rho_e \cdot (1 - \Phi_{cHM}) - \rho_{ex(ecHM)}}{\rho_{cHM} \cdot \Phi_{cHM} + \rho_e \cdot (1 - \Phi_{cHM})} \quad (32)$$

Avec :

$\Phi_{p(ecHM)}$: La porosité du matériau composite époxyde/carbone HM

ρ_{cHM} : Masse volumique du renfort carbone HM

$\rho_{ex(ecHM)}$: Masse volumique mesurée expérimentalement d'époxyde/carbone HM

Φ_{cHM} : La fraction volumique du renfort carbone HM

Nous avons retenu les données suivantes :

La masse volumique du renfort carbone HM $\rho_{cHM} = 1950 \text{ kg/m}^3$

La masse volumique de la matrice époxyde $\rho_e = 1200 \text{ kg/m}^3$

La masse volumique mesurée expérimentalement du matériau composite époxyde/carbone HM est $\rho_{ex(ecHM)} = 1650 \text{ kg/m}^3$

La loi de variation de la porosité du composite époxyde/carbone HM en fonction de la fraction volumique du renfort carbone HM, s'écrit:

$$\Phi_{p(ecHM)} = \frac{750 \cdot \Phi_{cHM} - 450}{1200 + 750 \cdot \Phi_{cHM}} \quad (33)$$

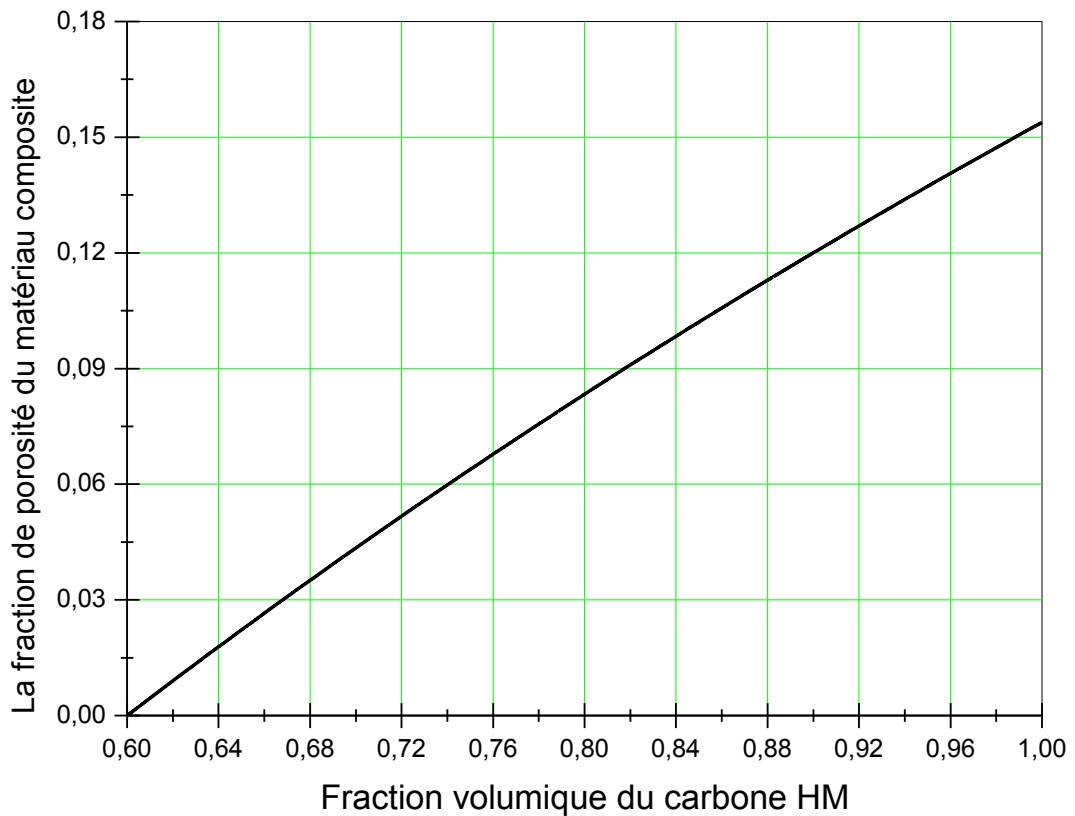


Figure 17 : variation de la porosité du composite l'époxyde/carbone HM en fonction de la fraction volumique du carbone HM

La figure 17 représente la variation de la porosité du matériau composite époxyde/carbone HM en fonction de la fraction volumique du carbone HM

Comme attendue, l'augmentation de la fraction volumique du renfort carbone HM provoque une augmentation de la porosité du matériau composite époxyde/carbone HM.

En vertu des critères de qualité rapportés dans la littérature scientifique spécialisée :

Pour **$0.60 \leq \Phi_{\text{cHM}} \leq 0.64$** , l'époxyde/carbone HM a une fraction de porosité **$0 \leq \Phi_{\text{p}} \leq 0.017$** et sera de bonne qualité.

Pour **$0.64 \leq \Phi_{\text{cHM}} \leq 0.72$** , l'époxyde/carbone HM a une fraction de porosité **$0.017 \leq \Phi_{\text{p}} \leq 0.051$** et sera de qualité médiocre.

Pour **$0.72 \leq \Phi_{\text{cHM}} \leq 1.00$** , l'époxyde/carbone a une fraction de porosité **$0.051 \leq \Phi_{\text{p}} \leq 0.153$** et sera de mauvaise qualité.

5.2.4 Cas du composite époxyde/carbone HR

Pour déterminer la porosité du matériau composite unidirectionnel époxyde/carbone HR nous utilisons la loi de variation de la fraction de porosité du matériau composite époxyde/carbone HR en fonction de la fraction volumique du renfort

$$\Phi_{p(ecHR)} = \frac{\rho_{cHR} \cdot \Phi_{cHR} + \rho_e \cdot (1 - \Phi_{cHR}) - \rho_{ex(ecHR)}}{\rho_{cHR} \cdot \Phi_{cHR} + \rho_e \cdot (1 - \Phi_{cHR})} \quad (34)$$

Avec :

$\Phi_{p(ecHR)}$: La porosité du matériau composite époxyde/carbone HR.

ρ_{cHR} : Masse volumique du carbone HR

$\rho_{ex(ecHR)}$: Masse volumique expérimentalement d'époxyde/carbone HR

Φ_{cHR} : La fraction volumique du carbone HR

Nous avons retenu les données suivantes :

Masse volumique du renfort carbone HR : $\rho_{cHR} = 1750 \text{ kg/m}^3$

Masse volumique de la matrice époxyde : $\rho_e = 1200 \text{ kg/m}^3$

La masse volumique mesurée expérimentalement du matériau composite époxyde/carbone HR est $\rho_{ex(ecHR)} = 1550 \text{ kg/m}^3$

La loi de variation de la porosité du composite époxyde/carbone HR en fonction de la fraction volumique du renfort s'écrit comme suit :

$$\Phi_{p(ecHR)} = \frac{550 \cdot \Phi_{cHR} - 350}{1200 + 550 \cdot \Phi_{cHR}} \quad (35)$$

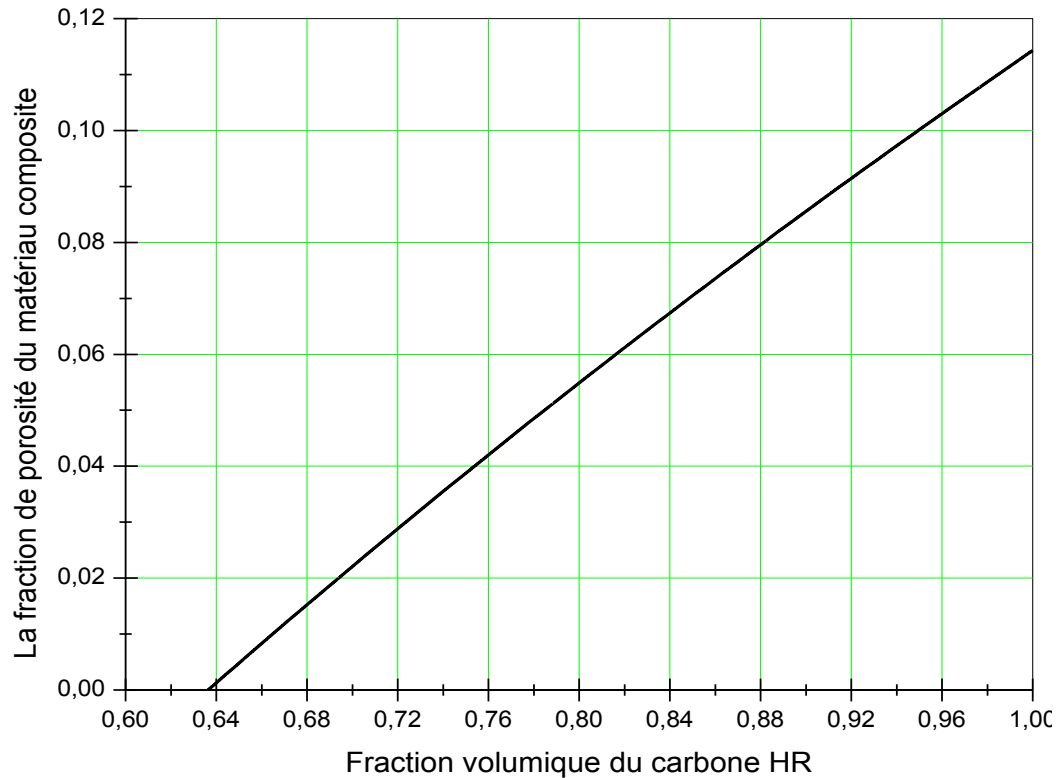


Figure 18 : variation de la porosité du composite l'époxyde/carbone HR en fonction de la fraction volumique du carbone HR

La figure 18 représente la variation de la porosité du matériau composite époxyde/carbone HR en fonction de la fraction volumique du carbone HR

Cette figure montre que lorsque la fraction volumique du carbone HR augmente la porosité du matériau composite époxyde/carbone HR croît.

En vertu des critères de qualité rapportés dans la littérature scientifique spécialisée :

Pour **$0.60 \leq \Phi_{cHR} \leq 0.68$** , l'époxyde/carbone HR a une fraction de porosité **$0 \leq \Phi_P \leq 0.018$** et sera de bonne qualité.

Pour **$0.68 \leq \Phi_{cHR} \leq 0.80$** , l'époxyde/carbone HR a une fraction de porosité **$0.018 \leq \Phi_P \leq 0.058$** et sera de qualité médiocre.

Pour **$0.80 \leq \Phi_{cHR} \leq 1.00$** , l'époxyde/carbone HR a une fraction de porosité **$0.058 \leq \Phi_P \leq 0.114$** et sera de mauvaise qualité.

5.2.5 Etude comparative des porosités

Pour comparer les variations de la fraction de porosité des matériaux composites époxyde/verre E et époxyde/verre R, époxyde/carbone HM et époxyde/carbone HR nous utilisons les lois de variation obtenues précédemment :

$$\Phi_{p(evE)} = \frac{1400 \cdot \Phi_{vE} - 840}{1200 + 1400 \cdot \Phi_{vE}} \quad (36)$$

$$\Phi_{p(evR)} = \frac{1350 \cdot \Phi_{vR} - 810}{1200 + 1350 \cdot \Phi_{vR}} \quad (37)$$

$$\Phi_{p(ecHM)} = \frac{750 \cdot \Phi_{cHM} - 450}{1200 + 750 \cdot \Phi_{cHM}} \quad (38)$$

$$\Phi_{p(ecHR)} = \frac{550 \cdot \Phi_{cHR} - 350}{1200 + 550 \cdot \Phi_{cHR}} \quad (39)$$

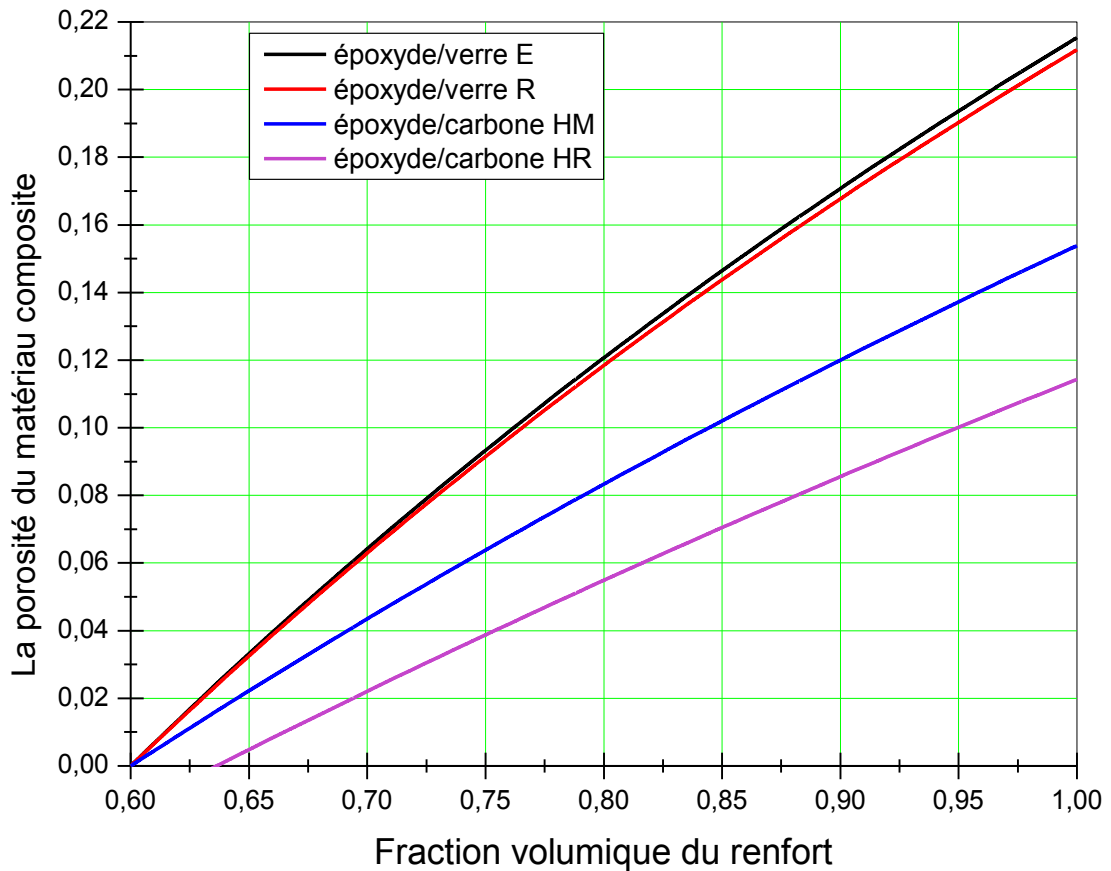


Figure 19 : variation de la porosité des matériaux composite : époxyde/verre E, époxyde/verre R, époxyde/carbone HM et époxyde/carbone HR en fonction de la fraction volumique du renfort.

La figure 19 représente les variations des porosités des quatre composites époxyde/verre E, époxyde/verre R, époxyde/carbone HM et époxyde/carbone HR en fonction de la fraction volumique de leurs matériaux de renfort.

L'examen de cette figure montre que les porosités des matériaux composites époxyde/verre E, époxyde/verre R, époxyde/carbone HM et époxyde/carbone HR croient avec l'augmentation de la fraction volumique du renfort.

Dans cette étude, nous avons conservé la même matrice en résine époxyde et considéré des matériaux de renfort de nature et de masse volumique différentes. Nous constatons que la porosité de chaque matériau composite croît avec la masse volumique de son matériau de renfort.

En effet, les résultats obtenus révèlent un certain ordre dans la croissance des porosités. Cet ordre semble directement lié à l'importance des masses volumiques des renforts. En d'autres termes, nous constatons qu'une masse volumique du renfort importante induit une porosité du matériau composite importante.

C'est ce qui explique sur la figure 19 les positions adoptées par les courbes de variation $\Phi_p = f(\Phi_f)$:

Porosité de l'époxyde/verre E ($\rho_{vE}=2600 \text{ kg/m}^3$) > Porosité de l'époxyde/verre R ($\rho_{vR} = 2550 \text{ kg/m}^3$) > Porosité de l'époxyde/carbone HM ($\rho_{cHM} = 1950 \text{ kg/m}^3$) > Porosité de l'époxyde/carbone HR ($\rho_{cHR} = 1750 \text{ kg/m}^3$).

5.3 Effets de la nature du matériau du renfort et de sa fraction volumique sur les modules de Young longitudinal et spécifique des matériaux composites époxyde/verre E, époxyde/verre R, époxyde/carbone HR et époxyde/carbone HM.

• Précision nécessaire

Comme rapporté, précédemment, dans le chapitre des concepts généraux le module de Young longitudinal des matériaux composites unidirectionnels étudiés est déterminé dans un essai de traction longitudinale.

Pour la modélisation et le calcul du module de Young longitudinal, nous avons adopté l'hypothèse simplificatrice de Jean Marie Berthelot [2] qui consiste à supposer une déformation uniforme et identique dans la fibre, dans la matrice et dans la cellule du matériau composite unidirectionnel.

5.3.1 Cas du matériau composite époxyde/verre E

5.3.1.1 Module de Young longitudinal

Pour déterminer le module de Young longitudinal, nous utilisons la loi des mélanges.

$$E_{Lc} = E_f \cdot \Phi_f + E_m (1 - \Phi_f) \quad (40)$$

Où :

E_{Lc} : Module de Young du matériau composite.

E_f : Module de Young du renfort (fibre).

E_m : Module de Young de la matrice.

Φ_f : La fraction volumique du renfort.

Dans le cas du matériau composite époxyde/verre E, la relation (40) s'écrit :

$$E_{Lc(evE)} = E_{L(vE)} \cdot \Phi_{vE} + E_{Le} (1 - \Phi_{vE}) \quad (41)$$

Où :

$E_{Lc(evE)}$: Module de Young longitudinal du composite époxyde/verre E.

$E_{L(vE)}$: Module de Young longitudinal du renfort verre E.

E_{Le} : Module de Young de la matrice époxyde.

Φ_{vE} : La fraction volumique du renfort verre E.

Pour déterminer le module de Young longitudinal du matériau composite époxyde/verre E, nous avons retenu les données suivantes :

Renfort en verre E :

$$E_{L(vE)} : 73 \text{ GPa.}$$

Matrice en résine époxyde

$$E_{Le} : 3.45 \text{ GPa.}$$

Nous obtenons, alors, la loi de la variation du module de Young longitudinal de ce matériau composite unidirectionnel en fonction de la fraction de la fraction volumique du renfort verre E suivante :

$$E_{Lc(evE)} = 69.55 \cdot \Phi_{vE} + 3.45 \quad (42)$$

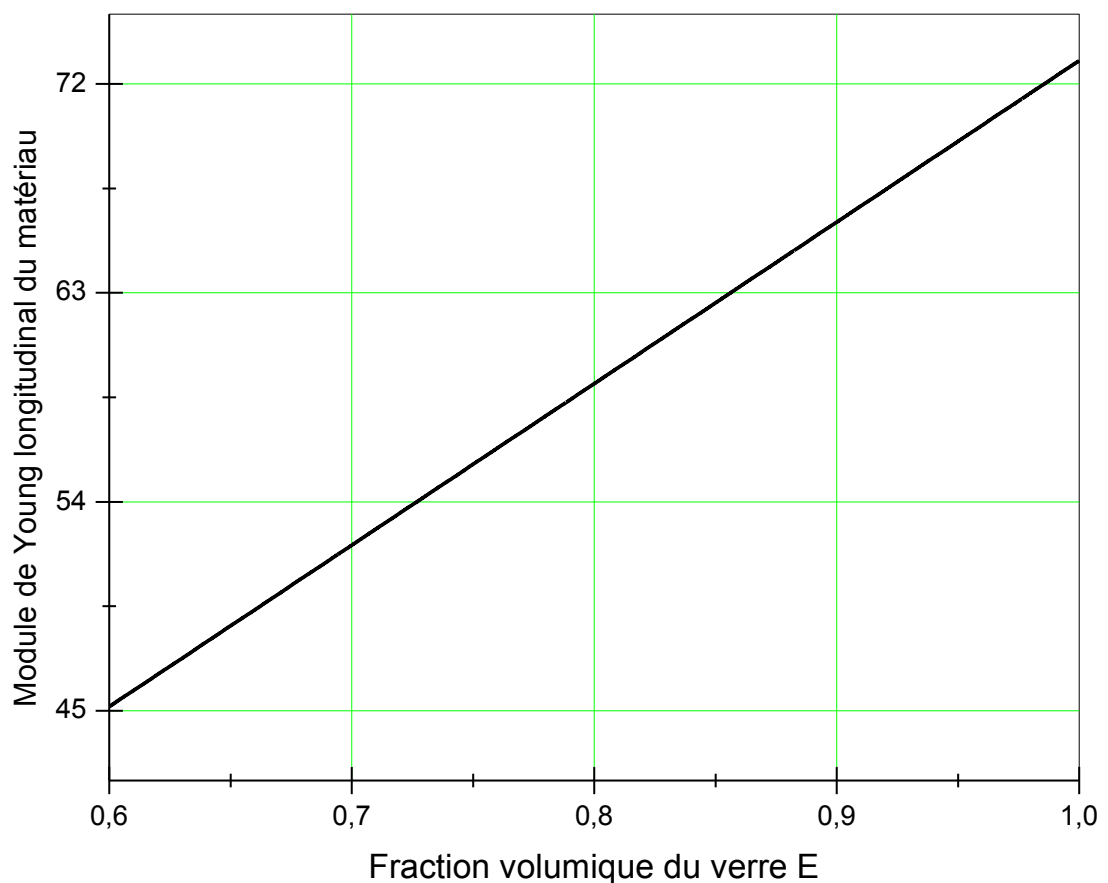


Figure 20 : variation de module de Young longitudinal de l'époxyde/verre E en fonction de la fraction volumique du renfort

La figure 20 représente la variation de module de Young longitudinal du matériau composite époxyde/verre E en fonction de la fraction volumique du matériau verre E de renfort.

La variation du module de Young longitudinal du matériau composite époxyde/verre E est linéaire entre les deux valeurs 45.18 GPa et 73 GPa quand la fraction volumique du renfort varie entre 0.6 et 1.

Comme attendue, le module de Young longitudinal du matériau composite époxyde/verre E croît avec l'augmentation de la fraction volumique du matériau de renfort.

5.3.1.2 Module de Young spécifique dans le cas d'une traction

Le module de Young longitudinal spécifique d'un matériau composite est le rapport du module de Young longitudinal du matériau composite à la masse volumique théorique ou calculée. L'expression du module de Young spécifique dans le cas d'une traction est donnée par :

$$E_{St} = \frac{E_{Lc}}{\rho_c} \quad (43)$$

E_{St} : Module de Young spécifique dans le cas d'une traction

E_{Lc} : Module de Young longitudinal du matériau composite

ρ_c : Masse volumique théorique du matériau composite

Pour déterminer le module de Young spécifique du matériau composite époxyde/verre E nous utilisons la loi de variation de module de Young spécifique du composite époxyde/verre E en fonction de la fraction volumique du renfort :

$$E_{St(evE)} = \frac{E_{Lc(evE)}}{\rho_{c(evE)}} \quad (44)$$

Avec :

$E_{St(evE)}$: Module de Young spécifique du composite époxyde/verre E

$E_{Lc(evE)}$: Module de Young longitudinal du composite époxyde/verre E.

$\rho_{c(evE)}$: Masse volumique du composite époxyde/verre E.

L'équation (44) s'écrit dans le cas du matériau composite unidirectionnel époxyde/verre E comme suit :

$$E_{St(evE)} = \frac{69.55 \cdot \Phi_{vE} + 3.45}{1200 + 1400 \cdot \Phi_{vE}} \quad (45)$$

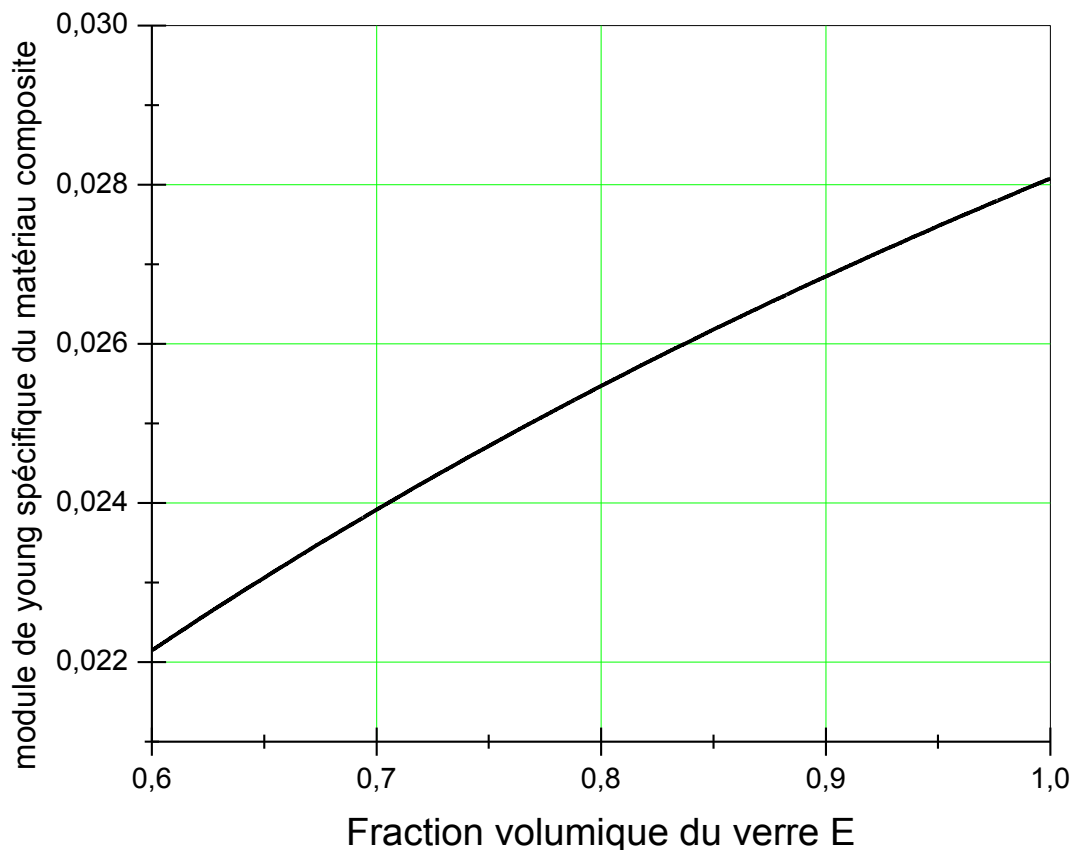


Figure 21 : variation de module de Young spécifique de l'époxyde/verre E en fonction de la fraction volumique du verre E

La figure 21 représente la variation du module de Young spécifique du matériau composite époxyde/verre E dans le cas d'une traction en fonction de la fraction volumique du matériau de renfort verre E.

Cette figure montre que l'augmentation de la fraction volumique induit une augmentation de module de Young spécifique du matériau composite époxyde/verre E.

La figure 21 révèle que, contrairement au cas du module de Young longitudinal (figure 20), la variation du module de Young spécifique n'est pas linéaire entre ses valeurs 0.0221 GPa et 0.0281 GPa correspondant, respectivement, aux fractions volumiques du renfort 0.6 et 1.

5.3.2 Cas du matériau composite époxyde/verre R

5.3.2.1 Module de Young longitudinal

Pour établir la loi de variation du module de Young longitudinal, nous nous appuyons sur la loi des mélanges :

$$E_{Lc(evR)} = E_{L(vR)} \cdot \Phi_{vR} + E_{Le} (1 - \Phi_{vR}) \quad (46)$$

Où :

$E_{Lc(evR)}$: Module de Young longitudinal du composite époxyde/verre R.

$E_{L(vR)}$: Module de Young longitudinal du renfort verre R.

E_{Le} : Module de Young de la matrice polymère époxyde.

Φ_{vR} : La fraction volumique du renfort verre R.

Pour déterminer le module de Young longitudinal du matériau composite unidirectionnel époxyde/verre R, nous avons retenu les données suivantes :

Module de Young longitudinal du renfort verre R :

$$E_{L(vR)} = 86 \text{ GPa}$$

Module de Young de la matrice polymère époxyde :

$$E_{Le} = 3.45 \text{ GPa}$$

Nous obtenons la loi de la variation du module de Young longitudinal du matériau composite unidirectionnel époxyde/verre R en fonction de la fraction de la fraction volumique du renfort verre R suivante :

$$E_{Lc(evR)} = 82.55 \cdot \Phi_{vR} + 3.45 \quad (47)$$

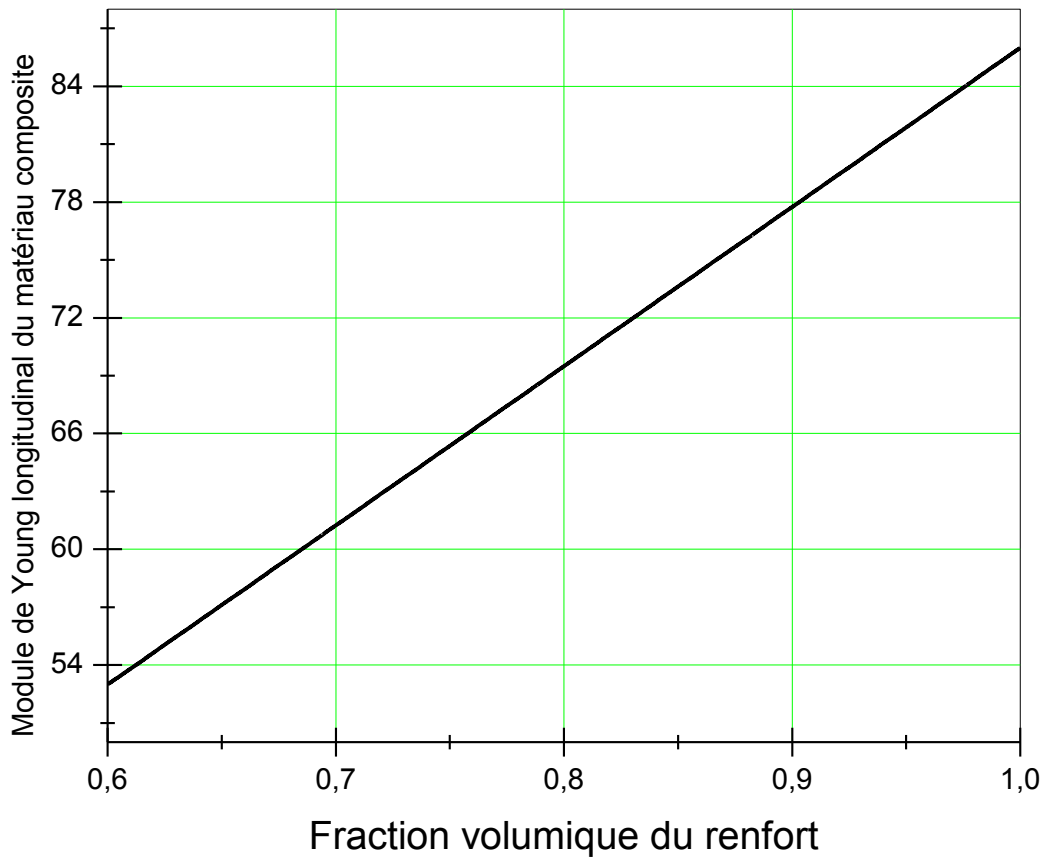


Figure 22 : variation de module de Young longitudinal d'époxyde/verre R par apport a la fraction volumique de verre R

La figure 22 illustre la variation du module de Young longitudinal du matériau composite époxyde/verre R en fonction de la fraction volumique du matériau de renfort.

L'examen de cette figure montre que module de Young longitudinal du matériau composite époxyde/verre R croît avec l'augmentation de la fraction volumique du renfort. Lorsque la fraction volumique du verre R varie entre 0.6 et 1, le module de Young longitudinal du matériau composite époxyde/verre R varie linéairement de 52.98 GPa à 86 GPa.

Comme attendue, le module de Young longitudinal du matériau composite époxyde/verre R croît avec l'augmentation de la fraction volumique du du renfort verre R.

5.3.2.2 Module de Young spécifique dans le cas d'une traction

Pour établir la loi de variation du module de Young spécifique du matériau composite unidirectionnel époxyde/verre R, chargé en traction, nous nous appuyons sur l'expression suivante :

$$E_{St(evR)} = \frac{E_{Lc(evR)}}{\rho_{c(evR)}} \quad (48)$$

Où :

$E_{St(evR)}$: Module de Young spécifique du composite époxyde/verre R dans le cas d'une traction

$E_{Lc(evR)}$: Module de Young longitudinal du matériau composite époxyde/verre R.

$\rho_{c(evR)}$: Masse volumique du composite époxyde/verre R.

L'équation (48) s'écrit, dans le cas du matériau composite époxyde/verre R, comme suit :

$$E_{St(evR)} = \frac{82.55 \cdot \Phi_{vR} + 3.45}{1200 + 1350 \cdot \Phi_{vR}} \quad (49)$$

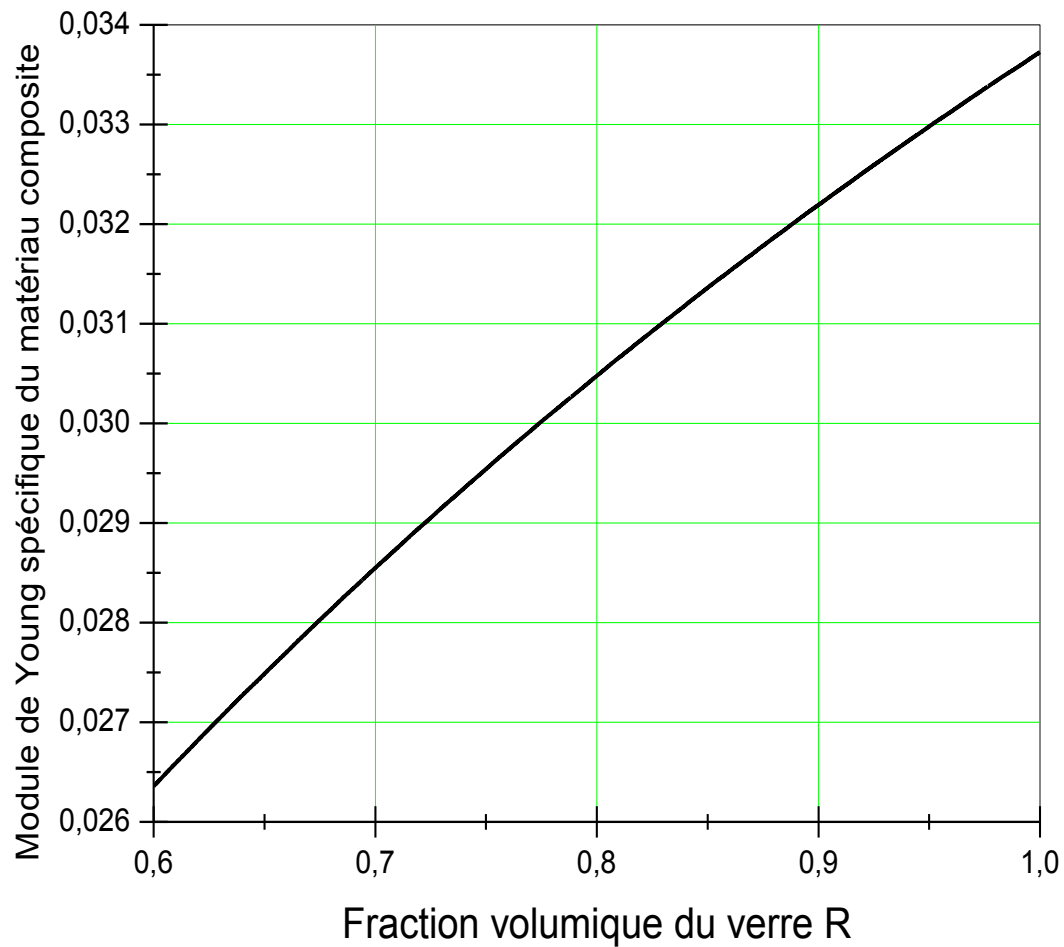


Figure 23 : variation de module de Young spécifique par rapport à la fraction volumique du verre R

La figure 23 représente la variation du module de Young spécifique du matériau composite époxyde/verre R en fonction de la fraction volumique du renfort verre R.

L'examen de cette figure montre que l'augmentation de la fraction volumique provoque une augmentation du module de Young spécifique du matériau composite époxyde/verre R

La figure 23 révèle que, contrairement au cas du module de Young longitudinal (figure 22), la variation du module de Young spécifique n'est pas linéaire entre ses valeurs 0.0263 GPa et 0.0337 GPa correspondant, respectivement, aux fractions volumiques du renfort 0.6 et 1.

5.3.3 Cas du matériau composite époxyde/carbone HM

5.3.3.1 Module de Young longitudinal

Pour établir la loi de variation du module de Young longitudinal du matériau composite époxyde/carbone HM en fonction de la fraction volumique du matériau de renfort, nous nous appuyons sur la loi des mélanges :

$$E_{Lc(ecHM)} = E_{L(cHM)} \cdot \Phi_{cHM} + E_{Le} (1 - \Phi_{cHM}) \quad (50)$$

Avec :

$E_{Lc(ecHM)}$: Module de Young longitudinal du composite époxyde/carbone HM.

$E_{L(cHM)}$: Module de Young longitudinal du renfort carbone HM.

E_{Le} : Module de Young de la matrice en résine époxyde.

Φ_{cHM} : La fraction volumique du renfort carbone HM.

Pour déterminer le module de Young longitudinal du matériau composite unidirectionnel époxyde/carbone HM, nous avons retenu les données suivantes :

Module de Young longitudinal du renfort carbone HM

$$E_{L(cHM)} = 380 \text{ GPa}$$

Module de Young de la matrice polymère époxyde

$$E_{Le} = 3.45 \text{ GPa}$$

Nous obtenons, alors, la loi de la variation du module de Young longitudinal de ce matériau composite unidirectionnel en fonction de la fraction de la fraction volumique du renfort carbone HR suivante :

$$E_{Lc(ecHM)} = 376.55 \cdot \Phi_{cHM} + 3.45 \quad (51)$$

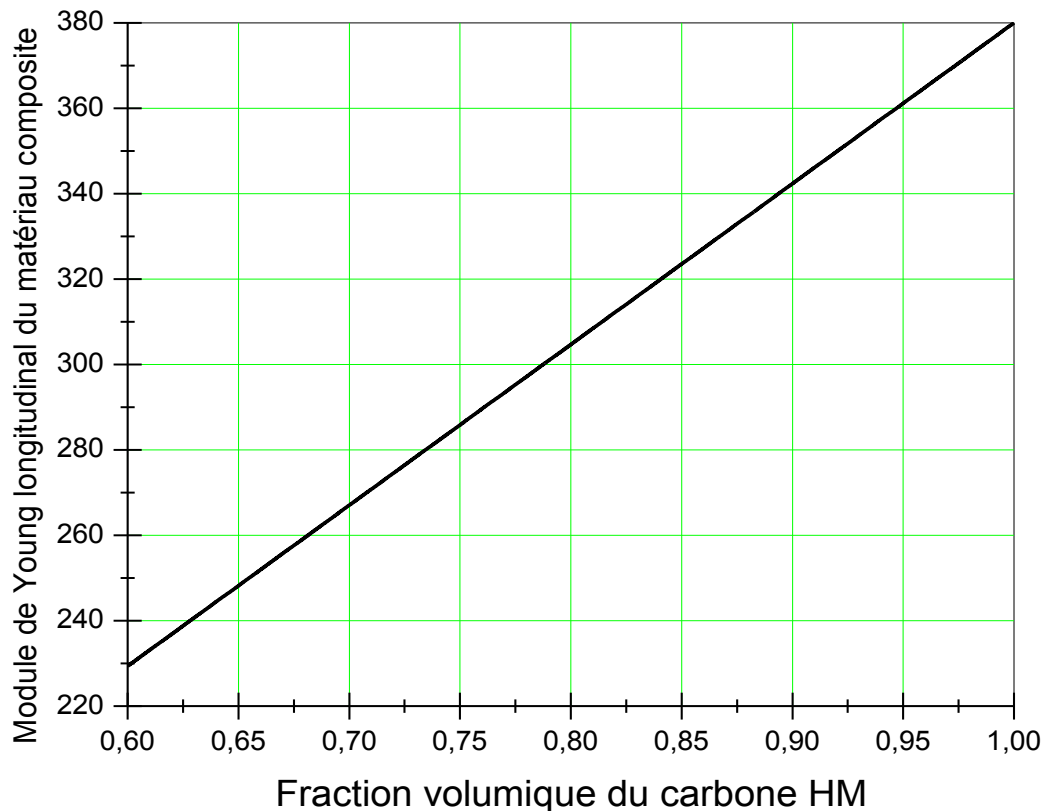


Figure 24 : variation de module de Young longitudinal de l'époxyde/carbone HM en fonction de la fraction volumique du matériau de renfort carbone HM

La figure 24 illustre la variation du module de Young longitudinal du matériau composite époxyde/carbone HM en fonction de la fraction volumique du matériau de renfort carbone HM.

L'examen de cette figure montre que module de Young longitudinal du matériau composite époxyde/carbone HM croît avec l'augmentation de la fraction volumique du renfort. Lorsque la fraction volumique du carbone HM varie entre 0.6 et 1, le module de Young longitudinal du matériau composite époxyde/carbone HM varie linéairement de 229.38 GPa à 380 GPa.

Comme attendue, le module de Young longitudinal du matériau composite époxyde/carbone croît avec l'augmentation de la fraction volumique du renfort carbone HM.

5.3.3.2 Module de Young spécifique dans le cas d'une traction

Pour établir la loi de variation du module de Young spécifique du matériau composite époxyde/carbone HM nous utilisons la relation de définition :

$$E_{St(ecHM)} = \frac{E_{Lc(ecHM)}}{\rho_{c(ecHM)}} \quad (52)$$

$E_{St(ecHM)}$: Module de Young spécifique du composite époxyde/carbone HM dans le cas d'une traction.

$E_{Lc(ecHM)}$: Module de Young longitudinal du composite époxyde/carbone HM

$\rho_{c(ecHM)}$: Masse volumique du matériau composite époxyde/carbone HM

L'équation (52) s'écrit dans le cas du matériau composite époxyde/carbone HM comme suit :

$$E_{St(ecHM)} = \frac{376.55 \cdot \Phi_{cHM} + 3.45}{1200 + 750 \cdot \Phi_{cHM}} \quad (53)$$

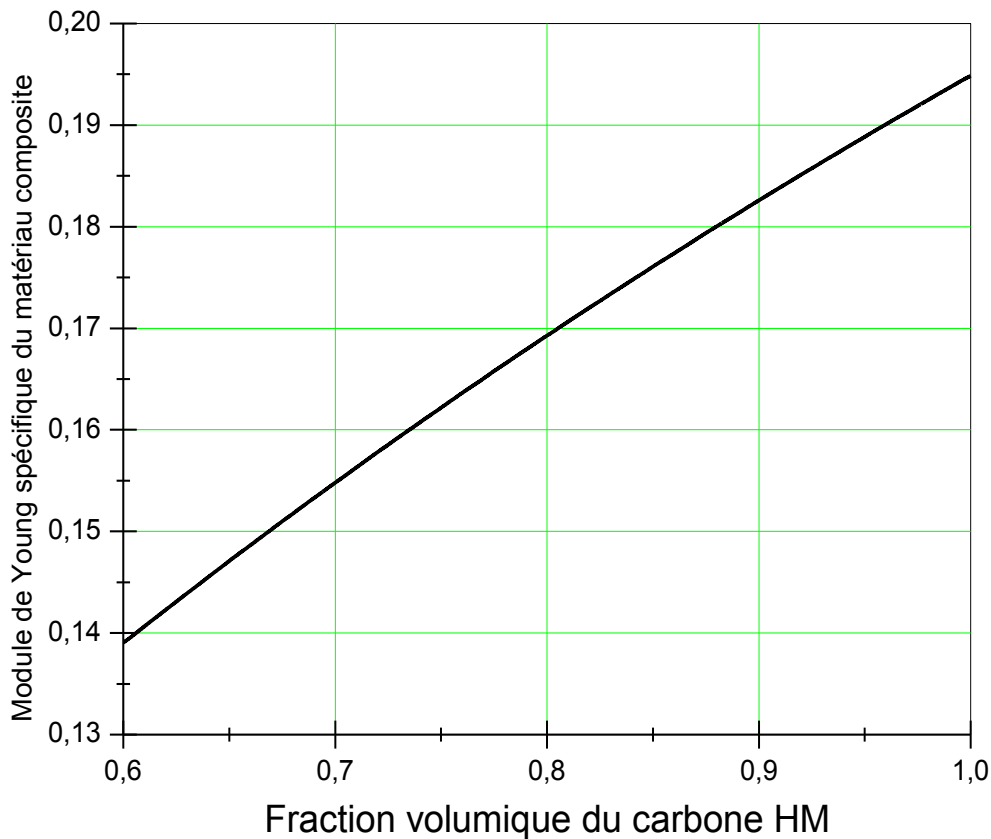


Figure 25 : variation de module de Young spécifique de l'époxyde/carbone HM en fonction de la fraction volumique du renfort

La figure 25 représente la variation du module de Young longitudinal spécifique du matériau composite époxyde/carbone HM en fonction de la fraction volumique du carbone HM.

Nous constatons, que l'augmentation de la fraction volumique provoque une augmentation de module de Young longitudinal spécifique du matériau composite époxyde/carbone HM.

D'autre part, le module de Young spécifique du matériau composite époxyde/carbone HM varie de façon non linéaire entre les valeurs 0.1390 GPa et 0.1949 GPa lorsque la fraction volumique du matériau de renfort carbone HM varie entre 0.6 et 1.

5.3.4 Cas du matériau composite époxyde/carbone HR

5.3.4.1 Module de Young longitudinal

Pour établir la loi de variation du module de Young longitudinal du matériau composite époxyde/carbone HR, nous utilisons, comme précédemment, la loi des mélanges :

$$E_{Lc(ecHR)} = E_{L(cHR)} \cdot \Phi_{cHR} + E_{Le} (1 - \Phi_{cHR}) \quad (54)$$

Où :

$E_{Lc(ecHR)}$: Module de Young longitudinal du composite époxyde/carbone HR.

$E_{L(cHR)}$: Module de Young longitudinal du renfort carbone HR.

E_{Le} : Module de Young longitudinal de la matrice en résine époxyde.

Φ_{cHR} : La fraction volumique du renfort carbone HR.

Pour ce faire, nous avons retenu les données suivantes :

Module de Young longitudinal du renfort carbone HR

$$E_{L(cHR)} = 260 \text{ GPa}$$

Module de Young de la matrice polymère époxyde

$$E_{Le} = 3.45 \text{ GPa}$$

Nous obtenons la loi de variation du module de Young longitudinal du matériau composite unidirectionnel en fonction de la fraction de la fraction volumique du renfort carbone HR suivante :

$$E_{Lc(ecHR)} = 256.55 \cdot \Phi_{cHR} + 3.45 \quad (55)$$

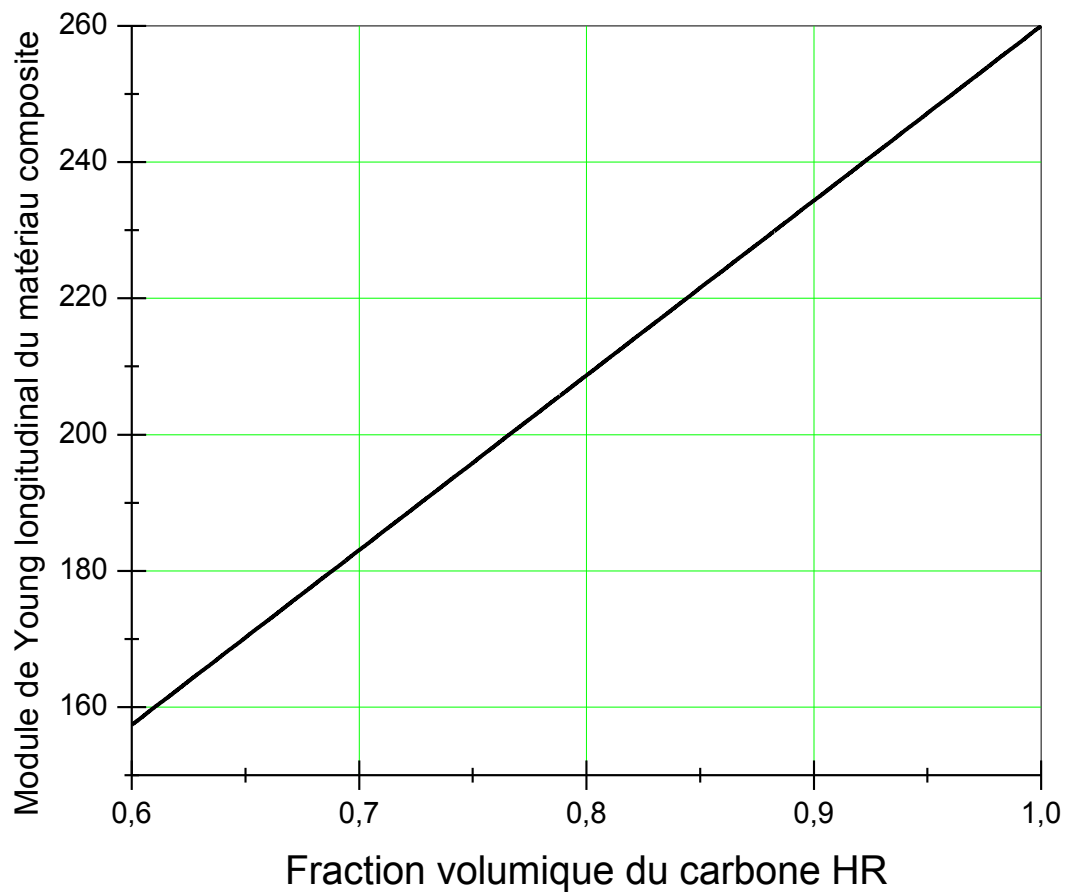


Figure 26: variation de module de Young longitudinal du l'époxyde/carbone HR par rapport à la fraction volumique du renfort

La figure 26 représente la variation de module de Young longitudinal $E_{Lc(ecHR)}$ en fonction de la Fraction volumique du carbone HR.

Nous remarquons que le module de Young longitudinal du matériau composite époxyde /carbone HR croît avec l'augmentation de la fraction volumique du renfort.

D'autre part, lorsque la fraction volumique du renfort varie entre les valeurs 0.6 et 1, le module de Young longitudinal du matériau composite époxyde/carbone HR varie de façon non linéaire entre les valeurs 157.38 GPa et 260 GPa.

5.3.4.2 Module de Young spécifique dans le cas d'une traction

Pour établir la loi de variation du module de Young longitudinal spécifique du matériau composite époxyde/carbone HR nous utilisons la relation de définition suivante :

$$\mathbf{E_{St(ecHR)}} = \frac{\mathbf{E_{Lc(ecHR)}}}{\mathbf{\rho_{c(ecHR)}}} \quad (56)$$

Où :

$\mathbf{E_{St(ecHR)}}$: Module de Young spécifique du composite époxyde/carbone HR dans le cas d'une traction.

$\mathbf{E_{Lc(ecHR)}}$: Module de Young longitudinal du composite époxyde/carbone HR

$\mathbf{\rho_{c(ecHR)}}$: Masse volumique du composite époxyde/carbone HR

L'équation (56) s'écrit dans le cas du matériau composite époxyde/carbone HM comme suit :

$$\mathbf{E_{St(ecHR)}} = \frac{\mathbf{256.55 \cdot \Phi_{cHR} + 3.45}}{\mathbf{1200 + 550 \cdot \Phi_{cHR}}} \quad (57)$$

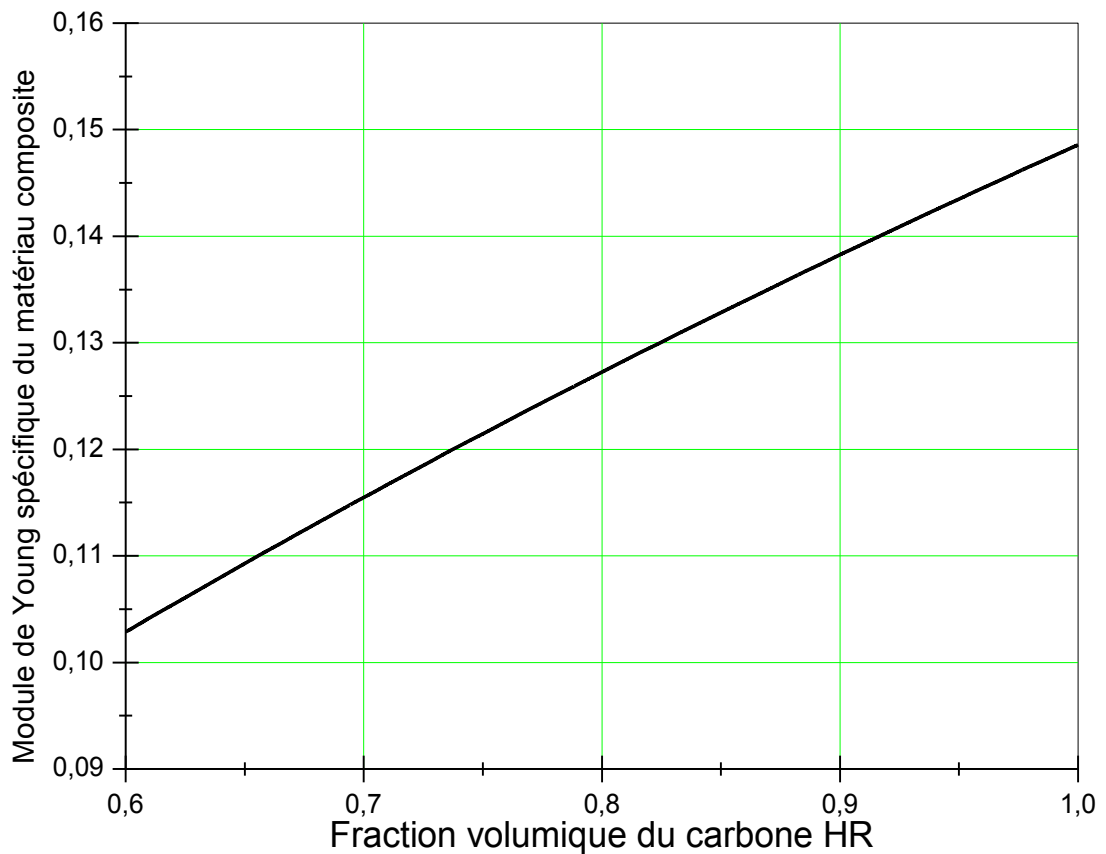


Figure 27 : variation de module de Young spécifique de l'époxyde/carbone HR en fonction de la fraction volumique du carbone HR

La figure 27 représente la variation du module de Young spécifique du matériau composite époxyde/carbone HR en fonction de la fraction volumique du renfort carbone HR.

L'examen de cette figure montre que l'augmentation de la fraction volumique provoque une augmentation du module de Young spécifique du matériau composite époxyde/carbone HR.

La figure 27 révèle, contrairement au cas du module de Young longitudinal (figure 26), que la variation du module de Young spécifique n'est pas linéaire entre ses valeurs extrêmes 0.1028 GPa et 0.1485 GPa correspondant, respectivement, aux fractions volumiques du renfort 0.6 et 1.

5.4 Etude comparative des modules de Young longitudinaux des composites époxyde/verre E, époxyde/verre R, époxyde/carbone HM et époxyde/carbone HR.

5.4.1. Modules de Young longitudinaux : étude comparative

Pour effectuer l'étude comparative des modules de Young longitudinaux des matériaux composites unidirectionnels époxyde/verre E, époxyde/verre R, époxyde/carbone HR et époxyde/carbone HM nous nous appuyons sur leurs lois de variation établies précédemment :

$$E_{LC(evE)} = 69.55 \cdot \Phi_{vE} + 3.45 \quad (58)$$

$$E_{LC(evR)} = 82.55 \cdot \Phi_{vR} + 3.45 \quad (59)$$

$$E_{LC(ecHM)} = 376.55 \cdot \Phi_{cHM} + 3.45 \quad (60)$$

$$E_{LC(ecHR)} = 256.55 \cdot \Phi_{cHR} + 3.45 \quad (61)$$

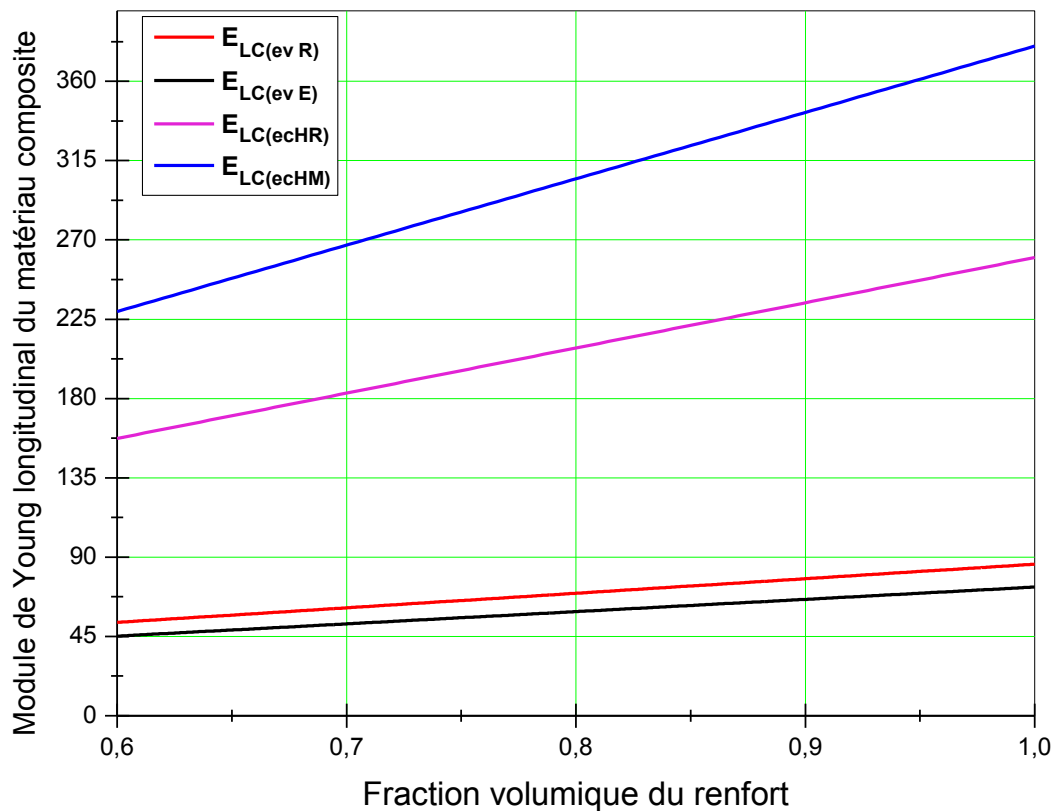


Figure 28 : variation de module de Young longitudinal du composite : époxyde/verre E, époxyde/verre R, époxyde/carbone HM et époxyde/carbone HR en fonction de la fraction volumique du renfort

La figure 28 représente les variations des modules de Young longitudinaux des quatre matériaux composites unidirectionnels époxyde/verre E, époxyde/verre R, époxyde/carbone HM et époxyde/carbone HR en fonction de la nature du matériau de renfort et de sa fraction volumique.

L'examen de cette figure montre que les modules de Young longitudinaux de des quatre matériaux composites époxyde/verre E, époxyde/verre R, époxyde/carbone HM et époxyde/carbone HR croient linéairement avec l'augmentation de la fraction volumique du renfort.

Dans cette étude, nous avons conservé la même matrice en résine époxyde et considéré des matériaux de renfort de nature et de modules de Young différents. Nous constatons, sur la figure 28, que le module de Young longitudinal de chaque matériau composite croît avec le module de Young de son matériau de renfort.

En effet, les résultats obtenus révèlent un certain ordre dans la croissance des modules de Young des matériaux composites étudiés. Cet ordre semble être directement lié à l'importance des modules de Young des renforts. En d'autres termes, nous constatons qu'un module de Young du renfort important induit un module de Young du matériau composite important.

C'est ce qui nous semble expliquer les positions adoptées, sur la figure, 28 par les courbes représentatives, des lois de variation $E_L = f(\Phi_f)$ des quatre matériaux composites unidirectionnels étudiés. En effet, nous avons pour chaque fraction volumique du matériau de renfort le classement, par ordre décroissant des modules longitudinaux de renfort, suivant :

Module longitudinal de l'époxyde/carbone HM ($E_{L(cHM)} = 380$ GPa) > Module longitudinal de l'époxyde/carbone HR ($E_{L(cHR)} = 260$ GPa) > Module longitudinal de l'époxyde/verre R ($E_{L(vR)} = 80$ GPa) > Module longitudinal de l'époxyde/verre E ($E_{L(vE)} = 73$ GPa).

5.5 Etude comparative des modules de Young spécifiques des composites époxyde/verre E, époxyde/verre R, époxyde/carbone HR et époxyde/carbone HM, chargés en traction.

5.5.1 Modules de Young spécifiques : étude comparative

Pour effectuer l'étude comparative des modules de Young spécifiques des matériaux composites unidirectionnels époxyde/verre E, époxyde/verre R, époxyde/carbone HR et époxyde/carbone HM nous nous appuyons sur leurs lois de variation établies précédemment :

$$E_{St(evE)} = \frac{69.55 \cdot \Phi_{vE} + 3.45}{1200 + 1400 \cdot \Phi_{vE}} \quad (62)$$

$$E_{St(evR)} = \frac{82.55 \cdot \Phi_{vR} + 3.45}{1200 + 1350 \cdot \Phi_{vR}} \quad (63)$$

$$E_{St(ecHM)} = \frac{376.55 \cdot \Phi_{cHM} + 3.45}{1200 + 750 \cdot \Phi_{cHM}} \quad (64)$$

$$E_{St(ecHR)} = \frac{256.55 \cdot \Phi_{cHR} + 3.45}{1200 + 550 \cdot \Phi_{cHR}} \quad (65)$$

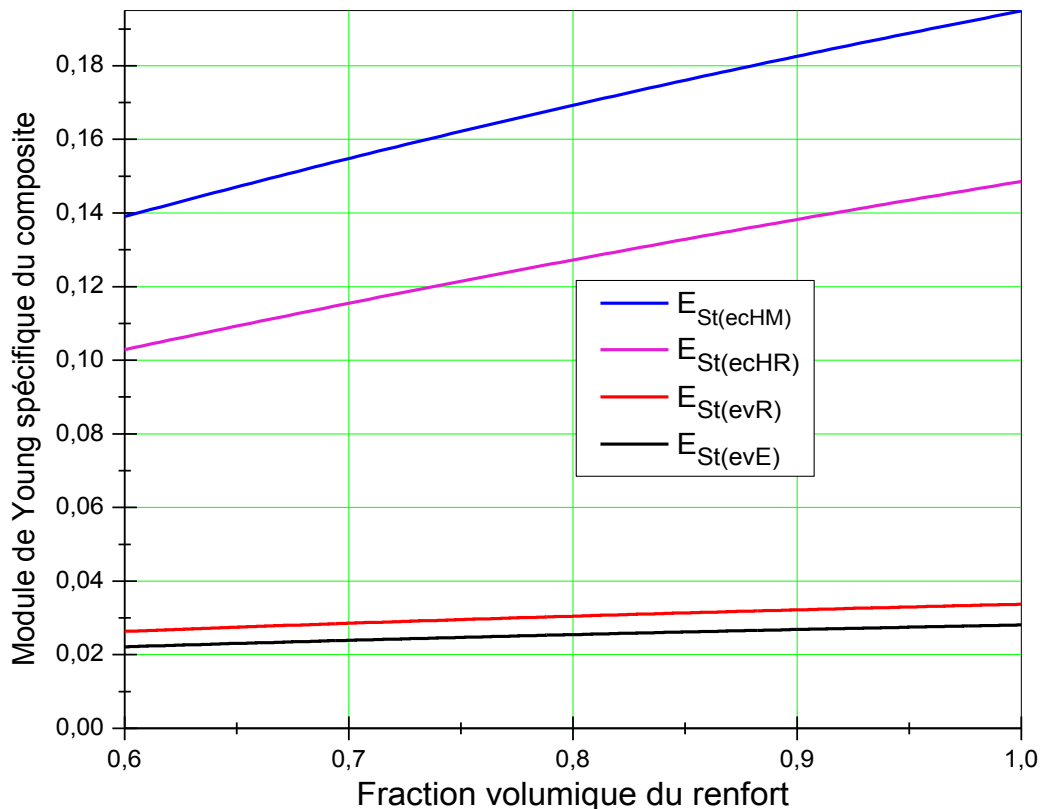


Figure 29 : variation de module de Young spécifique du composite : époxyde/verre E, époxyde/verre R, époxyde/carbone HM et époxyde/carbone HR, chargés en traction, en fonction de la fraction volumique du renfort

La figure 29 représente les variations des modules de Young spécifiques des matériaux composites unidirectionnels époxyde/verre E, époxyde/verre R, époxyde/carbone HM et époxyde/carbone HR, chargés en traction, en fonction de la nature du matériau de renfort et de sa fraction volumique.

L'examen de cette figure montre que les modules de Young spécifiques de des quatre matériaux composites époxyde/verre E, époxyde/verre R, époxyde/carbone HM et époxyde/carbone HR croient de façon non linéaire avec l'augmentation de la fraction volumique du renfort.

Dans cette étude, nous avons conservé la même matrice en résine époxyde et considéré des matériaux de renfort de nature et de modules de Young différents. Nous constatons, sur la figure 29, que le module de Young spécifique de chaque matériau composite croît avec le module de Young de son matériau de renfort.

En effet, les résultats obtenus révèlent un certain ordre dans la croissance des modules de Young des matériaux composites étudiés. Cet ordre semble directement lié à l'importance des modules de Young des renforts. En d'autres termes, nous constatons qu'un module de Young du renfort important induit un module de Young spécifique du matériau composite important.

C'est ce qui nous semble expliquer les positions adoptées, sur la figure 29, par les courbes représentatives, des lois de variation $E_{St}=f(\Phi_f)$ des quatre matériaux composites unidirectionnels étudiés. En effet, nous avons pour chaque fraction volumique du matériau de renfort le classement, par ordre décroissant des modules longitudinaux du renfort, suivant :

Module spécifique de l'époxyde/carbone HM ($E_{L(cHM)} = 380$ GPa) > Module spécifique de l'époxyde/carbone HR ($E_{L(cHR)} = 260$ GPa) > Module spécifique de l'époxyde/verre R ($E_{L(vR)} = 80$ GPa) > Module spécifique de l'époxyde/verre E ($E_{L(vE)} = 73$ GPa).

5.6 Etude comparative des modules de Young spécifiques des composites époxyde/verre E, époxyde/verre R, époxyde/carbone HR et époxyde/carbone HM, chargés en flexion.

5.6.1 Module de Young spécifique dans le cas d'une flexion

5.6.1.1 Cas du matériau composite époxyde/verre E

Pour établir la loi de variation du module de Young longitudinal spécifique du matériau composite époxyde/verre E chargé en flexion, nous utilisons l'expression de définition suivante :

$$E_{SF} = \frac{E_{Lc}}{(\rho_c)^2} \quad (66)$$

E_{SF} : Module de Young longitudinal spécifique dans le cas d'une flexion

E_{Lc} : Module de Young longitudinal du matériau composite

ρ_c : La masse volumique théorique du matériau composite

La loi de variation du module de Young spécifique du matériau composite époxyde/verre E, chargé en flexion, en fonction de la fraction volumique du renfort s'écrit :

$$E_{SF(evE)} = \frac{E_{Lc(evE)}}{(\rho_{c(evE)})^2} \quad (67)$$

Où :

$E_{SF(evE)}$: Module de Young spécifique du composite époxyde/verre E chargé en flexion simple.

$E_{Lc(evE)}$: Module de Young longitudinal du composite époxyde/verre E

$\rho_{c(evE)}$: Masse volumique du composite époxyde/verre E

En tenant compte des données retenues, l'expression (67) de la loi de variation du module de Young spécifique du composite époxyde/verre E, chargé en flexion simple, s'écrit alors :

$$E_{SF(evE)} = \frac{69.55 \cdot \Phi_{vE} + 3.45}{(1200 + 1400 \cdot \Phi_{vE})^2} \quad (68)$$

5.6.1.2 Cas du matériau composite époxyde/verre R

Pour établir la loi de variation du module de Young longitudinal spécifique du matériau composite époxyde/verre R chargé en flexion, nous utilisons la relation de définition suivante :

$$E_{SF(evR)} = \frac{E_{Lc(evR)}}{(\rho_{c(evR)})^2} \quad (69)$$

Où :

$E_{SF(evR)}$: Module de Young spécifique du composite époxyde/verre R, chargé en flexion.

$E_{Lc(evR)}$: Module de Young longitudinal du composite époxyde/verre R

$\rho_{c(evR)}$: Masse volumique du composite époxyde/verre R

En tenant compte des données retenues, l'expression (69) de la loi de variation du module de Young spécifique du composite époxyde/verre R, chargé en flexion simple, s'écrit alors :

$$E_{SF(evR)} = \frac{82.55 \cdot \Phi_{vR} + 3.45}{(1200 + 1350 \cdot \Phi_{vR})^2} \quad (70)$$

5.6.1.3 Cas du composite époxyde/carbone HM

Pour établir la loi de variation du module de Young spécifique du matériau composite époxyde/carbone HM chargé en flexion, nous utilisons la relation de définition suivante :

$$E_{SF(ecHM)} = \frac{E_{Lc(ecHM)}}{(\rho_{c(ecHM)})^2} \quad (71)$$

Où :

$E_{SF(ecHM)}$: Module de Young spécifique du composite époxyde/carbone HM chargé en flexion.

$E_{Lc(ecHM)}$: Module de Young longitudinal du composite époxyde/carbone HM

$\rho_{c(ecHM)}$: Masse volumique du composite époxyde/carbone HM

Compte tenu des données retenues, l'expression (71) de la loi de variation du module de Young spécifique du composite époxyde/carbone HM, chargé en flexion simple, s'écrit :

$$E_{SF(ecHM)} = \frac{376.55 \cdot \Phi_{cHM} + 3.45}{(1200 + 750 \cdot \Phi_{cHM})^2} \quad (72)$$

5.6.1.4 Cas du composite époxyde/carbone HR

Pour établir la loi de variation du module de Young spécifique du matériau composite époxyde/carbone HR chargé en flexion, nous utilisons la relation de définition suivante :

$$E_{SF(ecHR)} = \frac{E_{Lc(ecHR)}}{(\rho_{c(ecHR)})^2} \quad (73)$$

Où :

$E_{SF(ecHR)}$: Module de Young spécifique du composite époxyde/carbone HR chargé en flexion.

$E_{Lc(ecHR)}$: Module de Young longitudinal du composite époxyde/carbone HR

$\rho_{c(ecHR)}$: Masse volumique du composite époxyde/carbone HR

Compte tenu des données retenues, l'expression (73) de la loi de variation du module de Young spécifique du composite époxyde/carbone HR, chargé en flexion simple, s'écrit :

$$E_{SF(ecHR)} = \frac{256.55 \cdot \Phi_{cHR} + 3.45}{(1200 + 550 \cdot \Phi_{cHR})^2} \quad (74)$$

5.6.1.5 Etude comparative des modules spécifiques des composites Epoxyde/verre E et époxyde/verre R

Pour effectuer l'étude comparative des modules de Young spécifiques des matériaux composites unidirectionnels époxyde/verre E, époxyde/verre R, nous nous appuyons sur les lois de variation établies précédemment :

$$E_{SF(evE)} = \frac{69.55 \cdot \Phi_{vE} + 3.45}{(1200 + 1400 \cdot \Phi_{vE})^2} \quad (75)$$

$$E_{SF(evR)} = \frac{82.55 \cdot \Phi_{vR} + 3.45}{(1200 + 1350 \cdot \Phi_{vR})^2} \quad (76)$$

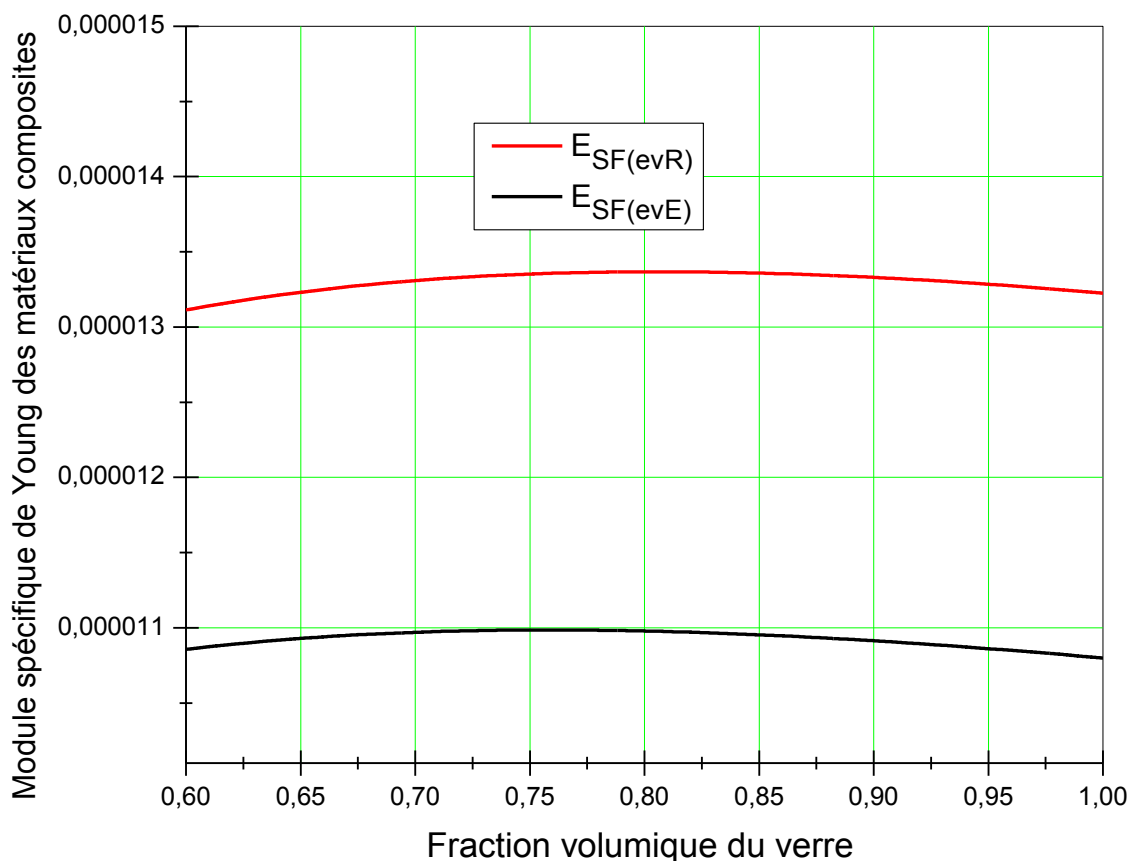


Figure 30 : variation des modules spécifiques de Young des composites : époxyde/verre E époxyde/verre R, en fonction de la fraction volumique du verre

La figure 30 représente la variation des modules de Young spécifiques des matériaux composites unidirectionnels époxyde/verre E et époxyde/verre R chargés en flexion en fonction de la fraction volumique des renforts verre E et verre R, chargés en flexion simple.

L'examen de cette figure montre que les modules de Young spécifiques de des deux matériaux composites unidirectionnels époxyde/verre E, époxyde/verre R, varient de façon non linéaire avec l'augmentation de la fraction volumique du renfort.

Dans cette étude, nous avons pris la même matrice en résine époxyde et des matériaux de renfort de modules de Young différents. Nous constatons, sur la figure 30, que le module de Young spécifique du matériau composite croît avec le module de Young de son matériau de renfort. En ce sens que sur le même intervalle de variation [0.6, 1] de la fraction volumique du renfort, les valeurs prises par le module spécifique de Young du matériau composite unidirectionnel époxyde/verre R ($E_{L(vR)} = 86$ GPa) sont plus élevées que celles du composite époxyde/verre E ($E_{L(vE)} = 73$ GPa).

Les résultats obtenus révèlent que l'ordre constaté dans la croissance des modules spécifiques de Young des matériaux composites chargés en traction reste valable dans le cas de la flexion simple. Cet ordre semble directement lié à l'importance des modules de Young des renforts. En d'autres termes, nous constatons qu'un module de Young du renfort important induit un module de Young spécifique du matériau composite important.

5.6.1.6 Etude comparative des modules spécifiques des composites unidirectionnels époxyde/carbone HM et époxyde/carbone HR

Pour effectuer l'étude comparative des modules de Young spécifiques des composites unidirectionnels époxyde/carbone HM et époxyde/carbone HR, nous nous appuyons sur les deux lois de variation établies précédemment :

$$E_{SF(ecHM)} = \frac{376.55 \cdot \Phi_{cHM} + 3.45}{(1200 + 750 \cdot \Phi_{cHM})^2} \quad (77)$$

$$E_{SF(ecHR)} = \frac{256.55 \cdot \Phi_{cHR} + 3.45}{(1200 + 750 \cdot \Phi_{cHR})^2} \quad (78)$$

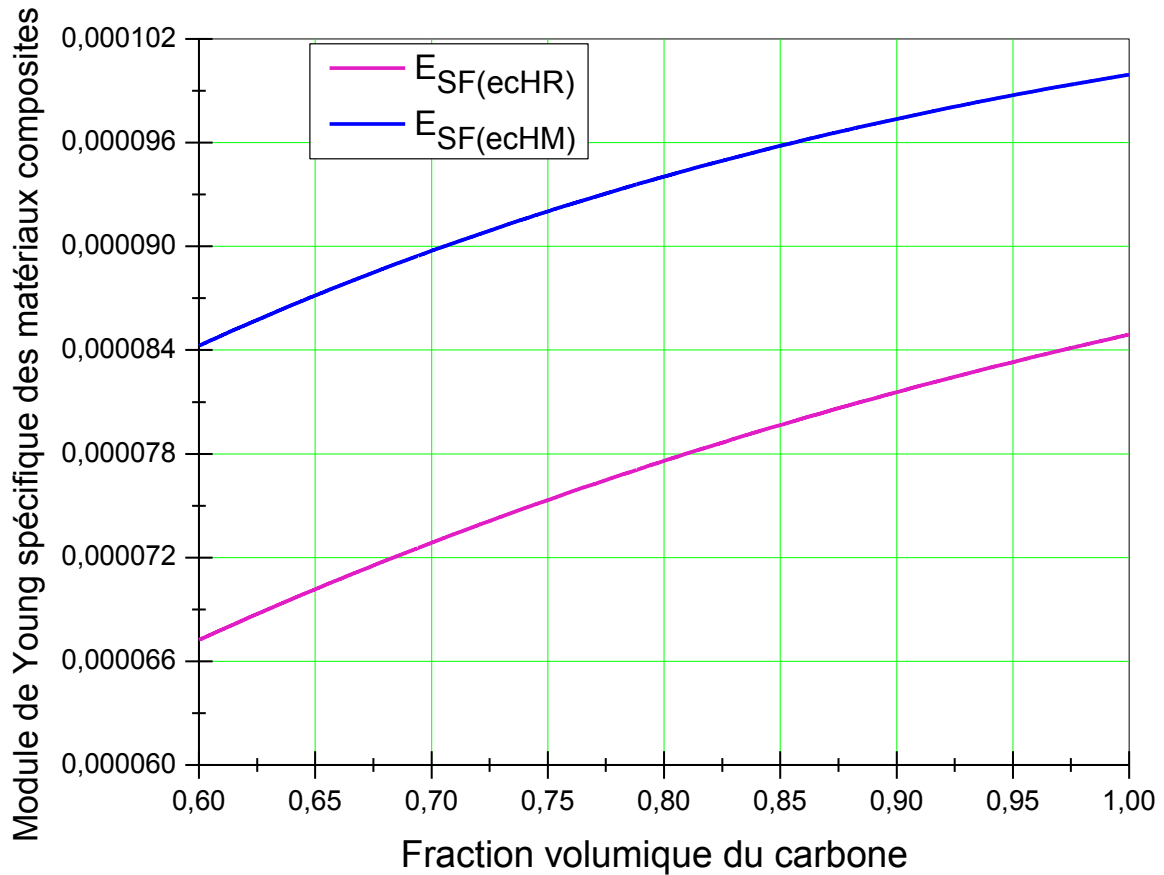


Figure 31 : variation des modules Young spécifiques des matériaux composites : époxyde/carbone HM et époxyde/carbone HR en fonction de la fraction volumique du carbone

La figure 31 représente la variation des modules de Young spécifiques des deux matériaux composites unidirectionnels époxyde/carbone HM et époxyde/carbone HR en fonction de la fraction volumique des renforts carbone HM et carbone HR.

L'examen de la figure 31 montre que les modules de Young spécifiques des deux matériaux composites unidirectionnels époxyde/carbone HM et, époxyde/carbone HR, varient de façon non linéaire avec l'augmentation de la fraction volumique du renfort.

Dans cette étude, nous avons pris la même matrice en résine époxyde et des matériaux de renfort de modules de Young différents. Nous constatons, sur la figure 31, que le module de Young spécifique du matériau composite croît avec le module de Young de son matériau de renfort. En ce sens que sur le même intervalle de variation [0.6, 1] de la fraction volumique du renfort, les

valeurs prises par le module spécifique de Young du matériau composite unidirectionnel époxyde/carbone HM ($E_{L(cHM)} = 380$ GPa) sont plus élevées que celles du composite époxyde/carbone HR ($E_{L(cHR)} = 260$ GPa).

Les résultats obtenus révèlent que l'ordre constaté dans la croissance des modules spécifiques de Young des matériaux composites chargés en traction reste valable dans le cas de la flexion simple. Cet ordre semble directement lié à l'importance des modules de Young des renforts. En d'autres termes, nous constatons qu'un module de Young du renfort important induit un module de Young spécifique du matériau composite important.

5.6.1.7 Etude comparative des modules spécifiques des matériaux composites époxyde/verre E, époxyde/verre R, époxyde/carbone HM et époxyde/carbone HR, chargés en flexion simple.

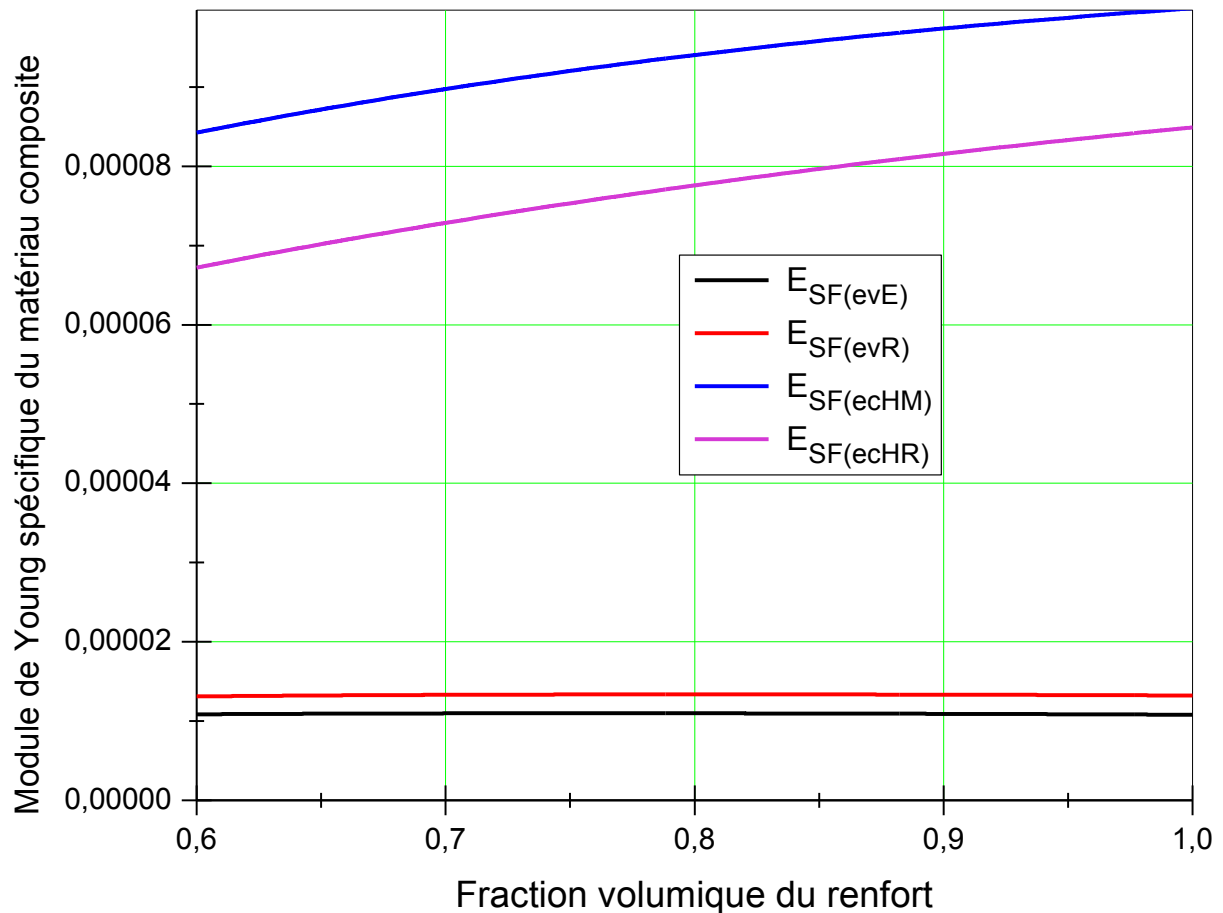
Pour effectuer l'étude comparative des modules de Young spécifiques des matériaux composites unidirectionnels époxyde/verre E, époxyde/verre R, époxyde/carbone HM et époxyde/carbone HR, nous nous appuyons sur les lois de variation établies précédemment :

$$E_{SF(evE)} = \frac{69.55 \cdot \Phi_{vE} + 3.45}{(1200 + 1400 \cdot \Phi_{vE})^2} \quad (79)$$

$$E_{SF(evR)} = \frac{82.55 \cdot \Phi_{vR} + 3.45}{(1200 + 1350 \cdot \Phi_{vR})^2} \quad (80)$$

$$E_{SF(ecHM)} = \frac{376.55 \cdot \Phi_{cHM} + 3.45}{(1200 + 750 \cdot \Phi_{cHM})^2} \quad (81)$$

$$E_{SF(ecHR)} = \frac{256.55 \cdot \Phi_{cHR} + 3.45}{(1200 + 750 \cdot \Phi_{cHR})^2} \quad (82)$$



**Figure 32 : variation de Young spécifique des matériaux composites :
époxyde verre E, époxyde/verre R, époxyde/carbone HM
et époxyde/carbone HR, chargés en flexion,
en fonction de la fraction volumique du renfort**

La figure 32 ci-dessous représente les variations des modules de Young spécifiques des matériaux composites unidirectionnels époxyde/verre E, époxyde/verre R, époxyde/carbone HM et époxyde/carbone HR, chargés en flexion simple, en fonction de la nature du matériau de renfort et de sa fraction volumique.

L'examen de cette figure montre que les modules de Young spécifiques des quatre matériaux composites époxyde/verre E, époxyde/verre R, époxyde/carbone HM et époxyde/carbone HR varient de façon non linéaire avec l'augmentation de la fraction volumique du renfort.

Dans cette étude, nous avons pris la même matrice en résine époxyde et considéré des matériaux de renfort de nature et de modules de Young différents. Nous constatons, sur la figure 32, que le module de Young spécifique de chaque matériau composite croît avec le module de Young de son matériau de renfort.

En effet, les résultats obtenus révèlent un certain ordre dans la croissance des modules spécifiques de Young des matériaux composites étudiés. Cet ordre semble directement lié à la valeur des modules de Young des renforts. En d'autres termes, nous constatons qu'un module de Young du renfort élevé génère un module de Young spécifique du matériau composite élevé.

C'est ce qui nous semble expliquer les positions adoptées, sur la figure 32, par les courbes représentatives, des lois de variation $E_{SF}=f(\Phi_f)$ des quatre matériaux composites unidirectionnels étudiés. C'est pourquoi, nous avons pour chaque fraction volumique du matériau de renfort le classement, par ordre décroissant des modules longitudinaux du renfort, suivant :

Module spécifique de l'époxyde/carbone HM ($E_{L(cHM)} = 380$ GPa) > Module spécifique de l'époxyde/carbone HR ($E_{L(cHR)} = 260$ GPa) > Module spécifique de l'époxyde/verre R ($E_{L(vR)} = 80$ GPa) > Module spécifique de l'époxyde/verre E ($E_{L(vE)} = 73$ GPa). Les résultats obtenus révèlent, aussi, que l'ordre constaté dans la croissance des modules spécifiques de Young des matériaux composites chargés en traction reste valable dans le cas où les mêmes matériaux sont chargés en flexion simple.

Conclusions

Ce travail constitue une étude comparative des caractéristiques mécaniques de quatre matériaux composites à matrice polymère. Il porte essentiellement sur la prédiction des caractéristiques mécaniques des matériaux composites unidirectionnels époxyde/verre E, époxyde/verre R, époxyde/carbone HM et époxyde/carbone HR en partant des caractéristiques de la matrice en résine époxyde et des renforts à base de verre et de carbone.

Cette étude est, essentiellement, consacrée à la prédiction et à l'étude comparative des masses volumiques, des porosités, des modules de Young longitudinaux et des modules de Young spécifiques des composites unidirectionnels époxyde/verre E, époxyde/verre R, époxyde/carbone HM et époxyde/carbone HR. Elle nous a permis d'avoir une idée assez précise sur l'influence de la nature du matériau de renfort, et de sa fraction volumique sur certaines caractéristiques des matériaux composites résultants.

Enfin, la réalisation de ce modeste travail nous a permis de tirer les conclusions suivantes :

1) - Masses volumiques des quatre matériaux composites

- L'augmentation de la fraction volumique des matériaux de renforts verre E, verre R, carbone HM et carbone HR provoque, pour une même matrice en résine époxyde, une augmentation des masses volumiques des matériaux composites résultants : époxyde/verre E, époxyde/verre R, époxyde/carbone HR et époxyde/carbone HM.
- Pour une même matrice en résine époxyde, les masses volumiques des composites à renforts verre E et verre R croient plus rapidement que celles des composites à renforts carbone HM et carbone HR. Ceci peut s'expliquer par le fait que les masses volumiques des renforts verre E et verre R soient plus élevées que celles des renforts carbones HM et carbone HR.

2) – Porosités des quatre matériaux composites

- Pour une même matrice en résine époxyde, les porosités des composites unidirectionnels époxyde/verre E, époxyde/verre R, époxyde/carbone HM et époxyde/carbone HR croient avec l'augmentation de la fraction volumique des matériaux de renfort. Il existe la relation d'ordre suivante entre les porosités des quatre matériaux composites unidirectionnels :

Porosité de l'époxyde/verre E ($\rho_{vE}=2600 \text{ kg/m}^3$) > Porosité de l'époxyde/verre R ($\rho_{vR} = 2550 \text{ kg/m}^3$) > Porosité de l'époxyde/carbone HM ($\rho_{cHM} = 1950 \text{ kg/m}^3$) > Porosité de l'époxyde/carbone HR ($\rho_{cHR} = 1750 \text{ kg/m}^3$).

3) – Qualité des quatre matériaux composites

En vertu des critères de qualité rapportés dans la littérature scientifique spécialisée [1], nous avons pu prédire la qualité des quatre matériaux composites unidirectionnels que nous avons étudiés : époxyde/verre E, époxyde/verre R, époxyde/ carbone HM et époxyde/carbone HR, en fonction de la nature du matériau de renfort et des intervalles de variation de sa fraction volumique comme suit :

• Matériau composite unidirectionnel : époxyde/verre E

Pour $0.60 \leq \Phi_{VE} \leq 0.62$, l'époxyde/verre E a une porosité $0 \leq \Phi_P \leq 0.013$ et sera de bonne qualité.

Pour $0.62 \leq \Phi_{VE} \leq 0.68$, l'époxyde/verre E a une porosité $0.013 \leq \Phi_P \leq 0.052$ et sera de qualité médiocre.

Pour $0.68 \leq \Phi_{VE} \leq 1.00$, l'époxyde/verre E a une porosité $0.052 \leq \Phi_P \leq 0.215$ et sera de mauvaise qualité.

• Matériau composite unidirectionnel : époxyde/verre R

Pour $0.60 \leq \Phi_{VR} \leq 0.62$, l'époxyde/verre R a une porosité $0 \leq \Phi_P \leq 0.013$ et sera de bonne qualité.

Pour $0.62 \leq \Phi_{VR} \leq 0.68$, l'époxyde/verre R a une porosité $0.013 \leq \Phi_P \leq 0.050$ et sera de qualité médiocre.

Pour $0.68 \leq \Phi_{VR} \leq 1.00$, l'époxyde/verre R a une porosité $0.050 \leq \Phi_P \leq 0.211$ et sera de mauvaise qualité.

• Matériau composite unidirectionnel : époxyde/carbone HM

Pour $0.60 \leq \Phi_{cHM} \leq 0.64$, l'époxyde/carbone HM a une fraction de porosité $0 \leq \Phi_P \leq 0.017$ et sera de bonne qualité.

Pour $0.64 \leq \Phi_{cHM} \leq 0.72$, l'époxyde/carbone HM a une fraction de porosité $0.017 \leq \Phi_P \leq 0.051$ et sera de qualité médiocre.

Pour $0.72 \leq \Phi_{cHM} \leq 1.00$, l'époxyde/carbone a une fraction de porosité $0.051 \leq \Phi_P \leq 0.153$ et sera de mauvaise qualité.

• **Matériau composite unidirectionnel : époxyde/carbone HR**

Pour $0.60 \leq \Phi_{cHR} \leq 0.68$, l'époxyde/carbone HR a une fraction de porosité $0 \leq \Phi_p \leq 0.018$ et sera de bonne qualité.

Pour $0.68 \leq \Phi_{cHR} \leq 0.80$, l'époxyde/carbone HR a une fraction de porosité $0.018 \leq \Phi_p \leq 0.058$ et sera de qualité médiocre.

Pour $0.80 \leq \Phi_{cHR} \leq 1.00$, l'époxyde/carbone HR a une fraction de porosité $0.058 \leq \Phi_p \leq 0.114$ et sera de mauvaise qualité.

4) - Modules de Young longitudinaux quatre des composites

Les modules de Young longitudinaux des quatre matériaux composites époxyde/verre E, époxyde/verre R, époxyde/carbone HM et époxyde/carbone HR croient linéairement avec l'augmentation de la fraction volumique des matériaux de renfort.

Pour la même matrice en résine époxyde et des matériaux de renfort de nature et de modules de Young différents, le module de Young longitudinal de chaque matériau composite unidirectionnel étudié croît avec le module de Young de son matériau de renfort.

Les résultats que nous avons obtenus révèlent un certain ordre dans la croissance des modules de Young des matériaux composites étudiés. Cet ordre semble être directement lié aux valeurs des modules de Young des matériaux de renfort.

En effet, un module de Young du renfort important induit un module de Young du matériau composite résultant important.

Pour chaque fraction volumique du matériau de renfort nous avons, par ordre décroissant des modules longitudinaux des matériaux de renfort, le classement suivant :

Module longitudinal de l'époxyde/carbone HM ($E_{L(cHM)} = 380$ GPa) > Module longitudinal de l'époxyde/carbone HR ($E_{L(cHR)} = 260$ GPa) > Module longitudinal de l'époxyde/verre R ($E_{L(vR)} = 80$ GPa) > Module longitudinal de l'époxyde/verre E ($E_{L(vE)} = 73$ GPa).

5) – Modules de Young spécifiques des quatre matériaux composites étudiés, chargés en traction

Les modules de Young spécifiques des quatre matériaux composites étudiés : époxyde/verre E, époxyde/verre R, époxyde/carbone HM et époxyde/carbone HR croient de façon non linéaire avec l'augmentation de la fraction volumique du renfort.

Pour une même matrice en résine époxyde et des matériaux de renfort de nature et de module de Young différents, le module de Young spécifique de chaque matériau composite résultant croît avec la valeur du module de Young de son matériau de renfort.

En effet, les résultats obtenus révèlent un certain ordre dans la croissance des modules de Young des matériaux composites étudiés. Cet ordre semble être directement lié à l'importance des modules de Young des renforts. En d'autres termes, un module de Young du renfort important induit un module de Young spécifique du matériau composite, chargé en traction, important.

Pour chaque fraction volumique du matériau de renfort, nous avons, par ordre décroissant des modules longitudinaux des matériaux de renfort, le classement suivant :

Module de Young spécifique de l'époxyde/carbone HM ($E_{L(cHM)} = 380$ GPa) >

Module de Young spécifique de l'époxyde/carbone HR ($E_{L(cHR)} = 260$ GPa) >

Module de Young spécifique de l'époxyde/verre R ($E_{L(vR)} = 80$ GPa) > Module de Young spécifique de l'époxyde/verre E ($E_{L(vE)} = 73$ GPa).

6) - Modules de Young spécifiques des quatre matériaux Composites étudiés, chargés en flexion.

Les modules de Young spécifiques des quatre matériaux composites époxyde/verre E, époxyde/verre R, époxyde/carbone HM et époxyde/carbone HR, chargés en flexion, varient de façon non linéaire avec l'augmentation de la fraction volumique du matériau de renfort.

Pour la même matrice en résine époxyde et des matériaux de renfort de nature et de modules de Young différents, le module de Young spécifique de chaque matériau composite croît avec le module de Young longitudinal de son matériau de renfort.

En effet, les résultats obtenus révèlent un certain ordre dans la croissance des modules spécifiques de Young des matériaux composites étudiés. Cet ordre semble directement lié à la valeur des modules de Young longitudinaux des matériaux de renfort. En effet, nous constatons qu'un module de Young

du renfort élevé induit un module de Young spécifique du matériau composite résultant, chargé en flexion, élevé.

C'est pourquoi, nous avons pour chaque fraction volumique du matériau de renfort, par ordre décroissant des modules longitudinaux des matériaux de renfort, le classement suivant :

Module de Young spécifique de l'époxyde/carbone HM ($E_{L(cHM)} = 380 \text{ GPa}$) >

Module de Young spécifique de l'époxyde/carbone HR ($E_{L(cHR)} = 260 \text{ GPa}$) >

Module de Young spécifique de l'époxyde/verre R ($E_{L(vR)} = 80 \text{ GPa}$) > Module de Young spécifique de l'époxyde/verre E ($E_{L(vE)} = 73 \text{ GPa}$).

Ainsi, l'ordre constaté dans la croissance des modules spécifiques de Young des matériaux composites chargés en traction reste valable dans le cas où ces mêmes matériaux sont chargés en flexion simple.

7) – Rigidité des quatre matériaux composites

• Matériaux composites chargés en traction

Si on se réfère aux critères de qualité des matériaux composites rapportés dans la littérature scientifique spécialisée [1], il apparaît que le meilleur matériau, chargé en traction, est celui qui possède la valeur du module de Young spécifique (E/ρ) la plus élevée, conduisant à la valeur de la complaisance élastique de traction ($J = 1/E$) la plus faible et par conséquent à la rigidité la plus élevée de ce matériau. Pour la même matrice en résine époxyde, on peut donc classer les quatre matériaux composites étudiés par ordre de rigidité décroissante, comme suit :

1. Epoxyde/carbone HM
2. Epoxyde/carbone HR
3. Epoxyde/verre R
4. Epoxyde/verre E

• Matériaux composites chargés en flexion simple

Si on se réfère aux critères de qualité des matériaux composites rapportés dans la littérature scientifique spécialisée [1], il apparaît que le meilleur matériau, chargé en flexion simple, est celui qui possède la valeur du module de Young spécifique (E/ρ^2) la plus élevée. Pour la même matrice en résine époxyde, on peut donc classer les quatre matériaux composites étudiés par ordre de rigidité décroissante, comme suit :

1. Epoxyde/carbone HM
2. Epoxyde/carbone HR
3. Epoxyde/verre R
4. Epoxyde/verre E

Résumé :

Dans ce travail, nous examinons les 'influences de la nature du matériau de renfort et de sa fraction volumique sur certaines propriétés mécaniques des matériaux composites époxyde/verre E, époxyde/verre R, époxyde/carbone HM, et époxyde/carbone HR.

Dans une première étape, nous examinons les influences de la nature du renfort et de sa fraction volumique sur la masse volumique, et la porosité de ces matériaux composites .Nous déterminons, par conséquent, les intervalles de variation de la fraction volumique du renfort, engendrant la bonne, la médiocre et la mauvaise qualité de ces matériaux composites.

Dans une seconde étape, nous examinons les influences de la nature du renfort et de sa fraction volumique sur les modules spécifiques de ces matériaux composites, chargé en traction.

Dans une troisième étape, nous examinons les influences de la nature du renfort et de sa fraction volumique sur les modules spécifiques de ces matériaux composites, chargé en flexion.

Mots clés : époxyde, verre E, verre R, carbone HM, carbone HR, matériau_composite, composite élastique unidirectionnel, fibre, module de Young , module spécifique, porosité.

ملخص :

في هذا العمل , ندرس تأثيرات طبيعة المادة المعززة وجزء الحجم على بعض الخواص الميكانيكية للزجاج المركب من إيبوكسي/زجاج E , من إيبوكسي/زجاج R , من إيبوكسي/كربون HM , من إيبوكسي/كربون HR .

في المرحلة الأولى , ندرس تأثير طبيعة التسليح وجزء الحجم على كثافة ومسامية هذه المواد المركبة, نحدد , ل ذلك , فترات تباين جزء حجم التعزيز, والحفاظ على الأحسن , المتوسط , الأسوأ جودة لهذه المواد المركبة.

في المرحلة الثانية , ندرس تأثيرات طبيعة التعزيز وجزء الحجم على الوحدات المعينة لهذه المواد المركبة , المحملة بالشد .في المرحلة الثالثة , ندرس تأثيرات طبيعة التعزيز وجزء الحجم على الوحدات المعينة لهذه المواد المركبة , المحملة بالثني.

كلمات مفتاحية : الإيبوكسي , الزجاج E , الزجاج R , الكربون HM , الكربون HR , المواد المركبة , مركب مرن أحادي الاتجاه الألياف معامل يونغ الطولي , معامل محدد, مسامية.

Abstract :

In this work, we examine the influences of the nature of the reinforcing material and its volume fraction on some mechanical properties of epoxy/glass E, epoxy/glass R, epoxy/carbon HM, and epoxy/carbon HR.

In the first step, we examine the influence of the nature of the reinforcement and its volume fraction on the density and porosity of these composite materials. We determine, therefore, the intervals of variation of the volume fraction of the reinforcement. Generating the good, the poor and the poor quality of these composite materials. In the second step, we examine the influences of the nature of reinforcement and its volume fraction on the specific modules of these composite materials, loaded in traction. In a third step, we examine the influences of the nature of reinforcement and its volume fraction on the specific modules of these composite materials, loaded in bending.

Key words : epoxy, glass E, glass R, carbon HM, carbon HR, composite material, unidirectional elastic composites ,fiber, young module, specific modulus, porosity.