

Matériaux Composites (C)

Essais des plastiques renforcés

Analyse physique de la structure du composite

- * Taux de fibres et de charges,
- * Structure du renfort,
- * Taux de porosité

Analyse de l'interface fibre/matrice

Essais sur éprouvettes planes et barreaux

- * comportement mécanique instantané,
- * comportement mécanique à long terme
- * essais de mécanique de la rupture

Essais sur tubes et anneaux

Essais des plastiques renforcés:

Analyse physique de la structure du composite

Taux de fibres et de charges, et structure du renfort (1)

Pour des composites à fibres de verre, un essai de **calcination** à 625 °C avec pesées avant et après passage au four (**NF T 57-102** et **ISO 1172**) permet :

- de mesurer le taux massique, donc le taux de verre massique;
- d'identifier chaque couche (tissus, mats, stratifils unidirectionnels), d'en mesurer la masse au mètre carré [grammage : **NF ISO 10352** (T 57-111), **ISO 3374**] et l'orientation ;
- de séparer les charges pulvérulentes minérales ;
- de définir le degré d'homogénéité du composite en utilisant des échantillons de volumes différents, prélevés en plusieurs points.

La méthode est également étendue aux différents renforts de fibre de verre: préimprégnés, tissus, fils... (**T 57-518**, **T 57-557**, **NF T 57-571**).

Essais des plastiques renforcés: **Analyse physique de la structure du composite**

Taux de fibres et de charges, et structure du renfort (2)

Dans le cas des fibres ne supportent pas la calcination, l'utilisation d'une méthode d'**extraction par dissolution et décantation (T 57-608, future ISO 11667-3)** permet d'accéder aux mêmes résultats.

En outre, la connaissance des masses volumiques de la matrice (ρ_m) et du renfort (ρ_r) permet de calculer le **taux de renfort volumique** (φ_v) qui intervient dans les calculs des caractéristiques des composites, ainsi que la masse volumique théorique (ρ_t) :

$$\frac{1}{\varphi_v} = \frac{\rho_r}{\rho_m} \left(\frac{1}{\varphi_p} - 1 \right) + 1$$

$$\rho_t = \varphi_v \rho_r + (1 - \varphi_v) \rho_m$$

Essais des plastiques renforcés:

Analyse physique de la structure du composite

Taux de porosité (1):

Le taux de porosité (ou **taux de vide**) et sa distribution dans le composite dépendent de nombreux facteurs tels que :

- le type de résine (nature, accélérateur, catalyseur, caractéristiques rhéologiques, composants volatils) ;
- l'orientation, le taux et la structure du renfort (armure, ensimage, séquence d'empilement) ;
- les paramètres technologiques liés aux procédés de fabrication ($^{\circ}\text{C}$, temps, pressions et dépressions, degré hygrométrique).

le taux de porosité des pièces industrielles se situe entre 1 et 10 %, selon le procédé de mise en oeuvre choisi. Un taux de porosité élevé se traduit par des chutes de propriétés mécaniques importantes (jusqu'à 50 % pour un taux volumique de vide de 5 %), surtout à la rupture en cisaillement et dans la direction perpendiculaire aux fibres

Essais des plastiques renforcés:

Analyse physique de la structure du composite

Taux de porosité (2):

La technique de **mesure par ultrasons** est fondée sur le comportement des vibrations mécaniques de fréquence supérieure aux fréquences acoustiques (ultrasons entre 2,25 et 10 MHz). Différentes variantes sont disponibles, en transmission ou en réflexion (échos), avec balayage de type A-scan, B-scan (coupes de la pièce) ou C-scan (cartographie de la pièce), nécessitant ou non l'immersion en piscine.

La méthode consiste à mesurer l'atténuation d'amplitude du faisceau d'ondes sonores à travers le matériau composite. Cette atténuation et sa pente en fonction de la fréquence sont reliées au **taux de porosité** par une relation linéaire. Les constantes de proportionnalité dépendent de la forme des porosités et des propriétés élastiques du stratifié, et sont déterminées expérimentalement. La méthode présente l'avantage de pouvoir être appliquée à une pièce entière pour une cartographie complète de la distribution des défauts (temps de mesure de l'ordre de 1h).

Essais des plastiques renforcés:

Analyse physique de la structure du composite

Taux de porosité (3):

La mesure par **radiographie** consiste à imprégner l'échantillon d'une substance opaque aux rayons X, qui diffuse dans les porosités, puis à le radiographier. L'absorption et la diffraction des rayons X par les différentes phases du matériau permet de détecter la porosité. Des vides de l'ordre du micromètre voire du nanomètre peuvent être détectés, mais l'image reste bidimensionnelle (2D) et la validité de la méthode dépend du remplissage par l'agent opacifiant.

L'analyse des résultats est en outre longue et délicate. Des appareils portatifs à basse tension (50 KV) sont utilisables sur les chantiers. L'utilisation combinée de techniques radiographiques et ultrasonores est envisageable pour permettre à la fois de situer la position des porosités dans l'épaisseur d'une pièce à évaluer leur superficie.

Essais des plastiques renforcés:

Analyse physique de la structure du composite

Taux de porosité (4):

L'imagerie par **tomographie ou tomodensitométrie à rayons X** (scanner) est une technique de laboratoire en cours de développement, dérivée des scanners médicaux, qui repose sur l'établissement de corrélations entre la densité d'absorption des rayons X, les densités du matériau, les taux de porosité et qui permet, par des observations en 3D et des analyses d'images à haute résolution, de situer et d'évaluer des défauts dans le volume. On élimine les problèmes d'orientation et de superposition des défauts.

La visualisation des images n'est pas possible en temps réel avec cette technique, et le traitement vidéo de l'image rayons X fait appel à des systèmes d'analyse très coûteux. Par ailleurs, comme pour les techniques ultrasonores, la méthode nécessite un étalonnage au moyen d'échantillons de taux de porosité connus afin d'évaluer l'absorption théorique du matériau composite (aucune porosité).

Essais des plastiques renforcés:

Analyse physique de la structure du composite

Taux de porosité (5):

Les techniques à base de **micro-ondes** peuvent être utilisées pour estimer des taux de vide au sein des composites.

La méthode est fondée sur les différences de propriétés diélectriques engendrées par des défauts tels que inclusions, vides et délaminages, aux hautes fréquences (8 à 18 GHz). Les deux composantes de la permittivité complexe (permittivité relative et facteur de pertes diélectriques) sont influencées par la présence de vides. L'utilisation de techniques de balayage et de guides d'ondes à bouts ouverts permet d'éditer des images donnant accès aux taux de porosités absolus locaux (cartographie) et aux tailles des inclusions poreuses. Sur le plan pratique, les techniques par micro-ondes ne nécessitent pas l'utilisation de couplants et peuvent être utilisées avec ou sans contact. Dans l'état actuel des choses, les méthodes engendrent des coûts d'investissement ou de sous-traitance très élevés

Essais des plastiques renforcés:

Analyse physique de la structure du composite

Taux de porosité (6):

La méthode des **mesures de densités** (balance hydrostatique, pycnomètre ou colonne à gradient de densité) est très utilisée, de par sa simplicité. Il s'agit de comparer densité théorique et densité réelle du stratifié, le **taux de vide** du composite (V_v) étant relié aux densités de la matrice (d_m), du renfort (d_r) et du composite (d_c), ainsi qu'à la fraction massique de fibres (ϕ_p) (**ASTM D 2734, ISO 7822-A**) par la relation :

$$V_v = 1 - d_c \{ [\phi_p / d_r] + [(1 - \phi_p) / d_m] \}$$

La précision est fortement tributaire des erreurs commises sur les densités et les fractions massiques des constituants ; elle dépend de la taille et de la distribution des vides dans le composite. La méthode n'est pas applicable à la mesure de faibles taux de porosité (inférieurs à 1 %), pour lesquels les valeurs obtenues sont souvent négatives..

Essais des plastiques renforcés:

Analyse physique de la structure du composite

Taux de porosité (7):

Le principe de la **désintégration mécanique** (broyage) des éprouvettes (**ISO 7822-B**) ne permet pas de garantir l'absence de porosités au sein des fragments résiduels. Cette méthode reste peu utilisée pour les composites fibres/résines.

Le **comptage statistique** consiste à mesurer la surface occupée par les porosités par observation au microscope de la section polie d'un échantillon (**T 57-109, ISO 7822-C**). Il s'agit de superposer une grille carrée comportant 20 à 200 points à une coupe micrographique. Statistiquement, la proportion de points de la grille qui sont superposés à des vides correspond au taux de porosité du matériau. L'intérêt de cette méthode est qu'elle apporte des renseignements sur la taille, la géométrie et la distribution des porosités. Néanmoins, le nombre important de mesures à réaliser pour obtenir un résultat significatif et représentatif de la structure rend la méthode longue (de l'ordre de l'heure pour une mesure) et coûteuse.

Essais des plastiques renforcés: **Analyse de l'interface fibre/matrice**

Analyse microscopique

En microscopie optique, la zone entre fibres et matrice n'est visible que lorsqu'elle est très développée, ce qui est le cas uniquement pour certains couples fibre/matrice (fibre de carbone / matrice thermoplastique semi-cristalline par exemple).

La MET à haute résolution a permis d'observer **le contact entre phases à l'échelle atomique**.

L'analyse au MEB qui permet tout au plus de juger **qualitativement**, mais non quantitativement, l'adhésion fibre/matrice. Les efforts déployés récemment pour rationaliser la description des faciès de rupture des composites permettent néanmoins de penser qu'à terme la fractographie pourra servir de base à l'explication du rôle de l'interface dans les mécanismes d'endommagement.

Essais des plastiques renforcés: **Analyse de l'interface fibre/matrice**

Analyses physico-chimiques

certaines techniques dérivées de l'étude des surfaces ont été mises en oeuvre :

- spectrométrie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR) ;
- spectrométrie Raman ;
- spectroscopie d'électrons Auger (AES) ;
- spectroscopie électronique pour l'analyse chimique (XPS ou ESCA) ;
- spectrométrie de masse à émission secondaire (SIMS) ;

D'une manière générale, ces méthodes permettent de réaliser une analyse chimique de couches superficielles de quelques nanomètres d'épaisseur.

Elles sont applicables à l'analyse d'ensimages sur fibres nues, éventuellement sur fibres déchaussées, mais trouvent néanmoins leurs limites pour l'analyse « in situ » de composites réels.

En somme, dans la mesure où, d'une manière générale, il n'est pas possible de « visualiser » l'interface, on préfère y accéder par l'étude des comportements que la zone interfaciale engendre,

Essais des plastiques renforcés: **Analyse de l'interface fibre/matrice**

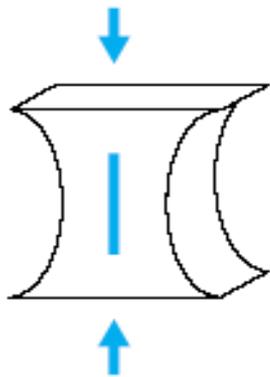
Analyses sur composites modèles monofilamentaires (1):

La méthode de **compression** consiste à solliciter en compression des éprouvettes parallélépipédiques ou en forme d'haltères, la géométrie de l'échantillon ou la différence de coefficient de Poisson entre fibre et matrice engendrant des contraintes de cisaillement ou de traction à l'interface. Le principe est de mesurer la **contrainte de compression** σ_c pour laquelle un début de décohésion est détecté soit au niveau de l'étranglement (éprouvettes haltères) soit au niveau des extrémités de la fibre (éprouvettes parallélépipédiques). La détection de la décohésion est assurée optiquement au moyen d'une lampe (dans le cas des résines transparentes) ou par émission acoustique. Le calcul des **résistances interfaciales en traction ou en cisaillement** t_s est réalisé en faisant intervenir les **modules** E_m et E_f et les **coefficients de Poisson** ν_m et ν_f

Essais des plastiques renforcés: Analyse de l'interface fibre/matrice

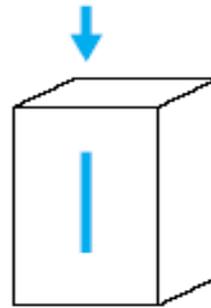
Analyses sur composites modèles monofilamentaires (2):

La technique de compression est peu utilisée en raison des difficultés liées à la fabrication des éprouvettes et à l'application des critères d'endommagement (charge à la décohésion influencée par la géométrie des extrémités de fibres en raison des effets de concentration de contraintes difficilement contrôlables)



Résistance interfaciale en traction :

$$\sigma_{\perp} = \frac{\sigma_c (\nu_m - \nu_f) E_f}{(1 + \nu_m) E_f + (1 - \nu_f - 2\nu_f^2) E_m}$$



3,8 x 1,3 x 1,3 cm

Résistance interfaciale
au cisaillement :

$$\tau_s = 2,5 \sigma_c$$

**Caractérisation de
l'interface par analyse
micromécanique sur
monofilament : essai de
compression**

Essais des plastiques renforcés: **Analyse de l'interface fibre/matrice**

Analyses sur composites modèles monofilamentaires (3):

La méthode de **pull-out** (ou **de la microgoutte**: **Il s'agit d'extraire une fibre d'un bloc, d'un disque ou d'une gouttelette de résine**). Le principe est de tracer les courbes charge/allongement puis de calculer la résistance interfaciale au cisaillement. Cette technique présente plusieurs avantages, dont la possibilité de prendre en compte les phénomènes de frottement consécutifs à la décohésion et de déterminer les énergies de rupture correspondantes pour les deux phases (décohésion et frottement). Les inconvénients résident dans l'analyse plus que délicate des résultats obtenus, mais surtout dans les difficultés expérimentales de fabrication, manipulation et mise en charge des échantillons : le taux d'échec atteint ici plus de **75 %**.

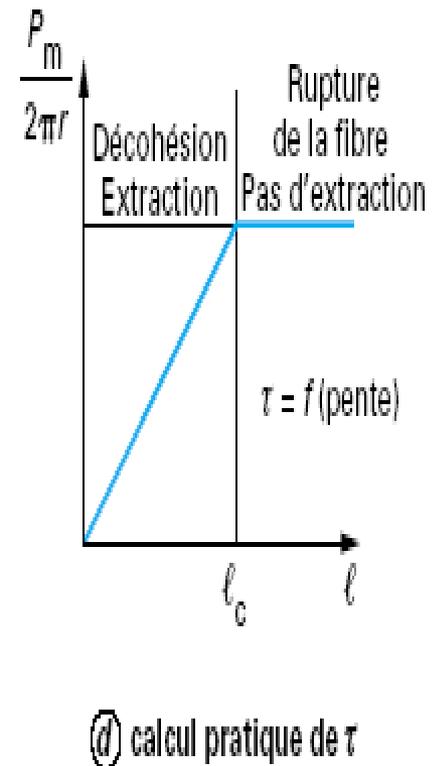
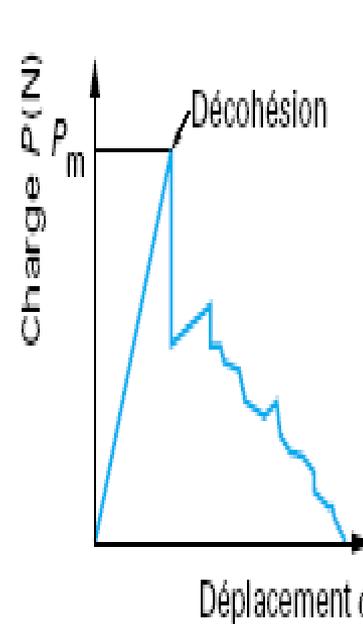
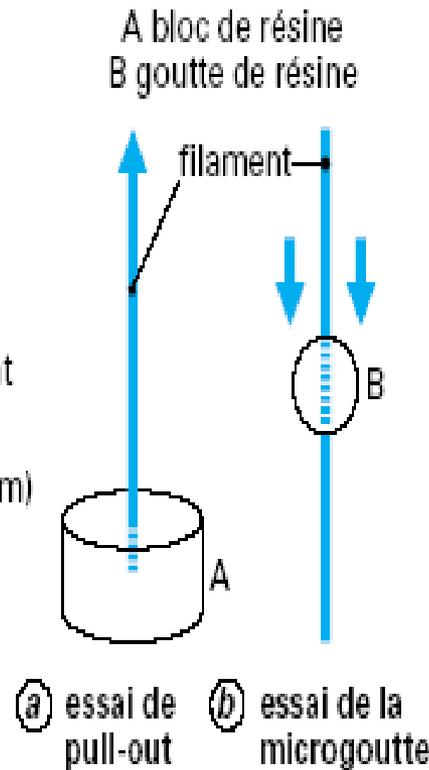
Essais des plastiques renforcés: Analyse de l'interface fibre/matrice

Analyses sur composites modèles monofilamentaires (4):

$$\tau = \frac{P_m}{2\pi r \ell} = \frac{\sigma_m r}{2\ell}$$

$$\text{avec } \ell_{\max} = \frac{\sigma_{ult} r}{2\tau}$$

- τ contrainte moyenne de cisaillement
- r rayon de la fibre ou de la mèche
- ℓ longueur enrobée (de l'ordre du mm)
- P_m charge maximale appliquée
- σ_m contrainte maximale appliquée
- σ_{ult} résistance de la fibre

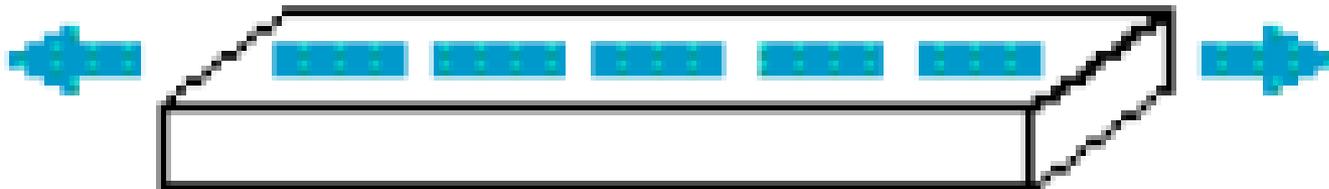


Caractérisation de l'interface par analyse micromécanique sur monofilament : essai de pull-out ou de la microgoutte

Essais des plastiques renforcés: **Analyse de l'interface fibre/matrice**

Analyses sur composites modèles monofilamentaires (5):

Les essais de **fragmentation** font intervenir une seule fibre totalement enchâssée dans une éprouvette sollicitée en traction. La fibre subit alors des ruptures successives à chaque fois que sa résistance en traction est atteinte jusqu'à ce que les morceaux restants atteignent une longueur critique ne permettant plus au transfert de charge par cisaillement de générer des contraintes de traction égales à la résistance de la fibre. Le calcul de la **résistance interfaciale au cisaillement** nécessite alors la détermination de deux termes $\sigma_{FR}(l_c)$ et d/l_c auxquels il est possible d'accéder de différentes manières.



Essais des plastiques renforcés: Analyse de l'interface fibre/matrice

Analyses sur composites modèles monofilamentaires (6):

La **contrainte à la rupture** d'une fibre de longueur critique peut être

- mesurée en utilisant une fibre de longueur l_c , ce qui est très délicat ;
- déterminée par extrapolation à des mesures $l = l_c$ obtenues pour différentes longueurs l ;
- approximée à partir de la distribution des résistances pour une longueur donnée en appliquant une loi statistique de Weibull.

Le **facteur de forme** d/l_c (diamètre / longueur critique de fibre) peut être :

- déterminé à partir de la distribution des longueurs en utilisant une loi de Weibull
- calculé en utilisant la formule : $l_c = \frac{4}{3} l = \frac{4}{3} L / (N+1)$ avec L : longueur de l'éprouvette, N : nombre de ruptures de la fibre.

Ces opérations nécessitent la connaissance de N et/ou l que l'on peut obtenir

- par émission acoustique (une rupture = un événement acoustique d'où N) ;
- par microscopie à transmission en lumière polarisée (observation à travers une matrice transparente d'où N et l) ;
- par pyrolyse ou dissolution, filtrage et observation au microscope (d'où N et l).

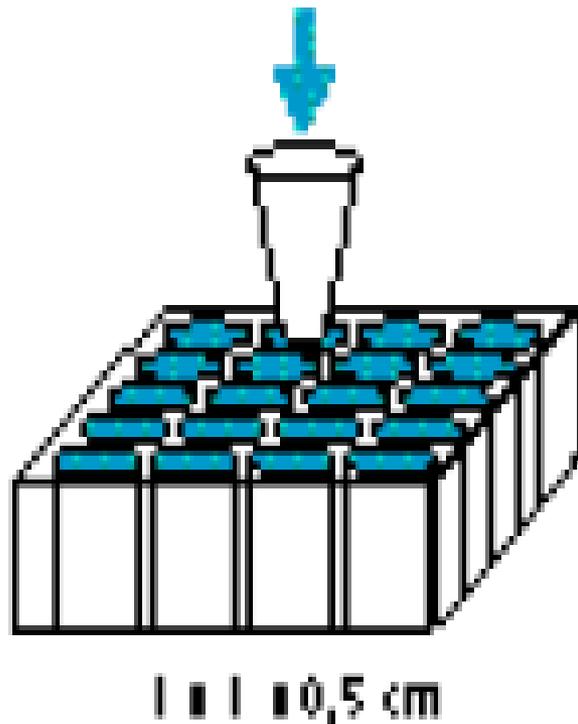
Essais des plastiques renforcés: **Analyse de l'interface fibre/matrice**

Analyses sur composites modèles monofilamentaires (7):

Le test de **micro-indentation** permet une mesure de la force de décohésion in situ sur composites réels (principalement unidirectionnels). Cette méthode est dotée d'un processus de prise de mesure et d'acquisition de données totalement automatisé. Elle nécessite le polissage d'échantillons de composites présentant des fibres perpendiculaires à la surface, et consiste à appuyer à l'aide d'un indenteur sur l'extrémité d'une fibre jusqu'à décohésion (détection possible par émission acoustique) de celle-ci. La mesure de la **contrainte de décohésion** σ_d permet alors de déduire la **résistance interfaciale au cisaillement** t qui est une fonction assez complexe de σ_d , des caractéristiques élastiques G_m de la matrice et E_f de la fibre, du diamètre d de la fibre et de la distance interfibres T_m .

Essais des plastiques renforcés: Analyse de l'interface fibre/matrice

Analyses sur composites modèles monofilamentaires (8):



Résistance interfaciale au cisaillement :

$$\tau = \sqrt{\frac{G_m}{E_f} \cdot \frac{T_m}{d}}$$

avec

T_m distance entre deux fibres voisines

d diamètre des fibres

τ_d contrainte de décohésion

G_m module de Coulomb de la matrice

E_f module d'Young de la fibre

Caractérisation de l'interface par analyse micromécanique sur monofilament : essai de micro-indentation

Essais des plastiques renforcés: Analyse de l'interface fibre/matrice

Analyses mécaniques macroscopiques sur composites industriels (1)

des **essais mécaniques traditionnels** en traction, flexion, cisaillement ou compression sur éprouvettes planes et barreaux sont le plus souvent utilisés pour **qualifier** succinctement l'interface fibre/matrice de « faible » ou « forte », « bonne » ou « mauvaise ».

En effet, le niveau d'adhésion fibre/matrice influe (quelques % à plusieurs dizaines %) sur les lois de comportement des composites. Les propriétés les plus fréquemment exploitées (modules et propriétés à la rupture) ne sont pas les plus sensibles au facteur « interface ».

Des techniques plus fines d'analyse des endommagements telles que l'émission acoustique, **associées et couplées** à des essais conventionnels de traction, ou une détermination des propriétés d'amorçage et de propagation de fissures par application de la mécanique de la rupture conduisaient à des résultats beaucoup plus significatifs (écarts de plusieurs centaines de pourcent pour des interfaces de qualités différentes).

Essais des plastiques renforcés: **Analyse de l'interface fibre/matrice**

Analyses mécaniques macroscopiques sur composites industriels (2)

On notera également qu'un **couplage** de ces essais traditionnels **avec un vieillissement hydrothermique** (tenue à l'eau chaude) permet de juger de la capacité des ensimages à assurer leur rôle de protection à long terme contre les agressions extérieures.

Une dernière méthode consiste à relier la qualité de l'adhésion fibre/matrice aux modifications des spectres d'amortissement mécaniques mesurées par **spectroscopie mécanique**. Ainsi, la température de transition vitreuse, le module caoutchoutique, l'amortissement à la température de transition vitreuse sont influencés par l'interface. En revanche, l'apparition de transitions secondaires correspondant au comportement propre de l'interphase n'est que très rarement effective.

Essais des plastiques renforcés:

Essais sur éprouvettes planes et barreaux

Fabrication des éprouvettes:

Les éprouvettes sont soit moulées directement, soit découpées dans des plaques échantillons, soit découpées dans des structures. Pour les matières thermodurcies, le découpage est effectué, suivant les cas, par fraisage ou sciage avec un disque diamanté.

- **T 57-151** (plaques à renfort unidirectionnel pour éprouvettes avec talons moulés)
- **NF ISO 9291** (plaques planes bobinées à renfort unidirectionnel)
- **NF T 57-153** (plaques à renforts de tissus et/ou de mats) ;
- **T 57-300** (plaques à renfort carbone tissu et nappes préimprégnées, moulées à la presse, au sac, ou à l'autoclave) ;
- **NF ISO 9353** (T 57-154) (plaques d'essai à renfort unidirectionnel par moulage au sac) ;
- **ISO 9291** (plaques d'essai à renfort unidirectionnel par enroulement).

Essais des plastiques renforcés:

Essais sur éprouvettes planes et barreaux

Fabrication des éprouvettes:

La révision de la norme **ISO 1268** précisera à terme les conditions de fabrication de plaques d'essais en fonction de la technologie de mise en oeuvre retenue :

- moulage au contact ;
- moulage par projection simultanée ;
- moulage par compression en voie humide ;
- moulage de préimprégnés (sac, autoclave, compression) ;
- moulage par enroulement filamentaire ;
- moulage par pultrusion ;
- moulage par transfert de résine (RTM) ;
- moulage des SMC/BMC ;
- moulage des thermoplastiques renforcés estampables (TRE).

Essais des plastiques renforcés:

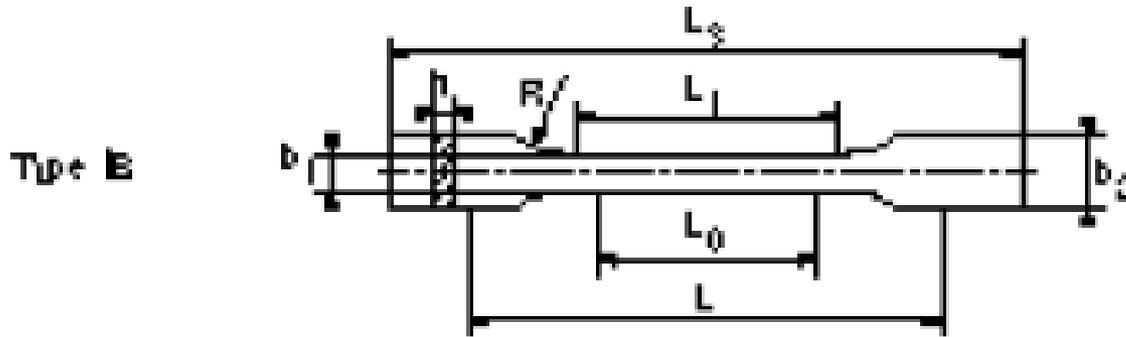
Détermination du comportement mécanique instantané

Essais de traction (1): Les essais de base permettent de déterminer la loi de comportement contrainte-déformation dans une direction donnée. Les caractéristiques habituelles que l'on en déduit sont le **module d'Young**, le **coefficient de Poisson**, ainsi que la contrainte et l'allongement relatifs aux points singuliers de la loi de comportement (**limite de linéarité, coude, charge maximale, rupture, etc.**).

	Type IB	Type II	Type III	Type IIIA	Type IIIB
L_3 longueur minimale	150	250	250	250	250
L distance initiale entre mors.....	115 ± 1	150 ± 1	136	136	136
L_0 longueur de référence (extensomètre)	$50 \pm 0,5$	50 ± 1	50 ± 1	50 ± 1	50 ± 1
L_1 longueur de la partie calibrée.....	$60 \pm 0,5$	.....	.....	.....	.....
L_2 distance entre talons .....	.....	.....	150 ± 1	150 ± 1	150 ± 1
b_2 largeur aux extrémités	$20 \pm 0,2$	.....	.....	.....	.....
b_1 largeur de la partie calibrée	$10 \pm 0,2$	25 ou $50 \pm 0,5$	25 ou $50 \pm 0,5$	$15 \pm 0,5$	$25 \pm 0,5$
h épaisseur	2 à 10	2 à 10	2 à 10	$1 \pm 0,2$	$2 \pm 0,2$
L_T longueur des talons minimale.....	.....	.....	50	50	50
h_T épaisseur des talons.....	.....	.....	1 à 3	0,5 à 2	0,5 à 2
D diamètre des trous de centrage.....	.....	$3 \pm 0,25$	$3 \pm 0,25$	.....	.....
R rayon minimal.....	60	.....	.....	.....	.....

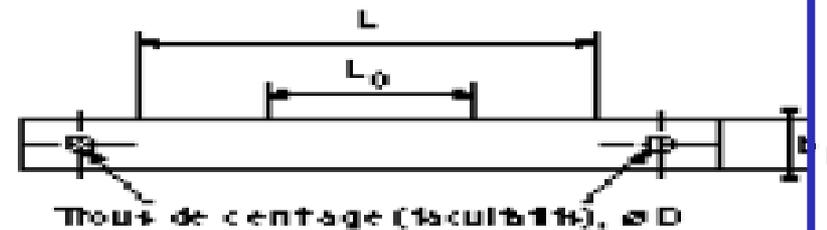
Essais des plastiques renforcés: Détermination du comportement mécanique instantané

Essais de traction (2):

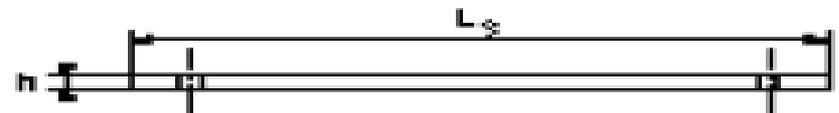


type I, en forme d'haltère, pour les matières thermoplastiques renforcées de fibres coupées et certains composites à base de mats ou de tissus très peu résistants

Type II

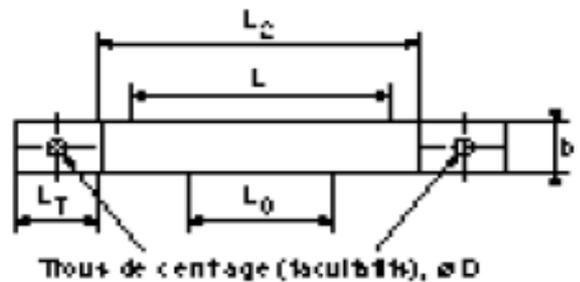


type II, rectangulaire pour les matières thermodurcies armées avec des mats ou des tissus à faible résistance

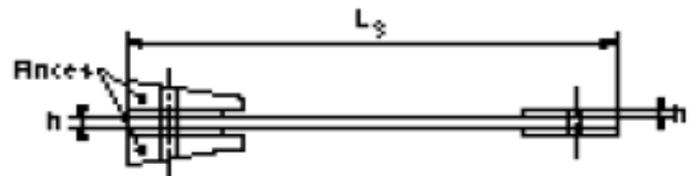


Essais des plastiques renforcés: Détermination du comportement mécanique instantané

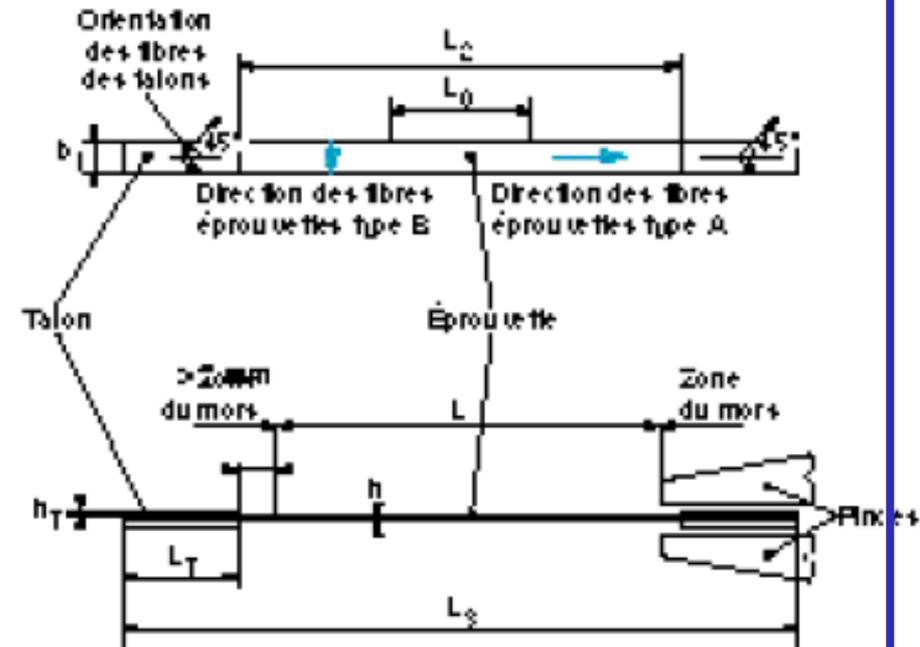
Essais de traction (3):



Type III



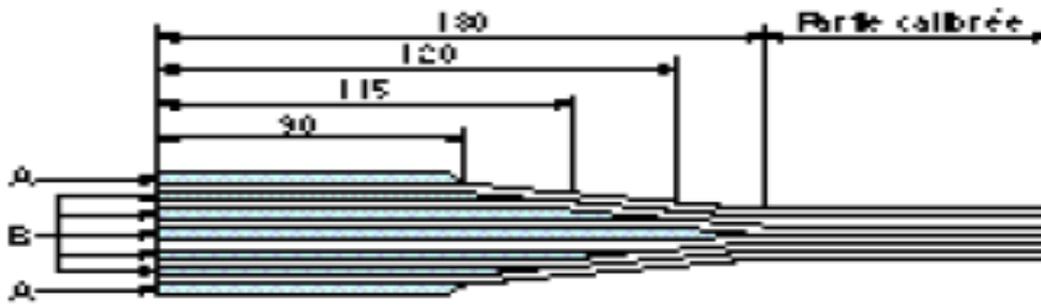
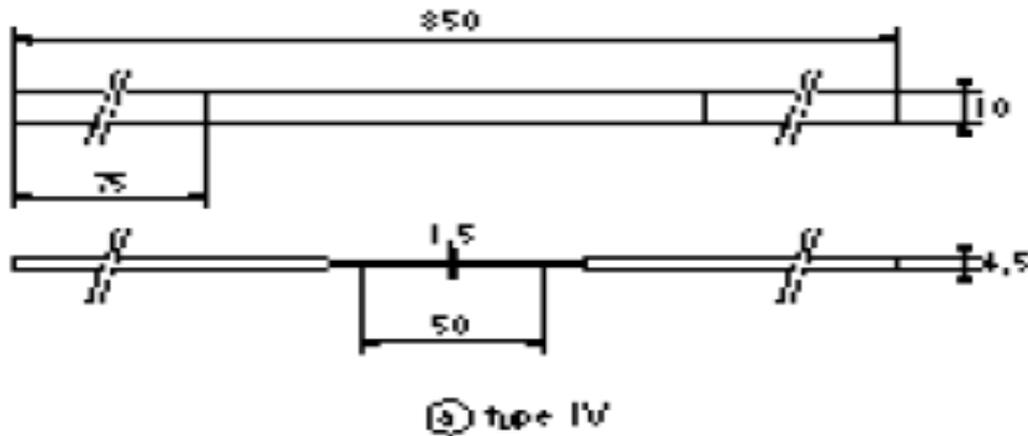
Types IIIA et IIIB



type III, rectangulaire, avec talons rectangulaires pour les matières thermodurcies armées avec des tissus résistants, ou avec des fibres unidirectionnelles continues ;

Essais des plastiques renforcés: Détermination du comportement mécanique instantané

Essais de traction (4):



A plaquettes de renfort
B couches de tissu (protection du matériau contre les struts des pinces de traction)

(b) structure des talons de l'éprouvette de type IV
(6 couches de matériau)
Les cotes sont données en millimètres

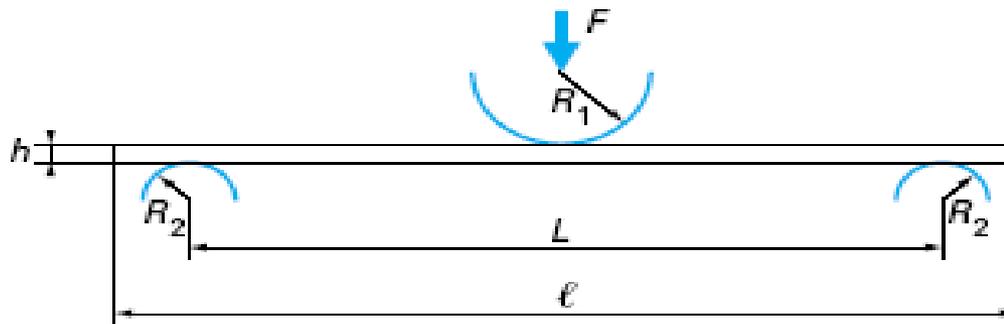
type IV, rectangulaire,
avec talons biseautés
pour les renforcements à
fibres continues
unidirectionnelles.

Essais des plastiques renforcés:

Détermination du comportement mécanique instantané

Essais de flexion trois pannes: la théorie des poutres permet d'exprimer: la contrainte normale, la contrainte de cisaillement interlaminaire, le module de flexion, la déformation en surface

$$\sigma_f = \pm \frac{3FL}{2bh^2} \quad \tau_{13} = \frac{3F}{4bh} \quad E_f = \frac{L^3}{4bh^3w} \frac{F}{L^2} \quad \varepsilon = 6 \frac{wh}{L^2}$$



F charge (en newtons),
 L distance entre appuis,
 h épaisseur,
 b largeur,
 w flèche de l'axe neutre.

[Rayon de pannes (mm)]	
R_1	5 - 0,2
R_2 pour $h \leq 3$ mm	2 - 0,2
R_2 pour $h > 3$ mm	5 - 0,2

h = paisseur de l prouvette

Essais des plastiques renforcés: Détermination du comportement mécanique instantané

Dimensions (en mm) des éprouvettes de flexion trois pannes, selon EN ISO 14125

Matériau	Longueur ℓ	Distance entre appuis L	Largeur b	Épaisseur h
I. Thermoplastiques renforcés de fibres coupés	80	64	10	4
II. Composites à base de DMC, BMC, SMC, et TRE renforcés de mats, tissus et mixtes	80	64	15	4
III. Composites <i>UD</i> (90°). Composites <i>UD</i> (0°) et multidirectionnels avec $5 < E_{f1}/G_{13} \leq 15$ (i.e. à fibres de verre)	60	40	15	2
IV. Composites <i>UD</i> (0°) et multidirectionnels avec $15 < E_{f1}/G_{13} \leq 50$ (i.e. à fibres de carbone)	100	80	15	2
Tolérances.....	- 0, + 10	± 1	± 0,5	± 0,2

E_{f1} : module de flexion dans le sens des fibres.

G_{13} : module de cisaillement interlaminaire.

pour des composites à fibres de verre type I ou II, on aura :

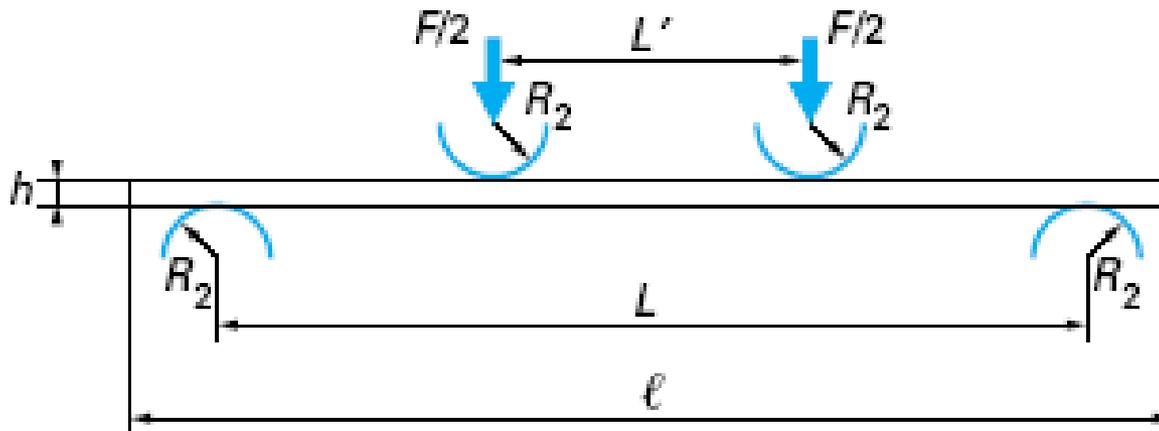
— pour $L/h \geq 16$, rupture en traction-compression ;

— pour $L/h < 5$, rupture en cisaillement interlaminaire.

Essais des plastiques renforcés: Détermination du comportement mécanique instantané

Pour éviter l'influence des contraintes de cisaillement (sur la déformée et le mécanisme de rupture) qui se superposent aux contraintes normales de flexion, on utilise quelquefois la méthode de **flexion quatre pannes** pour laquelle l'effort tranchant est nul dans la zone des contraintes maximales.

$$\sigma_f = \frac{FL}{bh^2} \quad E_f = \frac{0,21 L^3 F}{bh^3 w} \quad \varepsilon = 4,7 \frac{wh}{L^2}$$



Essais des plastiques renforcés: Détermination du comportement mécanique instantané

Dimensions (en mm) des éprouvettes de flexion quatre pannes, selon EN ISO 14125

Matériau	Longueur ℓ	Distance entre appuis extérieurs L	Distance entre appuis intérieurs L'	Largeur b	Épaisseur h
I. Thermoplastiques renforcés de fibres coupées ...	80	66	22	10	4
II. Composites à base de DMC, BMC, SMC et TRE renforcés de mats, tissus et mixtes	80	66	22	15	4
III. Composites UD (90°). Composites UD (0°) et multidirectionnels avec $5 < E_{f1}/G_{13} \leq 15$ (i.e. à fibres de verre)	60	45	15	15	2
IV. Composites UD (0°) et multidirectionnels $15 < E_{f1}/G_{13} \leq 50$ (i.e. à fibres de carbone).....	100	81	27	15	2
Tolérances.....	- 0, + 10	± 1	± 1	± 0,5	± 0,2

De manière à réduire les écarts, dans le cas de matériaux à renforts grossiers, une éprouvette de largeur 25 mm peut être utilisée.

E_{f1} module de flexion dans le sens des fibres.

G_{13} module de cisaillement interlaminaire.

- il faut un capteur de déplacement pour mesurer la flèche (la mesure du déplacement du plateau mobile de la machine ne convient pas) ;
- les flèches à la rupture sont très importantes (1 à 2 cm), ce qui nécessite une correction pour le calcul des contraintes ;
- la rupture intervient apparemment dans la zone centrale par délaminage, dû à un flambement des fibres dans la partie comprimée.

Essais des plastiques renforcés: Détermination du comportement mécanique instantané

Éprouvettes de flexion « hors normes » selon EN ISO 14125 : distance entre appuis et longueur en fonction de la classe des matériaux

Classe du matériau	Flexion trois pannes		Flexion quatre pannes	
	L/h	ℓ /h	L/h	ℓ /h
I	16	20	16,5	20
II	16	20	16,5	20
III	20	30	22,5	30
IV	40	50	40,5	50

–Éprouvettes de flexion « hors normes » selon EN ISO 14125 : largeur b (en mm) en fonction de l'épaisseur (en mm)

Épaisseur nominale	Classe I	Classe II à IV
$1 < h \leq 3$	25	15
$3 < h \leq 5$	10	15
$5 < h \leq 10$	15	15
$10 < h \leq 20$	20	30
$20 < h \leq 35$	35	50
$35 < h \leq 50$	50	80

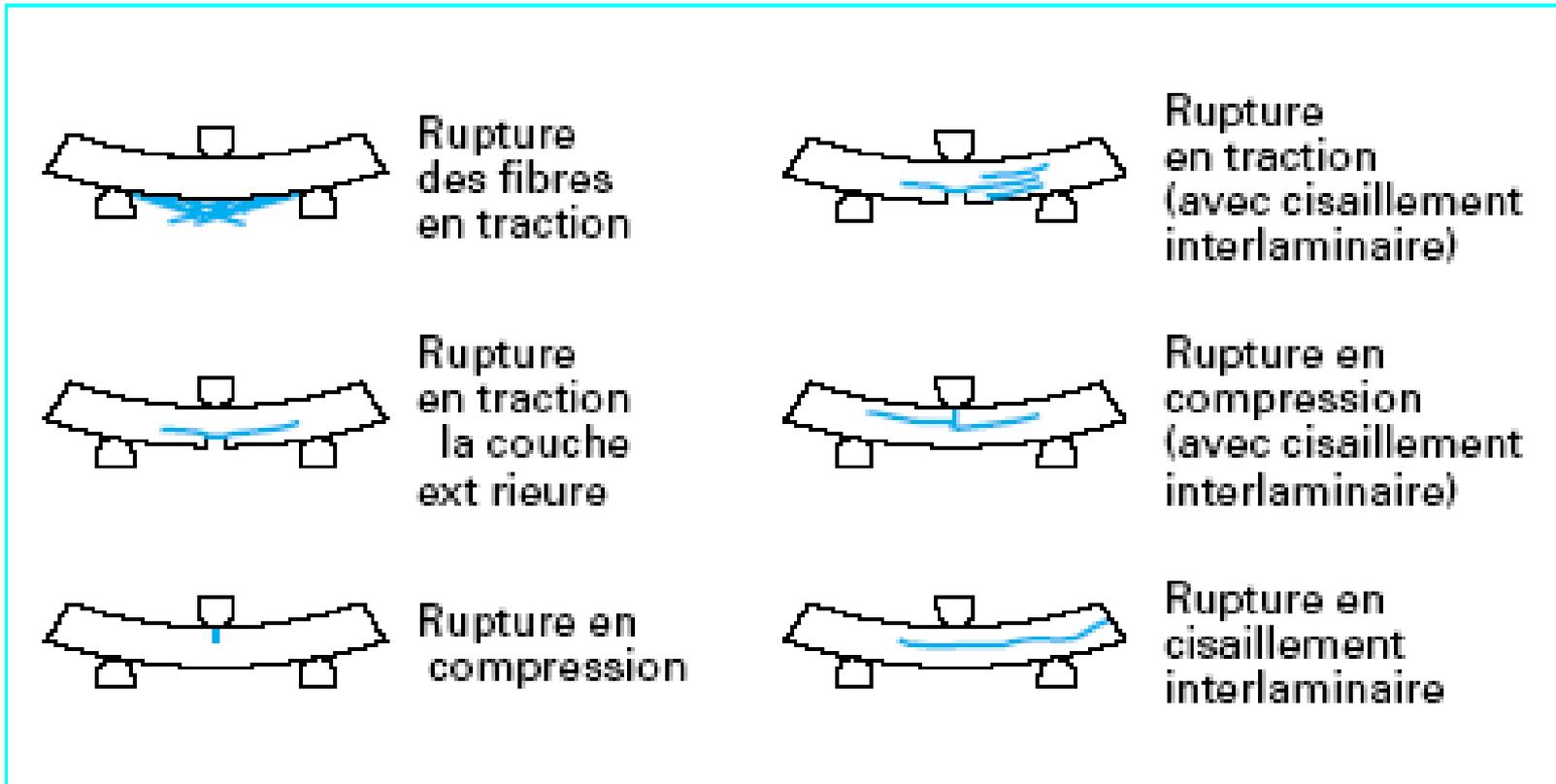
Essais des plastiques renforcés: Détermination du comportement mécanique instantané

Délaminage en flexion trois pannes (1):

Les plastiques armés, le plus souvent obtenus par empilement de couches, sont sujets au délaminage qui se traduit par une **décohésion des couches**. La résistance au délaminage est de l'ordre de 20 à 60 MPa ; elle dépend de la nature de la résine, de la liaison renfort/matrice, du type et du pourcentage de renfort. Pour apprécier quantitativement la résistance au délaminage, on peut appliquer des contraintes de cisaillement dans un plan perpendiculaire au plan des couches, par flexion trois pannes entre des appuis rapprochés : il s'agit de l'essai de cisaillement sur poutre courte SBS (Short Beam Shear) ou essai de résistance au cisaillement interlaminaire ILSS (Interlaminar Shear Strength). Une diminution de la distance entre appuis conserve l'effort tranchant, donc les contraintes de cisaillement, alors qu'elle réduit proportionnellement les contraintes normales. Comme il ne s'agit pas de cisaillement pur, la rupture peut intervenir selon différents modes

Essais des plastiques renforcés: Détermination du comportement mécanique instantané

Délaminage en flexion trois pannes (2):



Essai de délaminage en flexion trois pannes : modes de rupture

Essais des plastiques renforcés: Détermination du comportement mécanique instantané

Délaminage en flexion trois pannes (3): la **résistance** est donnée

$$\tau_{13} = 3F/(4bh)$$

où F est la force de rupture et b et h respectivement la largeur et l'épaisseur de l'éprouvette.

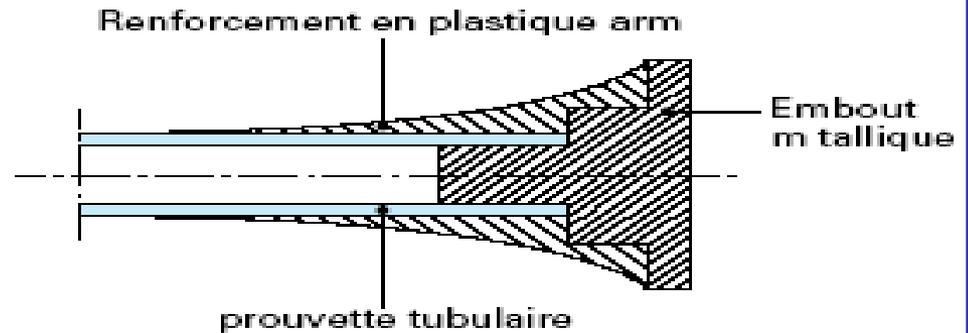
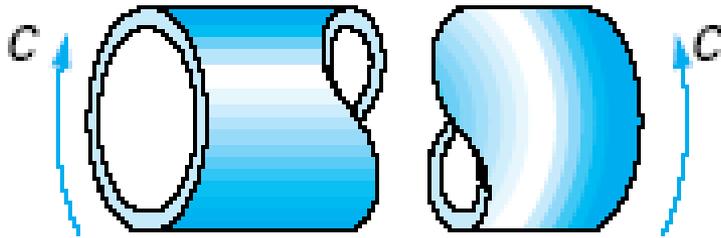
Le montage utilisé est celui de flexion trois pannes. La vitesse de sollicitation est de 1 mm/min. La distance entre appuis est fixée à 5 fois l'épaisseur ($5h$). Les dimensions des éprouvettes sont $10h$ pour la longueur et h pour la largeur (une épaisseur de 2 mm est préconisée).

— la contrainte de cisaillement n'est pas uniforme au sein de l'éprouvette (variation parabolique);

— les contraintes normales de flexion sont toujours présentes (quoique réduites par les appuis rapprochés), ce qui signifie que si la résistance en traction ou compression du matériau n'est pas suffisante, la rupture en cisaillement ne pourra pas être atteinte.

Essais des plastiques renforcés: Détermination du comportement mécanique instantané

Essai de torsion de tube (1)



Tête d'éprouvette pour essai de torsion

- la fixation d'embouts métalliques par collage avec un renforcement continu de plastique armé, surtout lorsque l'on désire aller jusqu'à la rupture
- une longueur utile suffisante (cinq fois le diamètre, par exemple) ;
- une mesure de déformation à l'aide de jauges de déformation dans la partie centrale, en deux points diamétralement opposés ;
- une loi de mise en charge bien définie car on observe souvent, pour ce type de sollicitation, un net comportement viscoélastique : c'est surtout la matrice qui se déforme.

Essais des plastiques renforcés: Détermination du comportement mécanique instantané

Essai de torsion de tube (2)

$$G_{12} = \frac{CL}{I\theta} \quad \text{avec } I = \frac{1}{2}\pi(r_e^4 - r_i^4) \quad \tau_{12} = \frac{2Cr_e}{\pi(r_e^4 - r_i^4)}$$

pour un tube de faible épaisseur $I = 2\pi R^3 h$ $\tau_{12} = \frac{C}{2\pi R^2 h}$

- θ angle de torsion,
- C couple de torsion,
- L longueur du tube,
- r_e rayon extérieur du tube,
- r_i rayon intérieur du tube,
- R rayon moyen du tube,
- h épaisseur du tube,
- I moment d'inertie.

Essais des plastiques renforcés: Détermination du comportement mécanique instantané

Essai de traction à $\pm 45^\circ$ (1):

L'essai de cisaillement par traction à $\pm 45^\circ$ est applicable à des composites symétriques et équilibrés à matrice thermodurcissable ou thermoplastique et à renforts tissés ou unidirectionnels, présentant des fibres orientées à $\pm 45^\circ$ par rapport à l'axe longitudinal de l'éprouvette. La méthode permet de déterminer à la fois la résistance au cisaillement plan, le module de cisaillement plan et la déformation de cisaillement du matériau sur la base d'un simple essai de traction.

La géométrie des éprouvettes (2 x 25 x 250 mm) avec talons (épaisseur 0,5 à 2 mm) est normalisée. Lors de l'essai conduit à une vitesse de 2 mm/min, les déformations longitudinale (ε_x) et transversale (ε_y) peuvent être mesurées au moyen de jauges de déformation ou d'un extensomètre bidirectionnel.

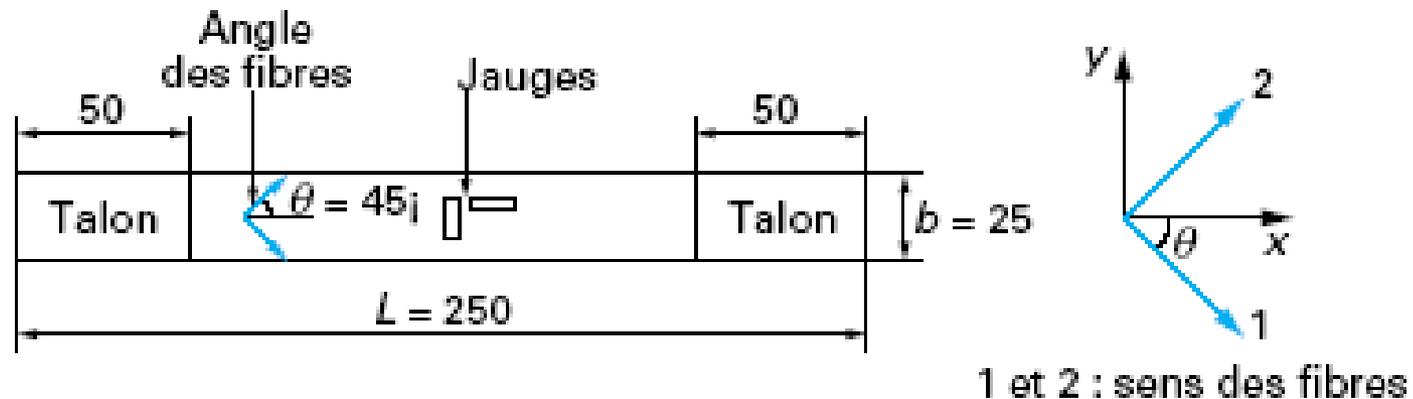
Essais des plastiques renforcés: Détermination du comportement mécanique instantané

Essai de traction à $\pm 45^\circ$ (2): $\tau_{12} = F/(2bh)$

F est la charge appliquée, b et h les largeur et épaisseur de l'éprouvette.

$$\gamma_{12} = \varepsilon_x - \varepsilon_y \quad G_{12} = \frac{\tau''_{12} - \tau'_{12}}{\gamma''_{12} - \gamma'_{12}}$$

τ'_{12} est la contrainte de cisaillement pour une déformation $\gamma'_{12} = 0,001$, τ''_{12} est la contrainte de cisaillement pour une déformation $\gamma''_{12} = 0,005$



Dimensions en millim tres

Essais des plastiques renforcés: Détermination du comportement mécanique instantané

Simple et double recouvrement (1):

Dans l'essai de flexion sur appuis rapprochés, la face supérieure de l'éprouvette au voisinage du poinçon est sollicitée en compression, et peut flamber. Pour pallier cet inconvénient, on peut déterminer la contrainte de cisaillement ou de délaminage en traction suivant les normes **ASTM D 3846** ou **BS 4994**.

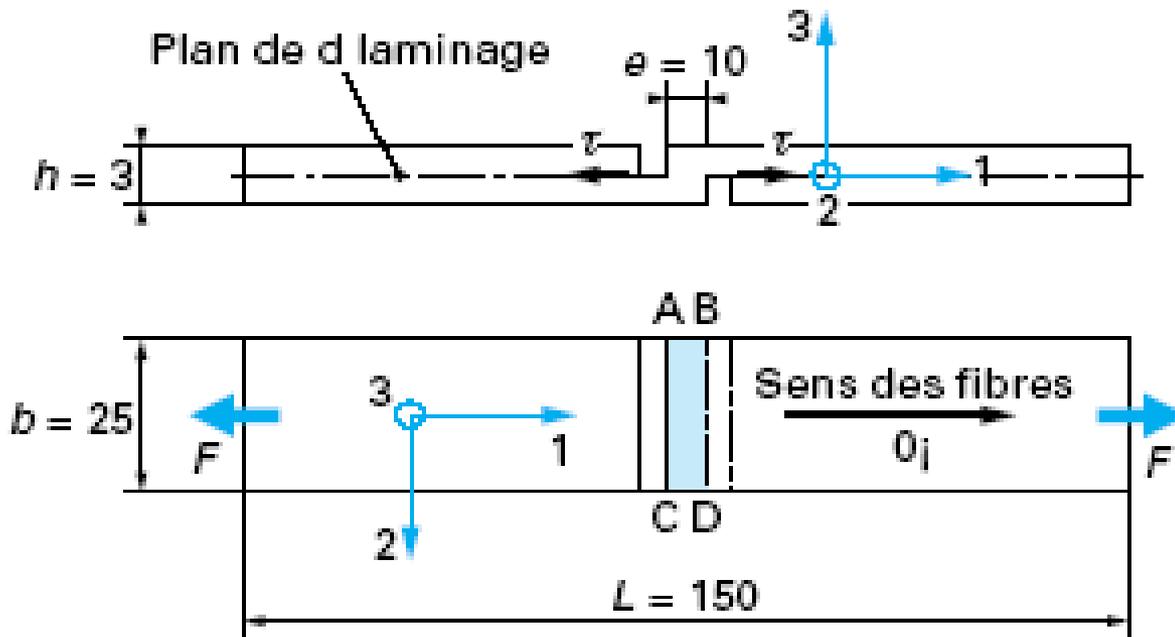
L'éprouvette à simple recouvrement, plate, d'épaisseur e , comporte deux entailles usinées au disque diamanté et de profondeur $h/2$. La difficulté de l'essai réside dans cet usinage, dont dépend la fiabilité et la reproductivité de l'essai. L'éprouvette est tirée lentement dans l'axe (vitesse $v < 5$ mm/min) jusqu'à rupture dans le plan de stratification suivant l'aire ABCD. La contrainte de cisaillement (par traction) est alors : $\tau_{13} = F/(be)$ où F est l'effort maximal appliqué et be la superficie de la zone cisailée.

Essais des plastiques renforcés: Détermination du comportement mécanique instantané

Simple et double recouvrement (2):

L'inconvénient majeur de l'essai de cisaillement sur éprouvette à simple recouvrement est l'**effet de flexion parasite** généré lors de la traction (éprouvette dissymétrique).

Le choix d'une **éprouvette** symétrique à **double recouvrement**, plus difficile à fabriquer en pratique, permet en théorie de régler le problème.



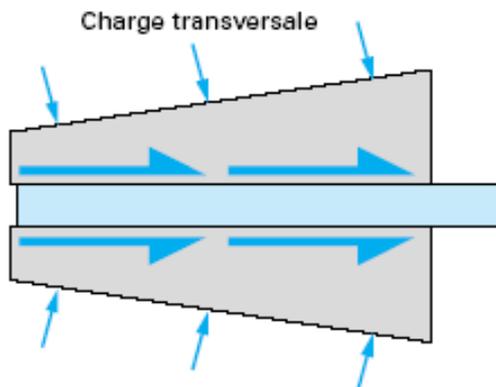
**Essai de délaminage
par simple
recouvrement, selon
NF T 57-554
(dimensions en mm)**

Essais des plastiques renforcés: Détermination du comportement mécanique instantané

Essais de compression (1)

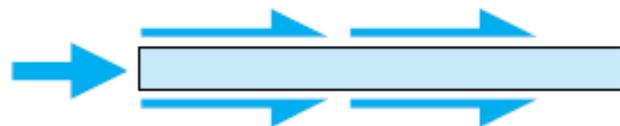


Chargement direct en bout



Charge transversale

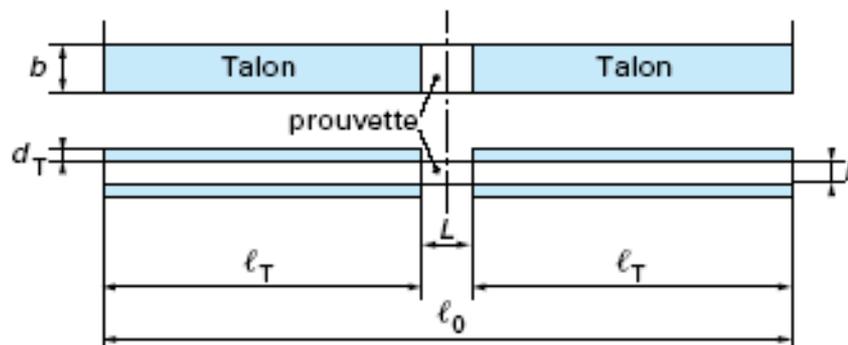
Chargement par cisaillement



Chargement mixte (direct + cisaillement)

Principes des différents modes de chargement en compression

Dimensions (mm)		Type A	Type B1	Type B2
Longueur totale minimale	ℓ_0	110 - 1	110 - 1	125 - 1
paisseur	h	2 - 0,2	2 10 - 0,2	≥ 4
Largeur	b	10 - 0,5	10 - 0,5	25 - 0,5
Distance entre talons	L	10	10	25
Longueur minimale des talons	ℓ_T	50	50	50
paisseur des talons	d_T	1	0,5 2 (si n cessaire)	0,5 2 (si n cessaire)



Caractéristiques des éprouvettes de compression selon EN ISO 14126

Essais des plastiques renforcés: Détermination du comportement mécanique instantané

Essais de compression (2):

La qualité des résultats dépend de la qualité dans la fabrication, la découpe et l'usinage des éprouvettes

— les talons sont fixés sur l'éprouvette à $\pm 45^\circ$, toutefois si une rupture des talons se produit à fortes charges aux extrémités, un collage des talons à $0/90^\circ$ est autorisé ;

— les éprouvettes sont usinées aux extrémités de manière à garantir un bon parallélisme des faces entre elles, une bonne symétrie et une bonne perpendicularité;

— la qualité de découpe des éprouvettes doit être vérifiée visuellement (pas d'amorces, d'entailles, de marque...) et au moyen de micromètres et d'équerres (pas de torsion, paires de côtés parallèles et perpendiculaires).



(a) cisaillement plan



(b) rupture complexe



(c) cisaillement interlaminaire



(d) clivage



(e) d laminage

Essais de compression : modes de rupture, selon EN ISO³14126

Essais des plastiques renforcés: Détermination du comportement mécanique instantané

Essais de compression (3):

L'enregistrement des lois de comportement permet de calculer la **contrainte de compression** $\sigma_{C_{max}}$ et le module de compression E_c :

$$\sigma_{C_{max}} = \frac{F_{max}}{bh} \quad \text{et} \quad E_c = \frac{\sigma'' - \sigma'}{\varepsilon'' - \varepsilon'}$$

F_{max} charge maximale,

b largeur,

h épaisseur,

σ' contrainte de compression pour un allongement $\varepsilon' = 0,0025$,

σ'' contrainte de compression pour un allongement $\varepsilon'' = 0,0005$.

Une légère flexion de l'éprouvette est admissible dans la mesure où, tout au long de l'essai, les déformations longitudinales ε_{11a} et ε_{11b} sur les faces a et b de l'éprouvette respectent l'inéquation suivante :

$$\left| \frac{\varepsilon_{11\beta} - \varepsilon_{11\alpha}}{\varepsilon_{11\beta} + \varepsilon_{11\alpha}} \right| \geq 0$$

Essais des plastiques renforcés: Détermination du comportement mécanique instantané

Essais de compression - Flexion sandwich (1)

La flexion quatre pannes de poutres sandwichs peut être utilisée comme substitut aux méthodes classiques de traction et de compression. Son principe repose sur le fait qu'une poutre sollicitée en flexion subit des efforts de traction sur sa partie convexe et des efforts de compression sur sa partie concave. En conséquence, dans le cas d'une poutre sandwich, si la peau tendue est rendue plus résistante que la peau comprimée, un mode de rupture en compression sera privilégié. Le rôle de l'âme (nid-d'abeilles) est à la fois de maintenir l'écartement entre les deux peaux et d'éviter le flambement de la peau comprimée. La résistance en compression s'exprime

$$\sigma = \frac{F \ell}{2bh \left(e + \frac{h+H}{2} \right)}$$

F charge maximale appliquée, e épaisseur de l'âme,
b largeur, h épaisseur de peau de composite
H épaisseur de la peau opposée,
l longueur du bras de levier.

Essais des plastiques renforcés: Détermination du comportement mécanique instantané

Essais de compression - Flexion sandwich (2)

Il s'agit néanmoins d'un essai peu utilisé en pratique

- les éprouvettes sont de très grande taille (560 x 25 x h mm) et « consomment » donc beaucoup de matériau ;
- leur fabrication est coûteuse et nécessite la maîtrise des techniques de mise en oeuvre des âmes nid-d'abeilles et de collage des peaux (constituées de 6 couches orientées à 0°) ;
- des doutes sont émis quant aux effets parasites potentiels de renforcement dus à la présence d'une âme collée aux peaux sur toute leur longueur.

Essais des plastiques renforcés: Détermination du comportement mécanique instantané

Essais de choc (1)

L'**essai de choc Charpy** présente par exemple quelques différences importantes par rapport aux modalités générales :

- la longueur des éprouvettes est fixée en fonction du type de rupture que l'on désire mettre en évidence; on impose un rapport D/h de la distance entre appuis à l'épaisseur de l'éprouvette; ce rapport est fixé à 20 pour les ruptures longitudinales, à 6 ou 8 pour les ruptures tangentielles par cisaillement ;
- les éprouvettes ne sont pas entaillées ;
- la résistance au choc est représentée par l'énergie de rupture rapportée au volume des éprouvettes entre appuis.

Pour l'**essai de choc Izod**, les dimensions préconisées pour les éprouvettes sont de 80 x 10 x 4 mm.

Essais des plastiques renforcés: Détermination du comportement mécanique instantané

Essais de choc (2):

des **essais de choc biaxial (instrumenté ou non) sur plaque** sont préférés par chute d'un percuteur d'une hauteur donnée. Il est ainsi possible d'obtenir la loi de comportement force/flèche (ou force/temps) et de mesurer la vitesse du percuteur au cours de l'impact. La réponse du matériau dépend de très nombreux facteurs (dont certains liés à l'équipement d'essai), et les résultats issus de chocs d'énergie donnée à différentes vitesses peuvent être très différents. L'endommagement résultant d'un essai de choc peut être mesuré par des techniques d'imagerie non destructive (de type C-Scan). Les chutes de performances mécaniques sont généralement mesurées par un essai de compression après impact.

Essais des plastiques renforcés: Détermination du comportement mécanique instantané

Essais de dureté

La norme **NF T 57-106** fixe les modalités de cet essai de résistance à l'enfoncement d'une pointe sous l'action d'une charge normalisée. L'appareil correspondant (**duromètre Barcol** n° 934.1) est très utilisé, tant en laboratoire que sur chantier, pour vérifier les propriétés de surface, notamment le **degré de réticulation des résines**. Des résultats assez dispersés sont parfois notés, dont la cause est la présence de charges en surface ou le caractère viscoélastique de la matrice. Dans ce dernier cas, les lectures seront faites à un temps défini après application de la charge.

Essais des plastiques renforcés:

Détermination du comportement mécanique à long terme

des essais à long terme qui tiennent compte des contraintes mécaniques, chimiques, thermiques sont intéressants pour déterminer des caractéristiques de conception telles que le **module de fluage**, les **résistances en fatigues statique et dynamique**, avec immersion ou non en milieu liquide. Les plastiques renforcés donnent lieu à des mécanismes d'endommagement plus complexes, notamment en raison de leur caractère hétérogène qui engendre des facteurs d'influence complémentaires tels que l'interface fibre/matrice.

— les essais mécaniques instantanés à des températures plus élevées que la température d'utilisation (**accélération du vieillissement**) ;

— les essais de fatigue statique (**fluage**) en flexion, traction, etc., à différentes températures ;

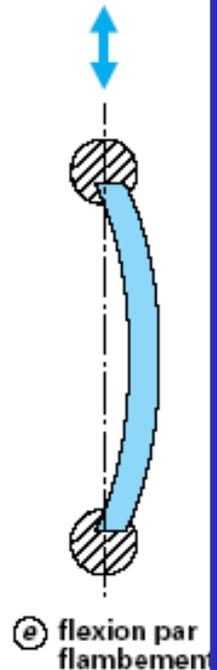
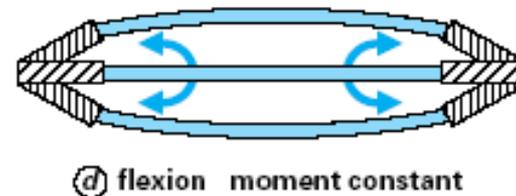
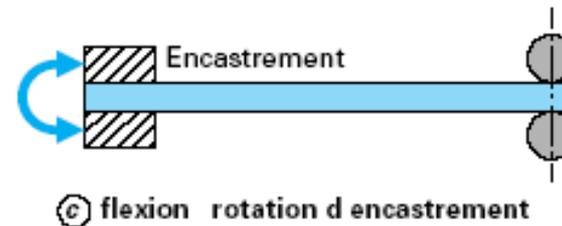
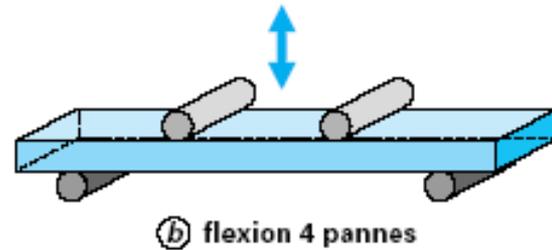
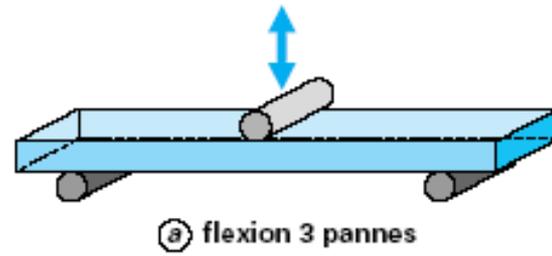
— les essais de **fatigue dynamique** ondulée, répétée ou alternée en traction, flexion, torsion, etc., à différentes températures ;

— les essais de fissuration sous contrainte (**corrosion sous tension**) en milieux liquides.

Essais des plastiques renforcés:

Détermination du comportement mécanique à long terme

La 1ère méthode permet de réaliser des essais de **fatigue en flexion trois ou quatre pannes** sur des composites ne présentant pas une forte propension au fluage. L'essai consiste à solliciter en flexion ondulée au moyen d'une panne centrale possédant 1 ou 2 appuis cylindriques, une éprouvette parallélépipédique reposant sur deux appuis cylindriques libres en rotation. L'essai s'effectue soit à amplitude de flèche imposée, en suivant à chaque cycle l'évolution de la force associée, soit à amplitude de force imposée en suivant à chaque cycle l'évolution de la flèche imposée.



Essais des plastiques renforcés: Détermination du comportement mécanique à long terme

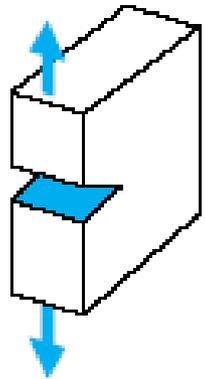
La 2ème méthode permet de réaliser des essais de **fatigue en flexion sur des éprouvettes encastrées** de plastiques renforcés ou non, à l'exception des matériaux composites unidirectionnels. Le principe de cette méthode consiste à imposer une flexion à partir de la rotation de l'extrémité encastrée de l'éprouvette tout en astreignant l'extrémité « libre » à se déplacer entre deux appuis fixes. La déformation (ou la force) imposée à l'éprouvette est directement liée à l'angle de rotation de l'encastrement. Cet essai se distingue des essais de flexion trois et quatre pannes par le fait que le chargement et le déchargement sont imposés à l'éprouvette. L'essai peut s'effectuer soit à amplitude de déformation imposée, soit à amplitude de force imposée.

L'essai en **flexion à moment constant** consiste à solliciter en flexion pure alternée (rapport de sollicitation $R = 1$) une éprouvette en forme d'haltère, bridée à ses deux extrémités. L'essai s'effectue à amplitude de déplacement constant par la rotation de ses deux systèmes de bridage.

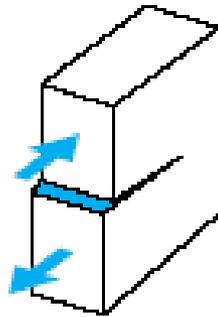
Essais des plastiques renforcés: Détermination du comportement mécanique à long terme

la 4ème méthode permet de réaliser des essais en **fatigue en flexion par flambement**, donc sans appui central, sur des plastiques renforcés ou non. L'essai est réalisé sur des éprouvettes non encastées, dont les extrémités sont libres en rotation. Il consiste à solliciter en **flexion ondulée** ($R > 0$) sans appui central à amplitude de déplacement imposée, une éprouvette parallélépipédique bi-articulée à fort élancement. Un effort de **compression** est exercé sur l'éprouvette de façon à atteindre un point d'instabilité élastique, bien avant l'apparition d'une quelconque dégradation sous l'effet des contraintes de compression. Cette instabilité se traduit par un fléchissement de grande amplitude qui place alors l'éprouvette dans un état de flexion pur. Cette technique d'essai est particulièrement adaptée à la caractérisation en fatigue des matériaux à matrice ductile sensibles aux effets de poinçonnement des essais en flexion trois et quatre pannes et des matériaux présentant une forte propension au fluage.

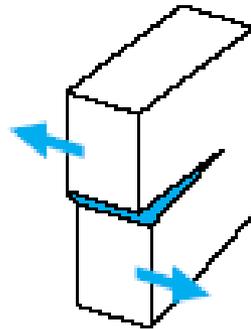
Essais des plastiques renforcés: Essais de mécanique de la rupture



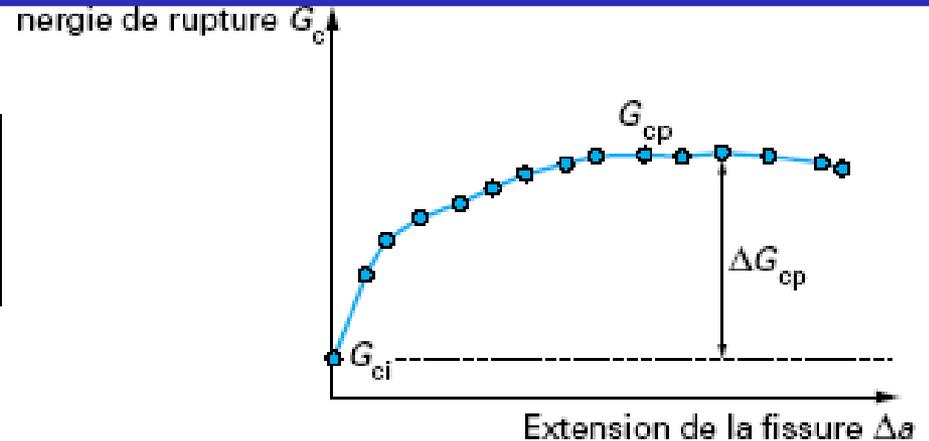
Mode I



Mode II



Mode III



G_c : taux critique de restitution d'énergie élastique

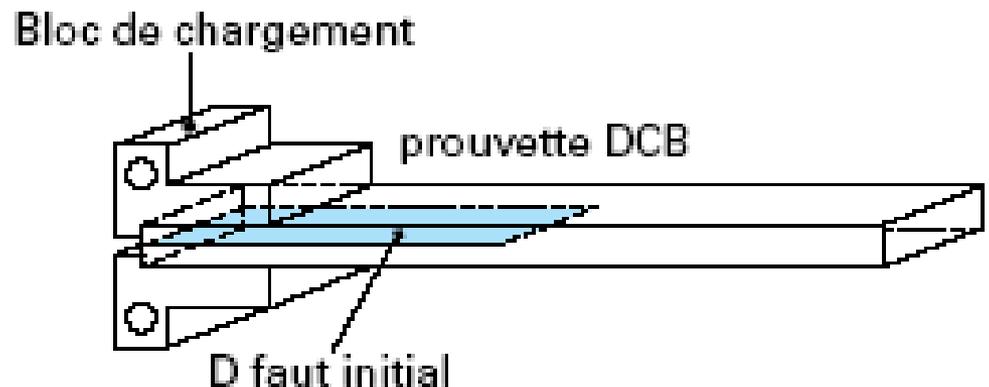
indice p : propagation
indice i : initiation

La mécanique linéaire élastique de la rupture permet de caractériser expérimentalement la **résistance à la fissuration** (encore appelée ténacité) en étudiant l'évolution du **taux critique de restitution d'énergie élastique G_c** (en fait, une énergie de rupture) (ou l'évolution d'une grandeur « mécanique » analogue, le facteur critique d'intensité de contraintes K_{Ic}). Les résultats des essais peuvent s'exprimer sous forme de courbes de résistance (dites « courbes R »), sur lesquelles apparaissent deux grandeurs caractéristiques, les énergies d'amorçage G_{ci} et de propagation ΔG_{cp}

Essais des plastiques renforcés: Essais de mécanique de la rupture

Le principe des **essais de mécanique de la rupture en mode I** est de solliciter en traction une éprouvette **DCB** (Double Cantilever Beam) via des blocs de chargement ou des charnières à une vitesse constante contrôlée, et de suivre les mécanismes d'amorçage et de propagation de fissures à partir d'un insert non adhésif (film d'amorçage) ou d'une préfissure préalablement créée en mode I. Il existe différentes méthodes d'analyse des résultats expérimentaux. De manière simplifiée selon la théorie des poutres, en faisant abstraction des facteurs correctifs de grande ouverture, de rotation et de renforcement dû aux blocs de chargement, la détermination du **taux critique de restitution d'énergie élastique en mode I** (G_{IC}) nécessite la connaissance de la charge appliquée F , de l'ouverture d et de la longueur de fissure a correspondantes, b est la largeur de l'éprouvette

$$G_{Ic} = \frac{3\delta F}{2ab}$$



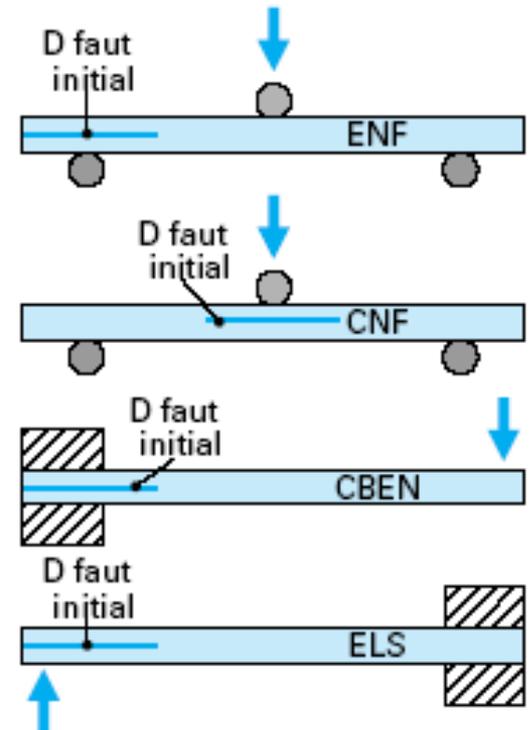
Essais des plastiques renforcés: Essais de mécanique de la rupture

Les **essais de mécanique de la rupture en mode II** de matériaux composites permet de déterminer la **résistance au délaminage de composites unidirectionnels à renfort carbone** en flexion trois points au moyen d'éprouvettes de type **ENF** (End Notched Flexure). Dans ce cas, le **taux critique de restitution d'énergie élastique en mode II** G_{IIc} s'exprime par :

$$G_{IIc} = \frac{9 F \delta a^2}{2b(2D^3 + 3a^3)}$$

F charge appliquée, d flèche correspondante,
a longueur de fissure correspondante,
b largeur de l'éprouvette, D distance entre appuis.

- **ENF** (End Notched Flexure).
- **ELS** (End Loaded Split) ;
- **CBEN** (Cantilever Beam Enclosed Notch) ;
- **CNF** (Center Notched Flexure).

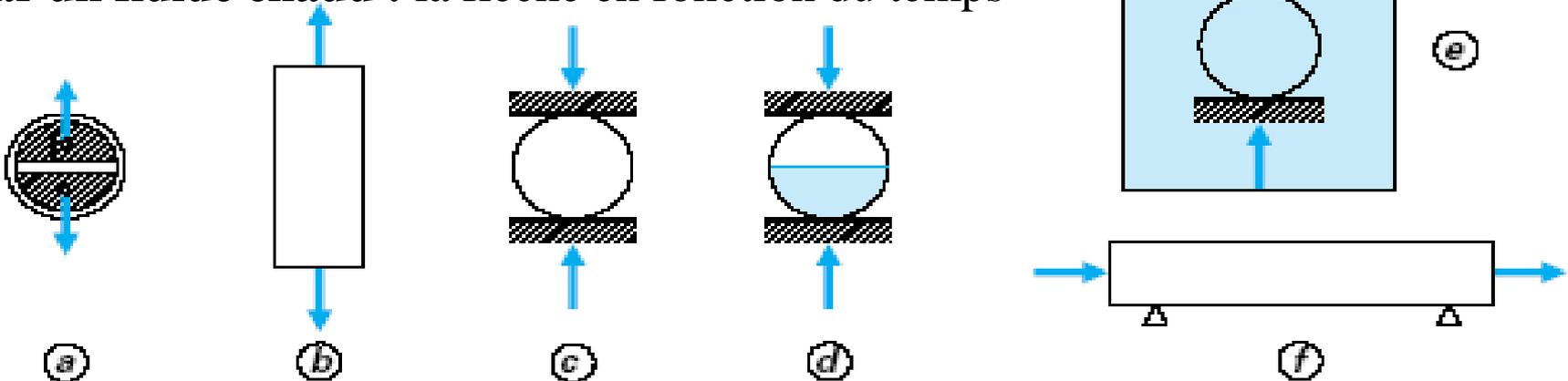


Essais des plastiques renforcés:

Essais sur tubes et anneaux

Essais sur tubes - les essais sous sollicitation simple:

- a) **traction sur anneau avec demi-disques**: la résistance circonférentielle
- b) **traction longitudinale**: le module d'Young, la résistance, l'allongement
- c) **flexion par crasement sous charge transversale**: la rigidité, la résistance annulaire, seuils d'endommagement
- d) **résistance chimique sous d formation constante**: courbes de durée de vie, déformations - temps de rupture
- e) **résistance chimique sous d formation constante en immersion totale**: courbes de durée de vie, déformations - temps de rupture
- f) **fluage en flexion entre appuis de tubes parcourus par un fluide chaud**: la flèche en fonction du temps



Essais des plastiques renforcés:

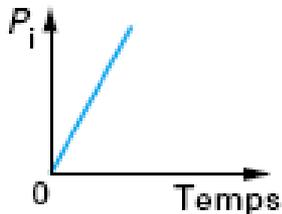
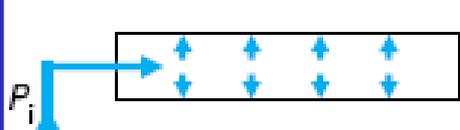
Essais sur tubes et anneaux

Essais sur tubes - les essais sous sollicitation biaxiale

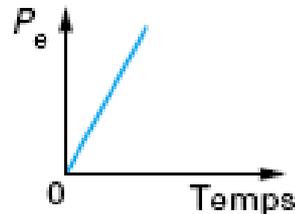
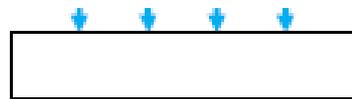
g) rupture instantanée sous pression interne P_i avec et sans effet de fond : la résistance circonférentielle

h) rupture instantanée sous pression externe P_e avec et sans effet de fond (résistance au flambage d'éléments de tubes, résistance en compression d'éprouvettes cylindriques)

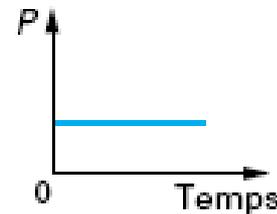
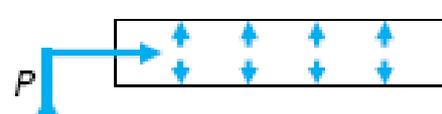
i) résistance long terme par extrapolation des courbes 100 000 h: **durée de vie sous pression constante** : courbes de durée de vie, contrainte circonférentielle vs du temps de rupture (endommagement), **durée de vie sous pression cyclique** : courbe de durée de vie, contrainte circonférentielle vs du nombre de cycles la rupture



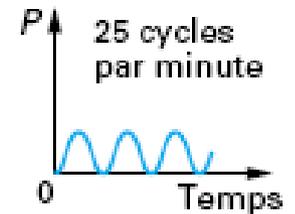
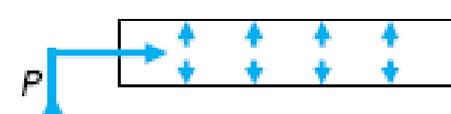
g



h



i



j

Essais des plastiques renforcés:

Essais sur tubes et anneaux

Essais sur tubes:

On détermine ainsi des résistances instantanées, longitudinales et circonférentielles, en traction, en compression, en flexion, au flambement, mais surtout des **courbes de durée de vie** à différentes T°C sous pression interne. Ces courbes sont le plus utilisées en pratique, car elles permettent, avec des techniques d'extrapolation de prévoir le comportement durant des temps correspondant aux temps d'utilisation.

Ces essais permettent d'obtenir des données qui intègrent les propriétés du matériau, la géométrie des tubes, les conditions de mise en oeuvre et d'utilisation ; Ces essais nécessitent des moyens performants et onéreux si l'on veut couvrir tout le champ des applications industrielles, avec des diamètres allant de quelques centimètres à plusieurs dizaines de centimètres et des pressions de rupture allant de quelques dixièmes à plusieurs dizaines de mégapascals (1 MPa = 10 bar).

Essais des plastiques renforcés:

Essais sur tubes et anneaux

Essais sur anneaux (Nol ring):

Des essais ont été mis au point pour étudier l'**adhérence verre-résine**, la résistance des fibres et l'influence des paramètres de mise en oeuvre en enroulement filamentaire. Les dimensions moyennes des éprouvettes sont de 150 mm pour le diamètre, 6 mm pour la largeur, 3 mm pour l'épaisseur. Les différentes sollicitations appliquées sont les suivantes :

- pression interne jusqu'à éclatement ;
- traction par l'intermédiaire d'un disque fendu ;
- flexion ;
- pression externe ;
- compression ;
- cisaillement.

Du fait de la courbure des éprouvettes et de leur faible largeur, ces essais ne sont pas toujours très significatifs, mais ils peuvent être effectués avec un équipement classique (machine de traction).