

# ÉPREUVE COMMUNE DE TIPE 2007 - Partie D

## Propriétés mécaniques en traction de fils textiles

Temps de préparation : .....2 h 15 minutes  
Temps de présentation devant le jury : .....10 minutes  
Entretien avec le jury : .....10 minutes

### GUIDE POUR LE CANDIDAT :

Le dossier ci-joint comporte au total : 12 pages

- Document principal (11 pages)
- Documents complémentaires (1 page)

Travail suggéré au candidat :

Après avoir rappelé brièvement l'objectif du dossier, le candidat pourra par exemple :

- détailler le principe des essais permettant de décrire le comportement en traction des fils textiles,
- établir des comparaisons entre les différentes matières composant les fils textiles,
- relever les difficultés liées aux spécificités des matériaux composés de fibres.

### CONSEILS GENERAUX POUR LA PREPARATION DE L'EPREUVE :

- \* Lisez le dossier en entier dans un temps raisonnable.
- \* Réservez du temps pour préparer l'exposé devant le jury.

- Vous pouvez écrire sur le présent dossier, le surligner, le découper ... mais tout sera à remettre au jury en fin d'oral.
- En fin de préparation, rassemblez et ordonnez soigneusement TOUS les documents (transparents, etc.) dont vous comptez vous servir pendant l'oral, ainsi que le dossier, les transparents et les brouillons utilisés pendant la préparation. En entrant dans la salle d'oral, vous devez être prêts à débiter votre exposé.
- A la fin de l'oral, vous devez remettre au jury le présent dossier, les transparents et les brouillons utilisés pour cette partie de l'oral, ainsi que TOUS les transparents et autres documents présentés pendant votre prestation.

Les essais de caractérisation d'un matériau ont pour but d'étudier sa réponse aux différentes sollicitations auxquelles il peut être soumis lors de son utilisation.

La méthode employée consiste à étudier les relations de cause à effets qui existent entre des variables physiquement accessibles. Dans les essais de traction sur fils textiles, qui font  
5 l'objet de ce document, les variables sont les suivantes : déplacement, force, temps.

Le comportement mécanique global d'un fil est le résultat d'une intégration ou du calcul de la moyenne de variables microscopiques. Cependant, la modélisation des mécaniques de déformation et de rupture du matériau aux échelles atomiques et moléculaires n'est pas évidente, et il faut définir un ordre de grandeur de taille raisonnable d'éléments de volume  
10 représentatifs du matériau pour approcher réellement son comportement.

Lorsque le matériau étudié est un fil, sa solidité, ou sa résistance à la traction ou à la rupture, s'exprime par la charge qui provoque la rupture de ce fil. Pour résoudre le problème de comparaison entre fils de différentes sections, on introduit la notion de contrainte, définie  
15 comme étant le rapport entre la force et l'aire de section droite :

$$\text{Contrainte (Pa)} = \frac{\text{Force (N)}}{\text{Section (m}^2\text{)}} \quad (\text{équation 1})$$

Pour des fils métalliques, on peut exprimer cette grandeur en Newton par mm<sup>2</sup> ou cm<sup>2</sup> de section. Un fil textile est, quant à lui, généralement constitué de longs filaments ou de fibres courtes tordues entre elles. Tordues ensemble, ces fibres s'enroulent en prenant une forme  
20 hélicoïdale, de façon qu'étant comprimées les unes contre les autres, elles ne peuvent plus glisser. Bien entendu, pour pouvoir être « filées », c'est-à-dire transformées en fil, les fibres doivent posséder des propriétés déterminées : longueur suffisante, finesse, solidité, élasticité, flexibilité, régularité, ... Dans la mesure où elles réunissent ces différentes propriétés, des fibres déterminées pourront être transformées en fil plus ou moins fin, solide et régulier. Un  
25 fil peut être composé d'un seul filament de polymère synthétique utilisé seul, on parle alors de « mono-filament ». Il peut être composé en plusieurs brins parallèles ou retordus, formant ainsi un « multi-filaments ». Un mono-filament est plus rigide, à diamètre égal, qu'un multi-filaments. La torsion exerce une influence extrêmement importante sur les diverses propriétés d'un fil et fournit aussi le moyen, pour une finesse de fil donnée et une matière déterminée, de  
30 doter un fil de propriétés mécaniques (solidités) déterminées. Par exemple, si l'on veut filer un fil « lâche » pour fabriquer un T-shirt au moyen de coton long et fin, on devra lui donner une très faible torsion ; au contraire, pour fabriquer un fil solide et « dur » avec la même matière, on devra tordre les fibres davantage.

Dans le cas de fils textiles, on est amené à définir les propriétés mécaniques de traction par  
35 unité de masse linéaire et non par unité de surface de la section, car les fils textiles, bien  
qu'ayant généralement une section circulaire, sont généralement compressibles. Ceci rend très  
difficile la mesure de leur diamètre.

Cependant, comme la finesse d'un fil dépend du rapport de sa masse à sa longueur, et comme  
la longueur et la masse peuvent toujours être mesurées avec précision, il est commode  
40 d'exprimer la finesse d'un fil ou d'une fibre par une indication de la masse relative à la  
longueur. On utilise donc comme unité *le poids en gramme par kilomètre*. Cette grandeur  
s'appelle « titre » et s'exprime en « Tex ». C'est une unité standard du Système International.

$$\text{Titre (tex)} = 1000 \times \frac{\text{Masse (g)}}{\text{Longueur (m)}} \quad (\text{équation 2})$$

30 tex signifie par exemple que 1000 mètre de fil de ce titre ont une masse de 30 g.

45 Outre l'unité principale, tex, on peut utiliser selon les besoins des multiples ou des divisions  
décimales : millitex, décitex, kilotex, ... On définit ainsi, pour caractériser le comportement  
en traction de fils textiles, la notion de « charge spécifique » ou « ténacité spécifique » en  
utilisant la masse linéique, ou « titre ».

On a donc, pour la notion de contrainte définie précédemment, et pour le cas des fils textiles :

$$50 \quad \text{Charge spécifique (N/tex)} = \frac{\text{Charge}}{\text{Titre}} \quad (\text{équation 3})$$

On peut aussi, exprimer la charge appliquée au fil simplement en Newton.

Un autre paramètre parfois employé est « la longueur de rupture », définie comme la longueur  
en Km du fil, nécessaire pour qu'il se rompe sous l'effet de son propre poids.

Les essais de caractérisation du comportement des fils textiles en traction se font  
55 fréquemment à vitesse **constante** d'allongement de l'éprouvette de longueur initiale  $L_0$ .  
L'appareillage d'essai utilisé est un appareillage dans lequel l'une des extrémités de  
l'éprouvette est maintenue par une pince fixe et l'autre par une pince mobile déplacée à  
vitesse constante (Cf. figure 1 ci-dessous). Dans le cas d'essais classiques sur fils textiles,  
l'éprouvette d'essai mesure  $500 \text{ mm} \pm 1 \text{ mm}$ . Un prélèvement sur bobine de fil d'une longueur  
60 totale de 1000 mm facilite la manipulation du fil et la conservation de la torsion. Une tension  
préalable de  $0,5 \text{ cN/tex} \pm 0,1 \text{ cN}$  est appliquée au fil afin d'éliminer l'éventuelle frisure du fil,  
mais sans déjà l'étirer. La vitesse de déplacement de la pince mobile doit être égale à  
250 mm/min, à 2% près.

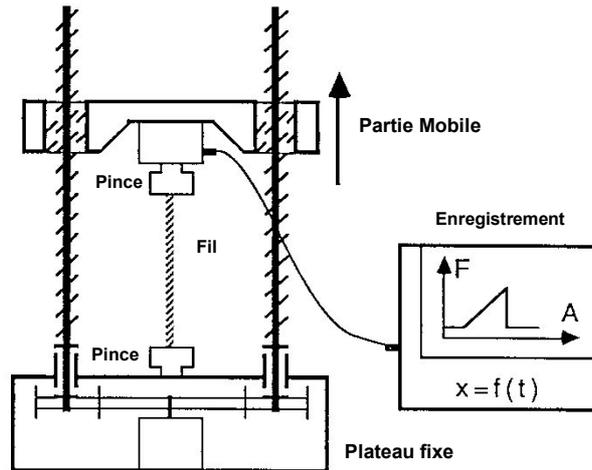


Figure 1 : Machine d'essai de traction de fils

65

On constate que les valeurs comme la contrainte spécifique et l'allongement à la rupture ne sont pas toujours suffisantes pour fournir une bonne indication du comportement en traction : deux fils complètement différents peuvent avoir la même contrainte spécifique et le même allongement de rupture, mais produire deux courbes totalement différentes. Il est plus intéressant d'étudier alors le comportement du fil au cours de l'essai, grâce à l'analyse complète de la courbe contrainte spécifique/allongement (ou force/allongement). Une autre possibilité consiste à calculer l'énergie nécessaire pour rompre le fil. Ce type de calcul consiste à mesurer la surface se trouvant sous la courbe force/allongement depuis le début, jusqu'au point final (rupture du fil). On peut aussi calculer un Indice de travail, qui se calcule de la façon suivante :

75

$$ITR = 1/2 (\text{Charge spécifique de rupture}) \times (\text{Allongement de rupture}) \quad (\text{équation 4})$$

### Analyse des courbes force/allongement

La courbe force/allongement peut être découpée en plusieurs zones comme le montre la figure ci-dessous (figure 2).

80

**Zone a** : tant que  $F$  est inférieur à  $F_i$ , la fibre n'est pas parfaitement tendue entre les pincettes.

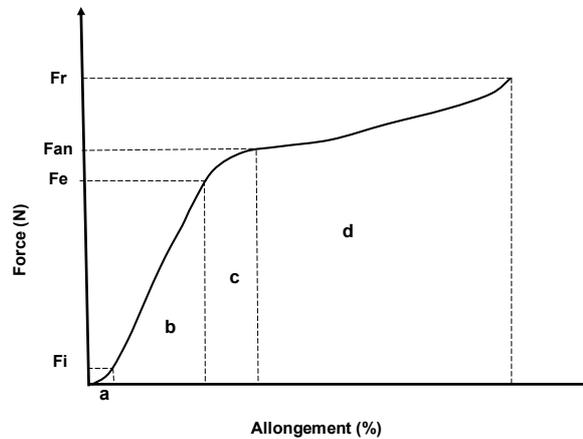
**Zone b** : zone linéaire, située entre  $F_i$  et  $F_e$ . Dans cette zone, la déformation est réversible. En mécanique, la réversibilité de la déformation est dénommée élasticité et on considère que tout matériau connaît une limite de déformation en dessous de laquelle il est élastique.

85

**Zones c** : zone non linéaire qui peut présenter un coude. Dans cette zone, la déformation est élastique mais non linéaire.

**Zone d** : Dans cette zone, qui se prolonge jusqu'à la rupture, des déformations permanentes apparaissent. On qualifie de plastique la déformation permanente qu'il subit et la limite des déformations irréversibles est appelée seuil de plasticité.

90



*Figure 2 : courbe force/allongement pour un fil textile*

Sur la figure ci-dessous (figure 3), la « récupération élastique » en déformation est calculée par :

95

$$100 \cdot \frac{A'B}{OA'} \quad (\text{équation 4})$$

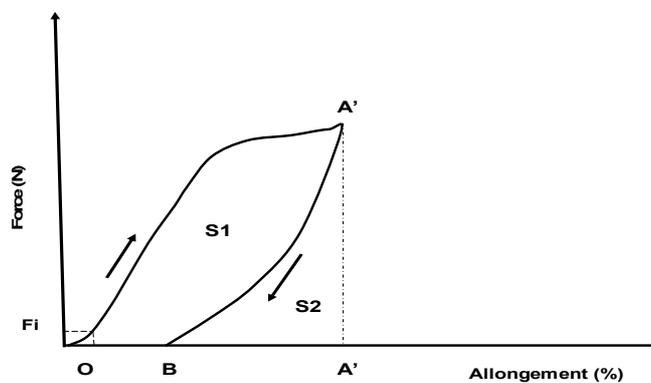
et la récupération élastique en travail par :

$$100 \cdot \frac{\text{travail récupéré}}{\text{travail fourni}} \quad (\text{équation 5}).$$

Le segment OB, représentant la déformation permanente du fil.

Le principal problème de l'utilisateur de fils textiles est de déterminer le seuil de réversibilité, afin de ne pas se mettre en situation d'introduire des déformations permanentes dans la structure.

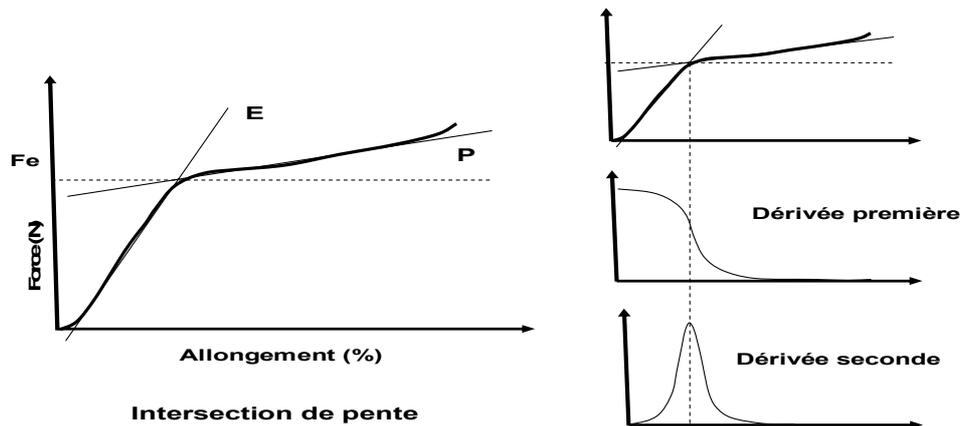
100



*Figure 3 : courbe force/allongement pour un fil textile*

Les spécialistes du textile définissent conventionnellement la limite d'élasticité  $F_e$ , comme  
 105 l'intersection des deux droites de pente E et P des portions les plus linéaires avant et après le  
 seuil (coude) (Cf. figure 4).

Une méthode, utilisée dans le domaine « lainier » (domaine qui étudie la fibre de laine),  
 consiste à prendre pour seuil élastique, l'extremum de la valeur de la dérivée seconde  $d^2F/d\varepsilon^2$ ,  
 $\varepsilon$  représentant l'allongement.

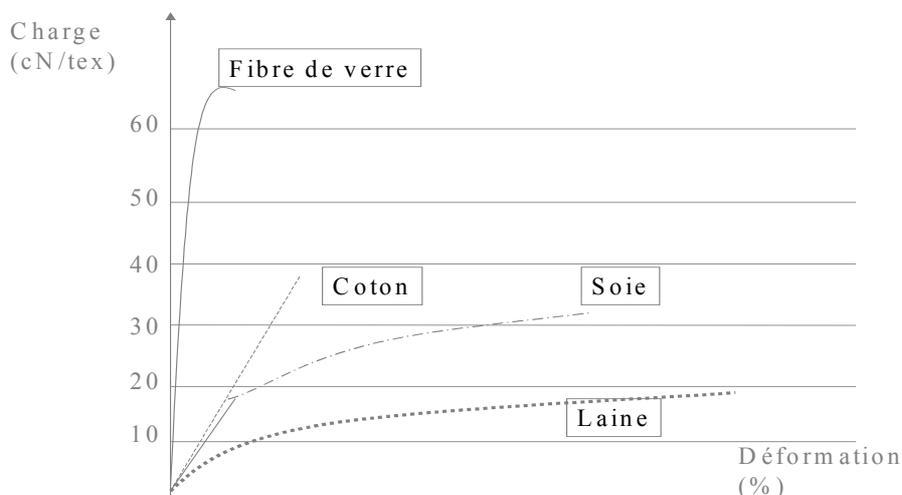


110

*Figure 4 : caractérisation du seuil d'élasticité dans un essai de traction d'un fil textile*

Pour d'autres fils que les fils textiles, la limite d'élasticité peut être définie pour une valeur  
 d'allongement fixée (0,2 ou 0,02 % par exemple).

La ténacité du fil dépend de sa « ductilité » (capacité d'un matériau à se déformer sans se  
 115 rompre), caractérisée par l'allongement à la rupture, mais aussi de la limite d'élasticité et de la  
 résistance à la rupture. Selon la nature des fils, on observe des comportements en traction  
 extrêmement variables comme le montrent la figure ci-dessous (figure 5).



*Figure 5 : comportement en traction de quelques fibres textiles*

120 On constate en général, dans le cas de multi-filaments, que la rupture se fait de façon échelonnée, le taux de fibres rompues augmente, au fur et à mesure de l'essai.

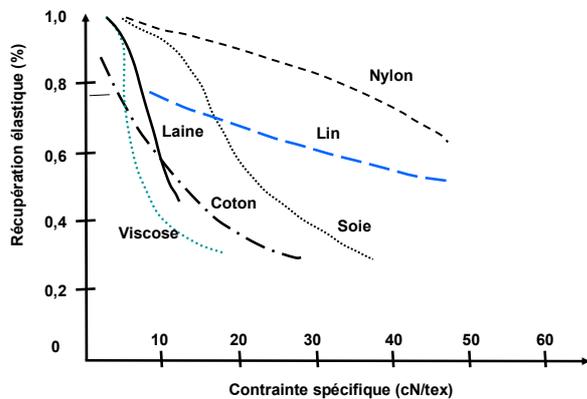


Figure 6 : Récupération élastique de fils textiles en fonction de la contrainte exercée

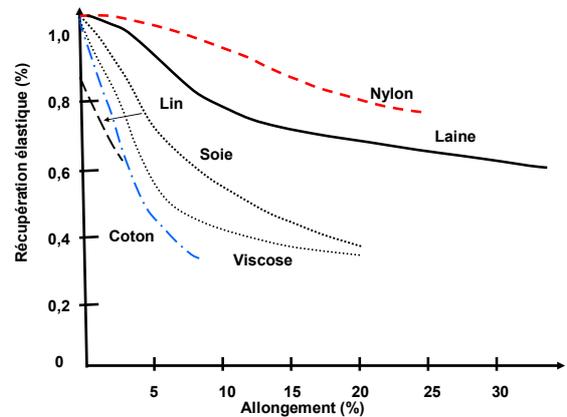


Figure 7 : Récupération élastique de fils textiles en fonction de déformation obtenue

Il existe différents facteurs qui influencent la solidité des fils. La rupture du fil est due à la rupture des fibres et au glissement des fibres. En réalité, une partie des fibres glisse et une partie se casse. Les propriétés mécaniques en traction d'un fil textile dépendent ainsi des propriétés mécaniques des éléments qui le composent, du nombre moyen de fibres ou de filaments en section, de leur torsion, de la cohésion inter-fibres qui est liée à la longueur, la finesse, l'éventuelle frisure, la forme de la surface des fibres ou filaments, de la présence d'adjuvants divers (agents lubrifiants, antistatiques, etc.). Elles dépendent aussi fortement de « l'histoire du matériau », c'est-à-dire du fait que la fibre ait ou non été déjà sollicitée au cours du temps qui précède l'essai. Les conditions réelles d'essai (température et surtout taux d'humidité relative du milieu ambiant, noté HR) sont extrêmement importantes car la présence d'eau peut modifier fortement les propriétés mécaniques des fils. Le tableau 1 fournit quelques résultats obtenus pour des fils textiles testés dans différentes conditions.

Matière	Allongement : 1 %		Allongement : 5 %		Allongement : 10 %	
	HR : 60%	HR : 90%	HR : 60%	HR : 90%	HR : 60%	HR : 90%
Coton	91 %	83 %	52 %	59 %	-	-
Viscose	67 %	60 %	32 %	28 %	23 %	27 %
Acétate	96 %	75 %	46 %	37 %	24 %	22 %
Laine	99 %	94 %	69 %	82 %	51 %	56 %
Soie	84 %	78 %	52 %	58 %	34 %	45 %
Polyester	98 %	92 %	65 %	60 %	51 %	47 %

Tableau 1 : Récupération élastique en allongement (en %) en fonction de l'humidité relative pour différents allongements

## Effet de l'histoire sur la résistance d'un fil

Il peut être utile de pouvoir évaluer la durée de vie utile que l'on peut attendre de fils soumis à des extensions cycliques ou de déterminer dans quelle mesure des sollicitations antérieures en traction vont modifier le comportement du fil (le « fatiguer »). La procédure d'essais est la suivante : pour un nombre de cycles donné, le matériau est soumis à des cycles de sollicitation de type traction/relaxation.

On constate en général que le fait d'avoir sollicité le matériau plusieurs fois se répercute sur la courbe contrainte/allongement comme le montrent par exemple les figures ci-dessous qui illustrent le comportement en traction simple d'un fil de coton de titre égal à 60 Tex lors d'essais classiques menés jusqu'à la rupture (figure 8), et en traction simple après plusieurs cycles de fatigue (figure 9).

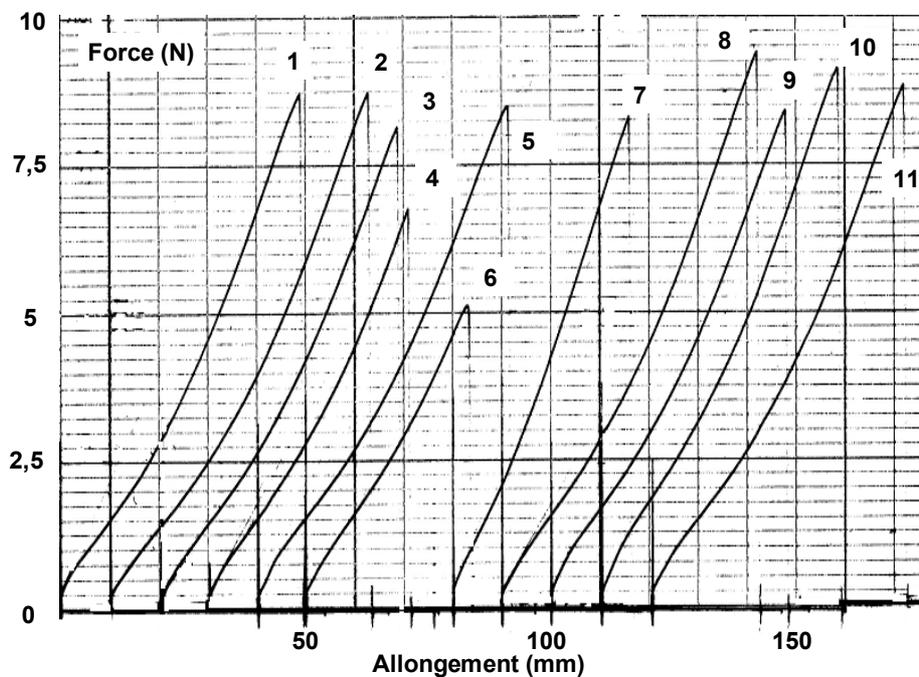


Figure 8 : Comportement mécanique d'un fil de coton en traction simple

Remarque : Au cours du test de traction simple, l'essai 6 a été rejeté.

En ce qui concerne les essais de fatigue représentés sur la figure 9, chaque cycle a été limité à un allongement égal à 50 % de l'allongement de rupture du matériau, ce paramètre ayant été mesuré préalablement grâce aux 10 essais en traction simple représentés sur la figure 8.

Au cours de l'essai de fatigue, le papier de l'enregistreur a été asservi au déplacement de la pince mobile de la machine de traction. Lorsque l'allongement fixé est atteint ; le sens de déplacement de la pince mobile s'inverse et celle-ci est ramenée à sa position initiale tout comme la plume de l'enregistreur. Lorsque, 10 cycles ont ainsi été réalisés, le fil est mené

jusqu'à sa rupture (les échelles des figures sont modifiées pour faciliter la lecture). On compare ensuite les allures des courbes force/allongement avant et après fatigue.

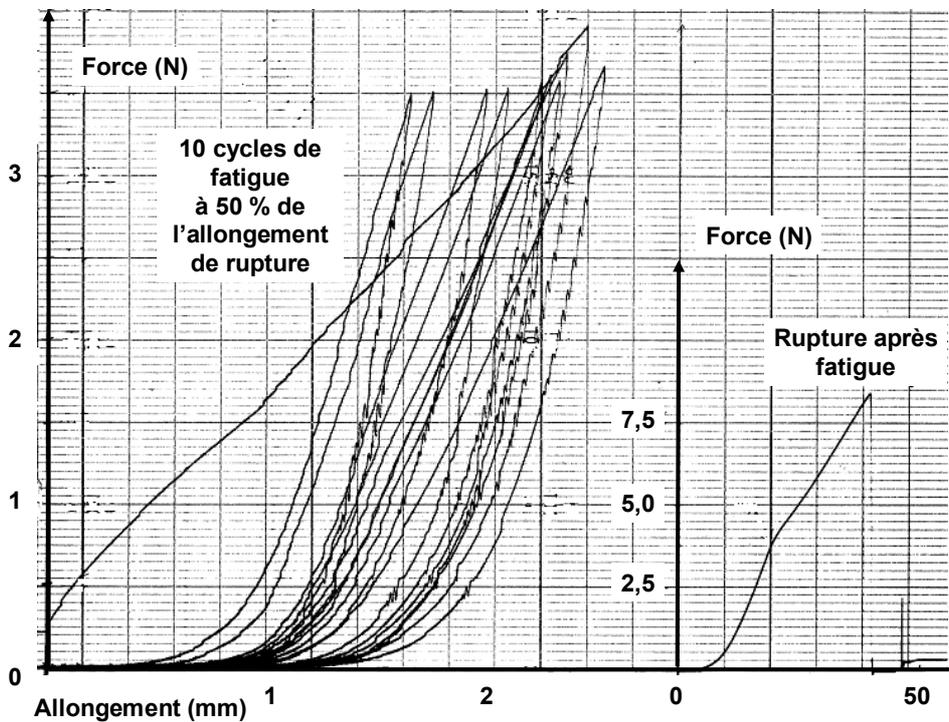
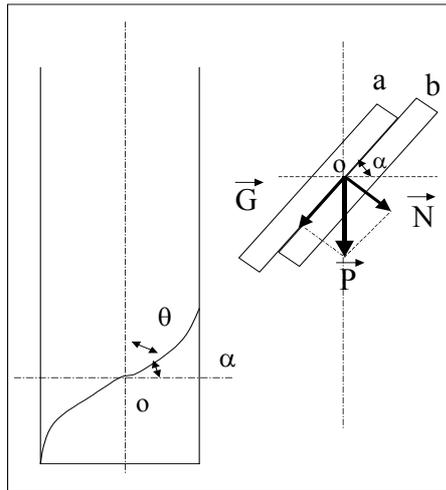
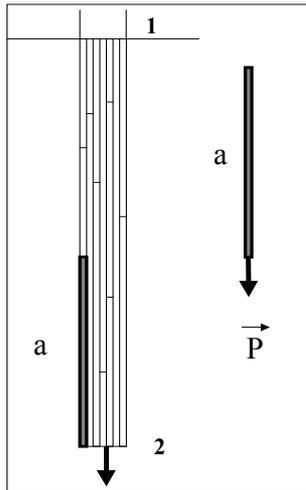


Figure 9 : Comportement mécanique d'un fil de coton après fatigue

L'évolution du comportement du matériau au cours du temps, peut conduire à une inaptitude à l'emploi.

### 165 Effet de la torsion des fibres sur la résistance d'un fil

170 Considérons qu'un faisceau de fibres non tordues, donc composé de fibres parallèles soit pincé en son extrémité 1. (Figure 10). On exerce un certain effort de traction à son extrémité 2. Chacune des fibres supporte une certaine partie de cet effort. Soit par exemple une fibre  $a$  ; dont nous supposons qu'elle n'atteint pas le point de pincage 1 du faisceau. La fibre est soumise à l'action d'une force  $P$  dans la direction de son axe. Elle est en contact avec plusieurs autres fibres. Par ailleurs, aucune force ne presse les fibres les unes contre les autres. La fibre  $a$  glissera déjà pour une faible valeur de  $P$ . Le peu de résistance qu'elle oppose au glissement est dû à une certaine adhérence des fibres entre elles ; due au fait que les fibres ne sont jamais tout à fait rectilignes et qu'en outre, leur surface n'est pas parfaitement unie.



175

*Figure 10 : Faisceau de fibre parallèles*

*Figure 11 : Faisceau de fibres tordues*

Considérons maintenant un faisceau de fibres tordues (figure 11). La torsion fait prendre aux fibres la forme d'une hélice dont l'axe est celui du fil. En tout point, les fibres forment alors avec le plan perpendiculaire au fil, le même angle  $\alpha$ , appelé angle de torsion. La torsion diminue au fur et à mesure vers l'intérieur du fil pour devenir nulle au centre.

180

La figure 11 représente une fibre **a**, sous l'action directe d'une force  $\vec{P}$  dirigée dans le sens du fil et qui est en contact avec plusieurs autres fibres.

En tout point, la direction de la normale au plan tangent à deux fibres est telle qu'elle forme l'angle de torsion  $\alpha$  avec l'axe du fil.

185

Pour simplifier les choses, nous supposons que la fibre **a** n'est en contact qu'avec une seule autre fibre **b** fixée à son extrémité supérieure et que les fibres sont rectilignes. La force  $\vec{P}$  peut se décomposer en une force  $\vec{N} = \vec{P} \cos \alpha$ , perpendiculaire au plan commun tangent aux deux fibres, c'est-à-dire la composante normale, et en une force  $\vec{G} = \vec{P} \sin \alpha$ , c'est-à-dire la composante tangentielle située dans le plan tangent. Cette force  $\vec{G}$ , qui est la composante de glissement, tente de faire glisser la fibre **a** sur la fibre **b**. La composante normale s'oppose à cette action du fait qu'elle engendre une résistance de frottement  $\vec{F} = f\vec{N} = f\vec{P} \cos \alpha$  agissant dans la direction de **G**, mais en sens contraire. Dans cette relation, *f* représente le coefficient de frottement des fibres. Il est constant pour chaque sorte de fibre.

190

Il y a équilibre lorsque  $f\vec{P} \cos \alpha = \vec{P} \sin \alpha$  donc  $f = \tan \alpha$ .

195

Si le frottement est supérieur à la composante de glissement, aucun glissement n'aura lieu, c'est-à-dire si  $f\vec{P} \cos \alpha > \vec{P} \sin \alpha$  ou si  $f > \tan \alpha$ .

Pour  $\alpha = 90^\circ$ , c'est-à-dire pour des fibres non tordues,  $\text{tg}\alpha$  est infiniment grande et cette condition n'est pas remplie.

200 Nous avons supposé dans ce qui précède que la torsion des fibres n'engendrait aucune tension. Cependant, la torsion provoque une répartition des tensions complexe aussi bien dans chaque fibre que d'une fibre à l'autre. Ces contraintes subsistent toujours partiellement après l'opération de torsion. On est loin de connaître exactement leur répartition.

205 La section d'un fil présente un noyau de fibres entouré de plusieurs couches concentriques de fibres, dont le nombre augmente avec la grosseur du fil ou la finesse des fibres. Par torsion, les différentes couches vont exercer les unes sur les autres une pression dirigée vers l'intérieur, de sorte qu'il se crée, entre les couches, une nouvelle résistance au frottement. Cette pression comprime les fibres intérieures et provoque l'amincissement du fil.

210 Il existe aussi des pressions réciproques entre les fibres d'une même couche. Les fibres extérieures s'enroulent hélicoïdalement autour du fil et sont de ce fait soumises à un étirement. Cet étirement diminue au fur et à mesure qu'on se rapproche du noyau, et les fibres centrales sont même comprimées dans le sens de leur longueur.

Les fibres extérieures ne subissent pas seulement un étirement mais aussi une flexion et une torsion sur elles-mêmes, variables selon la grosseur et la rigidité des fibres.

215 Du fait que les couches de fibres intérieures sont peu tordues, elles n'opposent qu'une faible résistance au frottement, de sorte qu'elles entrent peu en ligne de compte lorsque le fil est tendu. Lorsque l'on augmente la torsion, les fibres qui supportent effectivement la tension du fil voient leur résistance s'accroître (les fibres du milieu du fil sont comprimées plus fortement et les fibres courtes s'insèrent mieux dans le fil) de sorte que l'augmentation de la  
220 torsion augmente aussi la solidité du fil.

Cependant, l'accroissement de torsion augmente également la tension initiale des fibres extérieures et l'effort supplémentaire dû à la contrainte du fil que ces fibres sont à même de supporter s'en trouve diminué, ce qui se traduit par un amoindrissement de la solidité totale du fil.

225 En résumé, la torsion, lorsqu'elle augmente :

- engendre des contraintes de pression entre les fibres, d'où résulte un accroissement de résistance au glissement des fibres et une augmentation de la solidité du fil,
- soumet les fibres à des contraintes internes d'où résulte un affaiblissement du fil.

Si on augmente continuellement la torsion du fil, les contraintes internes finiront par  
230 provoquer la rupture du fil même en l'absence de toute autre charge.

### **Conclusion**

Le comportement en traction des fils textiles s'avère complexe qu'il s'agisse de fils composé  
de fibres ou de filaments souples. Il est encore plus complexe lorsqu'il s'agit de mélange de  
235 matériaux fibreux, ce qui se pratique fréquemment dans la mesure où le fil ainsi conçu permet  
de répondre à des besoins particuliers par la combinaison de matériaux de propriétés  
physiques et mécaniques différentes.

Annexe : Ordre de grandeur de quelques caractéristiques de fibres textiles

Matière	Charge de rupture spécifique (cN/tex)	Charge de rupture ( N/mm <sup>2</sup> )	Déformation à la rupture (%)
<b>Coton</b>	20 .. 45	300 .. 680	8 .. 10
<b>Laine</b>	10 .. 18	130 .. 230	35 .. 50
<b>Soie</b>	36 .. 40	470 .. 530	75 .. 85
<b>Fibre de verre</b>	40 .. 120	1000. . 2000	1. . 4

Matière	Longueur	Diamètre $\mu\text{m}$
<b>Coton</b>	15 .. 50 (mm)	27 environ
<b>Laine</b>	50 .. 250 (mm)	22 environ
<b>Soie</b>	600-1200 mètres	12 environ
<b>Fibre de verre</b>	Variable	Variable