

50376
1996
212

N°d'ordre:

THESE

présentée à

L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE I

par

Manuela FERREIRA

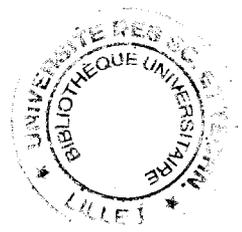
Ingénieur ENSAIT

pour obtenir

LE GRADE DE DOCTEUR
En SCIENCES Des MATERIAUX

**ETUDE DES FIBRES ET CABLES HAUTE PERFORMANCE EN
poly(p-phénylène -co-3,4'-oxydiphénylène téréphtalamide)
(Technora): RELATION STRUCTURE-COMPORTEMENT
MECANIQUE ET RECHERCHE DE CRITERES DE DEPOSE DES
CABLES**

Soutenue le 18 octobre 1996



JURY

- PRESIDENT:** Pr. B. ESCAIG
- RAPPORTEUR:** Pr. B. CHABERT
- RAPPORTEUR:** Pr. G. MERLE
- Directeur de Thèse:** Pr. T. M. LAM
- Examineurs:** Pr. C. CAZE
- M. Y. DELVAEL
- M. P. D. FERRANT



AVANT-PROPOS

Ce travail a été effectué au laboratoire GEMTEX (GENie Matériaux TEXtile) à l'Ecole Nationale Supérieure des Arts et Industries Textiles, il a été cofinancé par la société COUSIN FRERES et la région Nord Pas de Calais.

Je tiens particulièrement à remercier ici:

Monsieur T. M. LAM, directeur de thèse qui m'a assistée tout au long de cette étude.

Monsieur Paul Dominique FERRANT, directeur général de la société COUSIN FRERES, d'avoir accepté de cofinancer ce travail avec la région et de l'avoir suivi.

Monsieur Y. DELVAEL ingénieur chez COUSIN FRERES, d'avoir suivi ce travail et d'avoir répondu à chaque demande en produit d'essai.

Messieurs les Professeurs G. MERLE et B. CHABERT d'avoir accepté de juger ce travail et de faire partie du jury en tant que rapporteur.

Monsieur P. LABACHE enseignant à l'ENSAIT, d'avoir été présent au cours de cette étude, et d'avoir porté un regard critique sur mon travail.

Monsieur L. DALLUIM (laboratoire d'essais chez COUSIN), d'avoir apporté de nombreuses idées, qui ont permis une bonne évolution de ce travail.

Messieurs M. GEVAERT et C. FOURNIER (Techniciens à l'ENSAIT) qui m'ont fait profiter de leurs compétences techniques.

Monsieur le Professeur B. ESCAIG, qui m'a fait l'honneur d'accepter la présidence du jury.

Monsieur C. CAZE, professeur à l'ENSAIT et directeur du laboratoire GEMTEX de m'avoir accueillie dans son laboratoire et d'avoir accepté de faire partie du jury en tant qu'examinateur.

La région Nord Pas de Calais.

Je voudrais également exprimer ma reconnaissance à tous ceux, très nombreux, qui m'ont apporté à titres divers, leur soutien aussi bien technique qu'amical pendant la longue période que nécessite la préparation d'une thèse.

<u>INTRODUCTION</u> -----	2
----------------------------------	---

CHAPITRE I: ETUDE STRUCTURALE ET MORPHOLOGIQUE

I.1-Présentation de la fibre de Technora.-----	4
I.2-Etude par Spectroscopie d’Absorption Infrarouge à Transformée de Fourier.--	12
I.3-Etude par Résonance Magnétique Nucléaire.-----	15
I.4-Analyse élémentaire.-----	16
I.5-Etude par microcalorimétrie différentielle à balayage (DSC).-----	17
I.6-Analyse thermique mécanique dynamique (DMTA).-----	20
I.7-Morphologie de la fibre par microscopie optique, électronique à balayage (MEB), et à force atomique (AFM) -----	21
I.8-Etude aux rayons X.-----	25

CHAPITRE II: PROPRIETES MECANIQUES

II.1-Traction-----	30
II.1.1-Mesure sur monofilaments-----	30
a- Commentaire-----	31
b- Allure des courbes-----	32
c- Influence de la vitesse de déformation sur la courbe de traction---	41
d- Statistique de WEIBULL-----	44
II.1.2-Mesure sur câbles de diamètre 2mm-----	50
a- Commentaire-----	53
b- Allure des courbes-----	55
c- Essai sur câble fatigué-----	58
d- Influence de la vitesse de déformation sur la courbe de traction--	59
II.2-Fluage-----	61
II.2.1-Essai de fluage sur machine DMTA de Polymer Laboratories-----	61
II.2.2-Essai de fluage, observation au cathétomètre-----	65
II.3-Essai de relaxation sur monofilament-----	69
II.4-Fatigue en traction-traction d’un monofilament-----	72
II.5-Conclusions-----	75

CHAPITRE III: ETUDE DE LA FATIGUE DES CABLES

III.1-Machine de fatigue -----	77
III.2-Essais de fatigue réalisés sur des poulies en polyamide.-----	80
III.2.1-Influence de la fatigue sur le module -----	80
III.2.2-Influence de la couverture-----	83
III.2.3-Influence de la construction du câble-----	85
III.2.4-Conclusion.-----	88

III.3- Essais de fatigue réalisés sur des poulies en aluminium.-----	89
III.3.1-Fatigue de câbles de constructions différentes.-----	89
III.3.2-Comportement en fatigue du câble en Technora de type A.-----	97
III.3.3-Fatigue des câbles de Technora et de Kevlar 49 de type A-----	99
III.4-Relation module- résistance résiduelle.-----	102
III.5-Comparaison de la fatigue sur trois et cinq poulies.-----	104
III.6-Comparaison des résultats obtenus sur des poulies de nature différente.-----	105

CHAPITRE IV: MESURE SUR CORDES FATIGUEES. ESQUISSE DE CRITERES DE DEPOSE

IV.1- Thermographie Infra rouge-----	106
IV.1.1- Description de la méthode-----	106
IV.1.2- Résultats préliminaires-----	107
IV.2- Méthodes basées sur la mécanique de la corde vibrante: Réponse à une excitation latérale-----	110
IV.2.1- Description de la méthode-----	113
IV.2.2- L'inharmonicité-----	114
IV.2.3- Etude de la flèche-----	116
IV.2.4- Amortissement-----	118
IV.3-Réponse en impact latéral-----	119
IV.3.1- Description de la méthode-----	119
IV.3.2- Résultats -----	120
IV.3.3-Discussion-----	123
IV.4-Conclusions-----	124

CHAPITRE V: MESURE DE LA VITESSE DE PROPAGATION LONGITUDINALE PAR PROPAGATION D'ONDES ACOUSTIQUES

V.1- Rappel bibliographique-----	125
V.1.1- Démonstration de $V^2=E/\rho$ -----	126
V.1.2- Application aux fils-----	128
V.1.3- Relation entre le fil et les monofilaments-----	129
V.2- Principe-----	132
V.3- Appareillages utilisés-----	133
V.4- Description de la méthode-----	133
V.5- Résultats expérimentaux -----	134
V.5.1- Technique de mesure du temps de parcours -----	136
V.5.2- Mesures -----	137
V.5.3-Influence de la tension des câbles-----	138
V.5.4-Capteur sans couverture-----	139
V.6- Mesure du module sonique sur des câbles de construction et de nature différentes.-----	140
V.6.1- Essais.-----	140
V.6.2- Résultats et discussion.-----	140

V.7- Conclusions-----	143
<u>CONCLUSION GENERALE</u> -----	144
<u>ANNEXES</u> -----	147
<u>RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES</u> -----	167

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Les fibres ont toujours été d'un grand intérêt aussi bien pour l'habillement, que pour la fabrication de cordages ou encore pour tout ce qui concerne les matériaux composites. D'où l'évolution de la recherche dans le domaine de l'industrie textile, celle-ci conduisant à l'existence de divers fibres, allant de la fibre naturelle à celle purement synthétique. Les applications de ces nouvelles fibres étant croissantes et les exigences d'utilisation de plus en plus sévères (résistance, tenue au feu,...) une amélioration de leurs caractéristiques a donc été nécessaire.

Il y a quelques dizaines d'années, est apparue une nouvelle classe de fibres: les polyamides aromatiques ou polyaramides.

Les principales fibres aramides actuellement sur le marché sont principalement produites par *Dupont de Nemours* aux Etats-Unis et en Irlande: la fibre de Kevlar 29 utilisée telle quelle et le Kevlar type 49 imprégné. *Akzo*, société hollandaise produit les fibres Twaron et Twaron HM qui sont similaires à ces Kevlar, tandis qu'au Japon, *Teijin* fabrique les fibres Technora dont la molécule de base est sensiblement différente de celle des autres aramides.

La structure des polyaramides formée d'un fort pourcentage de noyaux aromatiques, est très alignée, en conséquence, très anisotrope. Elle confère ainsi au matériau de très hautes propriétés en tension dans le sens de la fibre, et non transversalement, du fait qu'elles sont sur-étirées au cours du filage.

Ces monofilaments sont caractérisés par un très faible allongement à la rupture et par un comportement en traction quasi-élastique.

Leur résistance, très élevée par rapport à celle des autres fibres organiques, est comparable à celle de l'acier et leur module d'élasticité atteint une valeur environ dix fois supérieure à celle du Nylon. Ceci, lié à leur faible densité, les dote d'une résistance spécifique cinq fois supérieure à celle de l'acier dans l'air et trente fois dans l'eau.

De plus, ces filaments, d'une grande stabilité thermique et d'une excellente résistance au choc, conservent le bon comportement en milieux corrosifs des polymères et gardent la souplesse des fibres.

Compte tenues de leur bonne tenue à la corrosion, et de leur légèreté, différents industriels souhaitent peu à peu substituer les câbles en acier par ces câbles en polyaramide. Mais avant tout, il faut un moyen simple et pratique de contrôle de ces câbles. Les câbles en acier sont actuellement contrôlés par un courant de Foucault du fait de leur bonne conductivité électrique, ce moyen de contrôle ne peut être appliqué aux câbles textiles.

Notre travail consiste donc à rechercher un critère de dépose des câbles polyaramides spécialement ceux en Technora. Mais avant de procéder à ces essais, nous avons envisagé tout d'abord de présenter la fibre de Technora, ainsi que d'effectuer des

études morphologiques et structurales, afin d'établir les propriétés de structure physico-chimique de cette fibre, ceci constituant notre **chapitre I**. La connaissance des caractéristiques des fibres élémentaires est nécessaire à la compréhension approfondie du comportement d'une structure pendant son utilisation: elle permettra d'évaluer les limites d'exploitation et de définir les modes de rupture du produit manufacturé.

Le **chapitre II** regroupe les études des propriétés mécaniques des monofilaments d'une part et des petits câbles en Technora d'autre part. Ces propriétés sont ensuite discutées, d'abord par rapport à la morphologie des monofilaments, ensuite par rapport à la constitution des câbles.

Le **chapitre III** concerne les câbles fatigués et leurs caractéristiques mécaniques. Ce chapitre permet de mettre en évidence l'influence de la fatigue par flexion, sur les différents paramètres des câbles en Technora tels que le module, la force à la rupture en traction,...

Le **chapitre IV** présente les différentes méthodes qui pourraient révéler l'état de fatigue des câbles et permettraient donc d'atteindre les critères de dépose.

Suite aux constatations qui ont été faites de l'évolution de la fatigue sur le module d'élasticité, le **chapitre V** est consacré aux mesures de la vitesse de propagation longitudinale d'une onde sonore dans les câbles, celles-ci conduisant au calcul du module sonique permettant ainsi de différencier les câbles suivant leurs états de fatigue. Ces essais seront l'aboutissement d'un critère de dépose possible pour nos câbles en Technora.

CHAPITRE I: ETUDE STRUCTURALE ET MORPHOLOGIQUE

CHAPITRE I- ETUDE STRUCTURALE ET MORPHOLOGIQUE.

I.1-Présentation de la fibre Technora (données de la littérature).

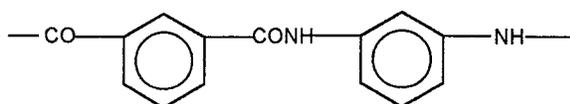
Tout comme les fibres polyamides, acryliques, polyesters, polyoléfines, ou élasthannes... les polyaramides sont des fibres d'origine synthétique qui de plus sont thermostables.

Ce sont des polyamides aromatiques, dans lesquels au moins 85 % des fonctions amides sont rattachées directement à des noyaux aromatiques:

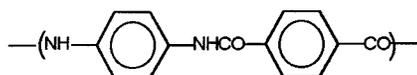


poly-phénylène-diamine-phtalamide

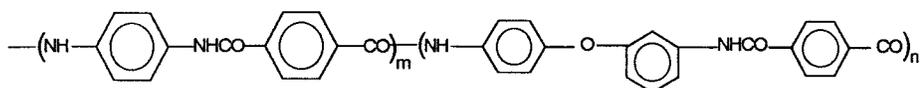
C'est en 1950 que la synthèse de ce polymère polyamide aromatique a été particulièrement étudiée par *DUPONT DE NEMOURS*. Cette étude a abouti à la mise au point d'un polyisophthalamide de la métaphénylène diamine commercialisée sous forme de fibre dénommée Nomex, de formule chimique:



Puis partant des isomères para, on a obtenu les produits nommés Kevlar de *DUPONT DE NEMOURS* ou Twaron d'*ENKA*.



Ce fût en 1974 que *TEIJIN* développa une nouvelle fibre aramide, le Technora possédant une fonction éther (1):



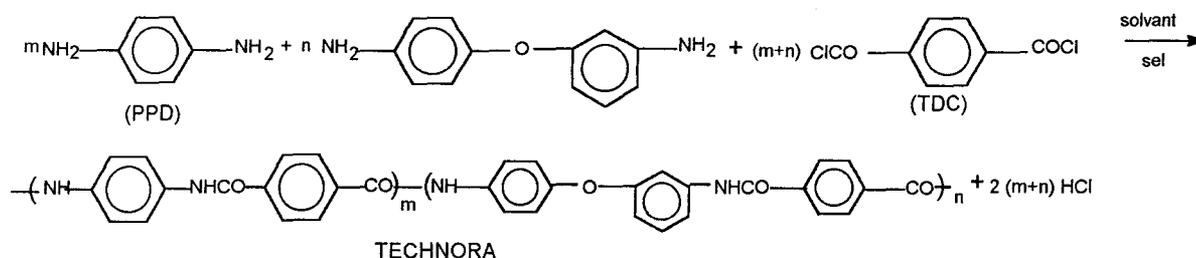
co-poly-(paraphénylène/3,4'-oxydiphénylène téréphtalamide)

I.1.1-Technologie de fabrication du Technora (2):

-Principe de la synthèse:

Le Technora est obtenu par polycondensation à basse température d'une matière de base composée de l'addition de 3 monomères: le paraphénylène diamine (PPD), le dichlorure de l'acide téréphtalique (TDC) et le 3,4'-diaminodiphényl éther en présence d'un solvant amide et de sel alcalin.

Réaction:



m et n sont en pourcentage de moles avec m+n=100%.

D'après les propriétés de la fibre de Technora, la fraction molaire du 3,4'-diphényl éther, n est au moins de 30 % et probablement de 50% (2 et 3).

Les solvants pouvant être utilisés dans cette synthèse sont :

- l'hexaméthyl phosphoramide (HMPA)
- N-méthyl-2 pyrrolidone (NMP)
- diméthyl acétamide (DMAC)

Les sels pouvant être utilisés sont:

- le chlorure de calcium
- le chlorure de lithium

La polymérisation est réalisée à basse température à une concentration en polymère de 6 à 12 %.

La réaction est terminée par addition d'un agent neutralisant tel que l'hydroxyde de calcium, le carbonate de calcium, ou le carbonate de lithium à 30-50% en mole du 3,4'-diaminodiphényl éther.

- Filature et étirage de la fibre (2;3):

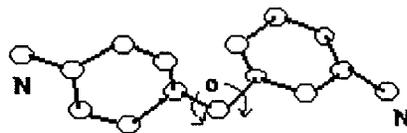
Le mélange contenant le copoly (p.phénylène/3,4'-diphényl éther téréphtalamide) est filtré et filé à partir d'un bain coagulant. Le polymère est soluble dans un solvant N-méthyl-pyrrolidone, le gel de fibre est ensuite soumis à une extraction du solvant puis lavé et étiré 6 à 10 fois, les filaments sont séchés à haute température pour former le produit final. Un seul solvant est utilisé durant la procédure. D'après Imuro (4) la fibre de Technora est à un taux d'étirage maximum et croît rapidement en ténacité à une température d'étirage de 485°C.

- Couleur:

La fibre de Technora a une couleur jaune, ce qui est caractéristique des fibres de polyamides aromatiques avec une chaîne rigide.

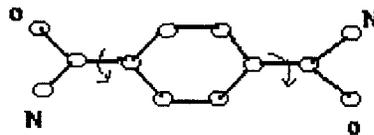
I.1.2-Morphologie et structure du Technora (2):

Le Technora est constitué de 30 à 50% de groupements 3,4' diphényl ether,

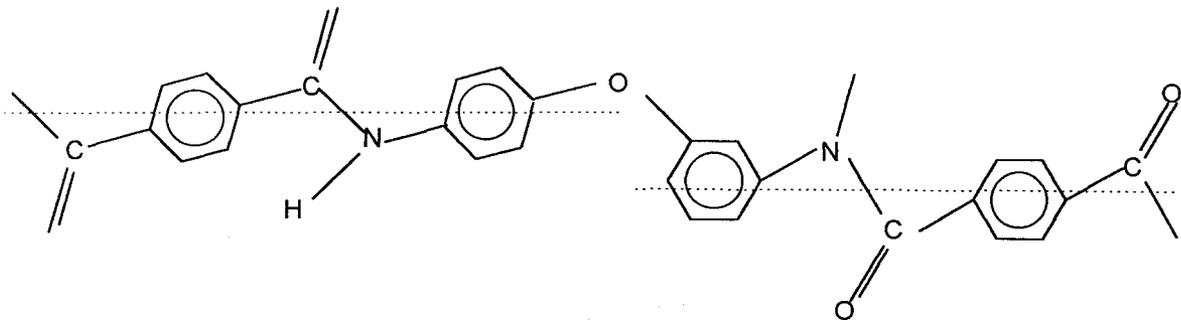


il est suggéré que celui-ci va apporter un effet considérable à la conformation des chaînes de polymères de Technora.

Comparé au poly para diphénylène téréphtalamide qui possède une structure linéaire des chaînes,

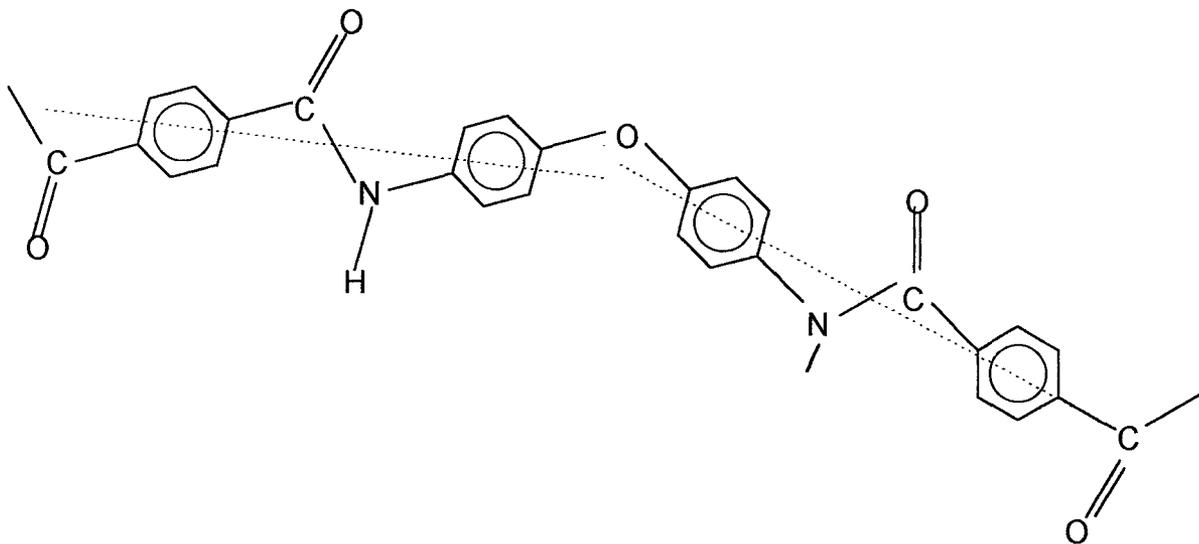


le Technora est par surprise presque linéaire (grâce à l'orientation méta) avec une modification légère de l'axe de la chaîne à la liaison C-O-C:



le Technora peut atteindre un haut degré d'orientation par étirement, d'où ses bonnes propriétés en traction.

En contradiction, si l'orientation avait été en para, tout comme pour le 4,4'-POP-T :



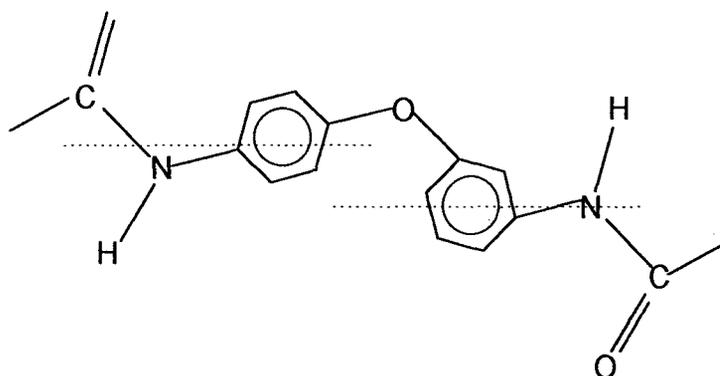
il y aurait une non linéarité importante, une fibre de cette composition n'obtiendra pas un haut degré d'orientation et des propriétés élevées en traction.

C'est lors de la fabrication que les propriétés élevées en traction ainsi qu'un module important sont conférés à la fibre. Les fibres en solution subissent un étirement, d'où une orientation des chaînes élevée.

En effet, d'après Frenkel (5) les fibres tel que le Kevlar qui sont étirées à partir de polymères à chaînes rigides sont capables de former en solution une phase nématique. Même avec de faibles coefficients d'étirage, un assemblage parallèle uniaxial des macromolécules s'établit et est fixé par l'évaporation du solvant.

Le Kevlar est étiré en milieu acidifié (6), tandis que le Technora est étiré dans des solvants amides moins corrosifs que l'acide et plus commodes d'utilisation d'où un avantage pour le Technora par rapport au Kevlar.

Les segments flexibles 3,4'-diamino-diphényl-éther

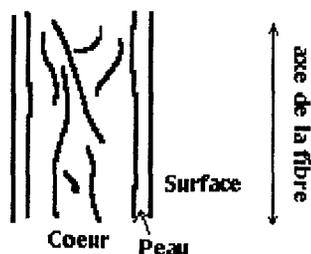


dans le Technora, même quand ils sont étendus, interrompent les liaisons hydrogènes entre les molécules de para-phénylène-diamine-téréphtalamide.

Cette interruption de liaisons conduit à des défauts de cristaux dans la structure de la fibre de Technora proposée par Imuro (5).

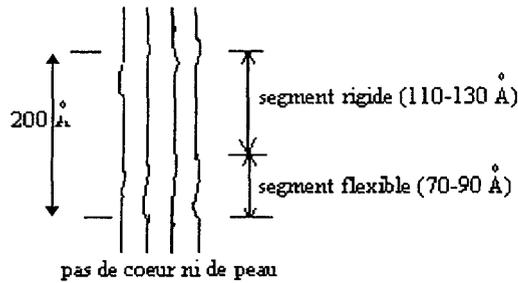
Les segments rigides du para-phénylène-diamine-téréphtalamide, ont une période de 110-130 Å et les segments flexibles de 3,4' diaminodiphényle éther une période de 70-90 Å, par conséquent la longueur répétée est de 200 Å.

Le modèle suggère donc que la structure de la fibre de Technora n'est pas une structure peau-coeur comme pour le Kevlar (7).



Suite à cette structure, Imuro (5) attribua au Technora une excellente résistance chimique, d'une part par le remplacement des liaisons aramides (8) par des liaisons moins sensibles chimiquement et d'autre part due à la grande orientation de la région amorphe (9) qui empêche l'eau et les agents chimiques de pénétrer dans la fibre. De plus du fait qu'il n'y ait aucune différence apparente entre les régions cristalline et amorphe (10), cela

conduit à une morphologie de la fibre du type suivant:



I.1.3-Propriétés générales de la fibre de Technora (1):

- Propriétés mécaniques et physiques, données par le fabricant (1;3):

- Résistance à la traction : 24,5 cN/dtex (3,4 GPa)
- Module longitudinal : 520 cN/dtex (73 GPa)
- Allongement à la rupture : 4,6 %
- Température de décomposition : 500°C
- Chaleur de combustion : 6800 cal/g°C
- Chaleur spécifique : 0,26 cal/g°C
- Indice d'oxygène limite : 25 %
- Taux d'humidité : 3 %

- Propriétés chimiques:

La résistance chimique du Technora est montrée tableau I.1.1 (p.11). La fibre de Technora présente une absence totale de corrosion, ainsi qu'une excellente résistance à l'attaque chimique des carburants, des solvants, des lubrifiants, de l'eau de mer, de la vapeur, ainsi qu'aux acides et bases. Cependant, il subit une détérioration sous l'effet des rayons ultraviolets (1; 3).

- Propriétés thermiques:

La fibre possède une excellente stabilité thermique. Elle garde une résistance à la traction élevée après une longue période à température élevée.

Cette fibre n'entretient pas la combustion, et ne fond pas.

La fibre de Technora possède une stabilité dimensionnelle à des températures avoisinant 200°C. Sa contraction thermique est estimée d'après la figure I.1.2 (p.11) à 1% à 30°C, 2% à 400°C, 15% à 450°C (1).

- Propriétés diélectriques:

Excellentes propriétés diélectriques, matériau non conducteur, le Technora est un isolant qui possède une résistance électrique de $5 \cdot 10^{14} \Omega/\text{cm}$ (1).

- Stabilité à la lumière:

La fibre de Technora conserve 68% de sa force à 15-80°C après 50 jours d'exposition au soleil à travers une vitre, 46% après 80 jours et 34% après 110 jours. D'après Minemura et al (11), sa stabilité à la lumière peut être améliorée par traitement à la chaleur en présence d'urée et de thiourée (2).

Tableau I.1.1: Résistance chimique du Technora (1; 2)

Produits chimiques	Concentration (% en poids)	Température (°C)	Temps (heures)	rétenion de la force (%)
Acides:				
Sulfurique	20	95	100	93
Sulfurique	40	95	100	89
Hydrochlorique	20	20	100	98
Nitrique	10	20	100	99
Phosphorique	10	20	100	96
Formique	90	95	100	82
Acétique	40	95	100	97
Bases:				
Hydroxyde de sodium	10	95	20	93
Hydroxyde de sodium	10	95	100	75
Solvants organiques:				
Essence	100	20	784	98
Benzène	100	20	784	98
Méthyl éthyl cétone	100	20	1000	97
Acétate d'éthyle	100	20	1000	96
Chlorure d'éthylène	100	20	1000	100
Ethylène glycol	100	95	300	94
Phénol	100	95	300	95
N-méthyl pyrrolidone	100	95	100	40
Autre:				
Eau de mer	3	95	1000	98

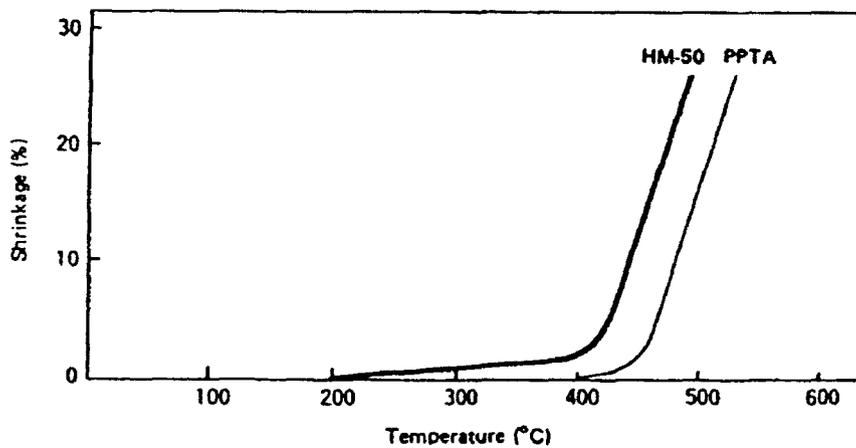


Figure I.1.2: Contraction thermique de la fibre de Technora HM50, pour comparaison le Kevlar est indiqué PPTA (1).

I.2- Etude par Spectroscopie d'Absorption Infrarouge à Transformée de Fourier.

Cette étude permet de déterminer les groupements chimiques dans un composé. Les essais sont réalisés sur Perkin Elmer 1650 (Résolution 4 cm^{-1} , 64 accumulations).

L'analyse est faite sur la fibre de Technora désensimée ainsi que sur l'ensimage. Les spectres sont obtenus par la technique ATR (Réflexion Totale Atténuée) et sont respectivement donnés Figure I.2.1 et Figure I.2.2.

On a pu mettre en évidence à partir de la figure I.2.1 le groupe éther du Technora et l'orientation méta.

Le Kevlar a été analysé également, afin de pouvoir comparer le spectre du Technora à ce dernier (figure I.2.3), on constate que l'on a quasiment les mêmes bandes, sauf les bandes suivantes pour le Technora:

- 1260 cm^{-1} qui correspond à un groupement éther diaromatique, non présent pour le Kevlar.

- 770 cm^{-1} correspondant à l'orientation méta des substituants entre les noyaux aromatiques.

Les autres bandes sont à peu près semblables c'est à dire:

Nombre d'onde en cm^{-1}	Groupements chimiques correspondants ou orientation
3 300	NH lié
1 635	CO-NH amide
1 600 et 1 505	cycle aromatique
820	orientation para

Il y a d'autres pics qui sont dus à la présence d'ensimage résiduel:

- 2916.8 cm^{-1}

- 2848.6 cm^{-1}

Pour pouvoir analyser l'ensimage nous avons mis la fibre dans un erlen contenant un solvant. L'ensimage est supposé être un polyuréthane polyester, aussi le solvant retenu est le chloroforme. L'erlen a été mis dans un bac à ultrason pendant 15 mn afin d'activer l'extraction. L'analyse a ensuite été effectuée (fig.I.2.2). La bande à 1735.3 cm^{-1} correspond au polyester diol servant à la fabrication du polyuréthane, confirmant l'hypothèse du type d'ensimage.

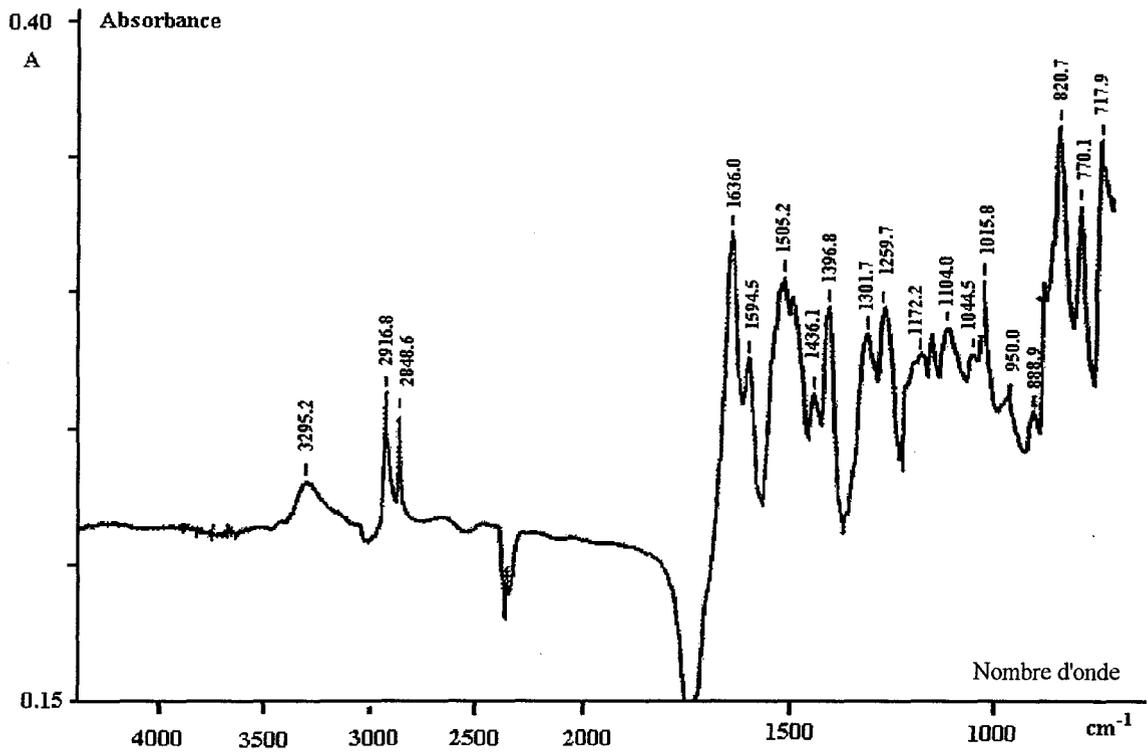


Figure I.2.1: Spectre IR par ATR du Technora désensimé.

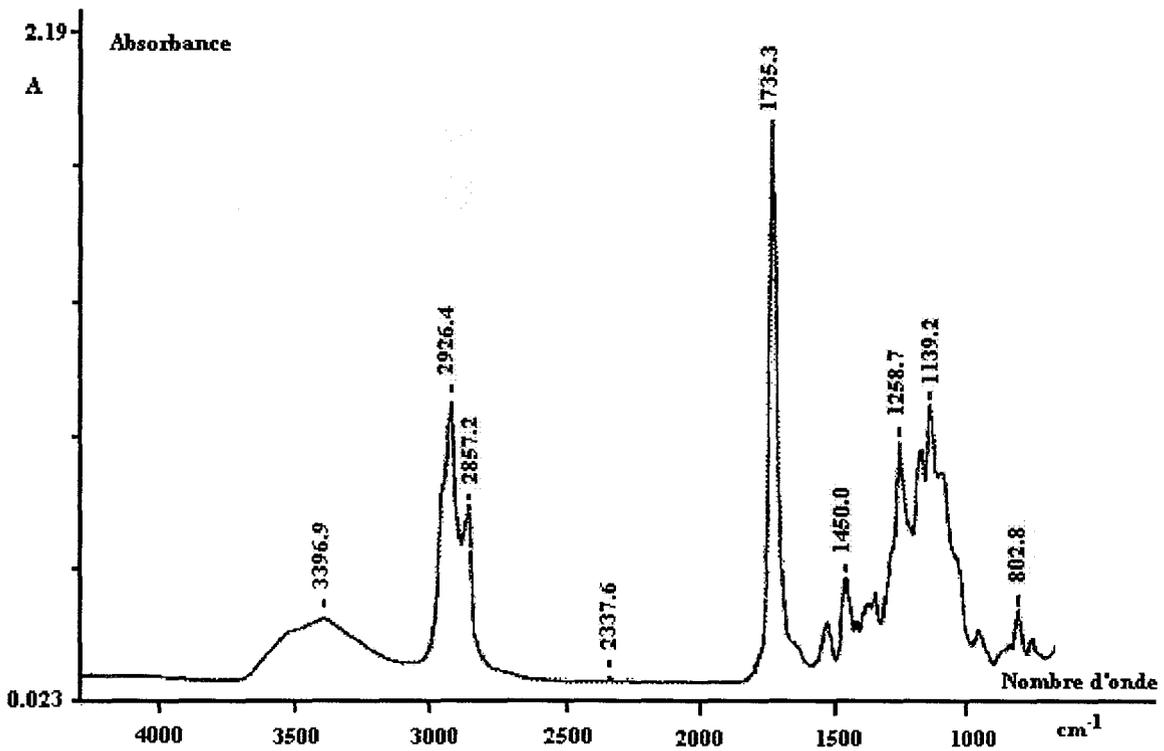


Figure I.2.2: Spectre IR de l'ensimage

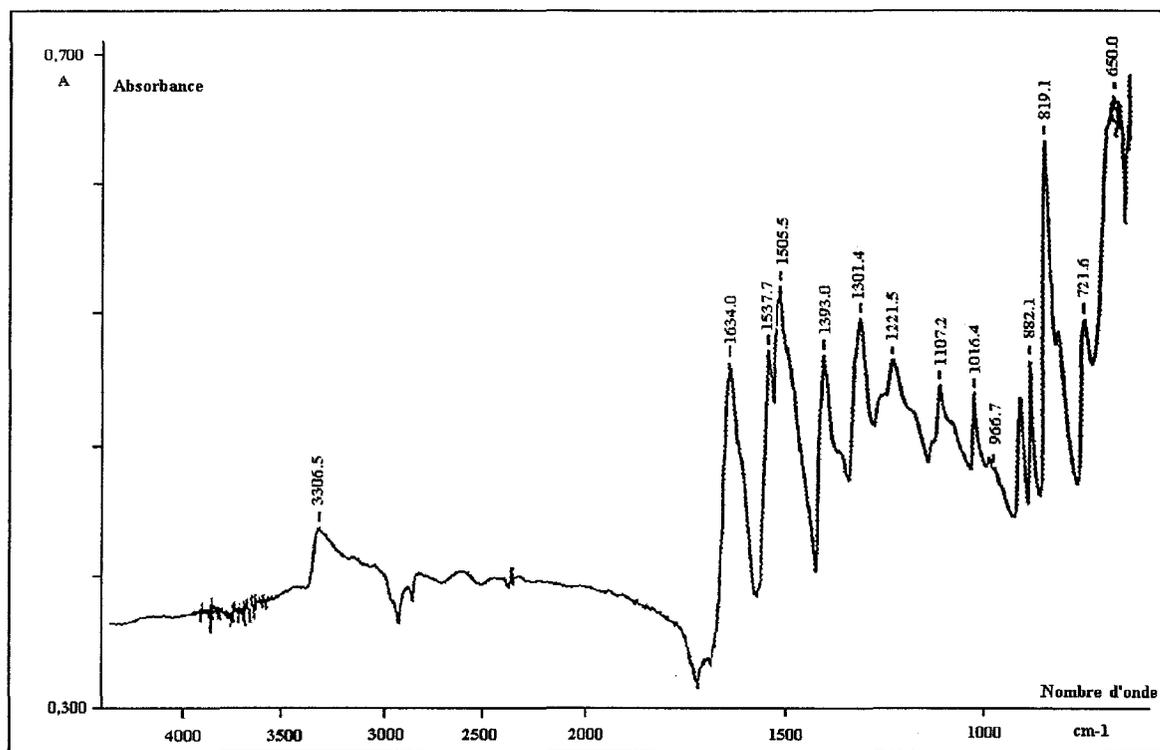


Figure I.2.3: Spectre IR par ATR du Kevlar.

I.3-Etude par Résonance Magnétique Nucléaire du Carbone 13.

L'appareil utilisé est un Bruker 100 MHz, il a été procédé à 9280 accumulations lors de l'essai. L'identification des bandes a été réalisée grâce aux spectres des produits modèles (12).

L'analyse par résonance magnétique nucléaire (RMN) du carbone 13 du produit à l'état solide, Technora T220 (figure I.3.4), confirme la structure chimique obtenue en Infrarouge. On a décelé un pourcentage important de groupement $-(CH_2)-$ d'environ 5%. L'hypothèse concernant l'origine de ces groupes CH_2 est la présence d'ensimage.

Grâce au rapport de l'aire des pics E'1 et $(2 CO(T) + E1)$, on peut déterminer le rapport de m/n égale à 2,1, avec $n \approx 32\%$ ($m+n=100$), cette valeur est proche de celle suggérée par H.H. Yang (2) (cf.p.5).

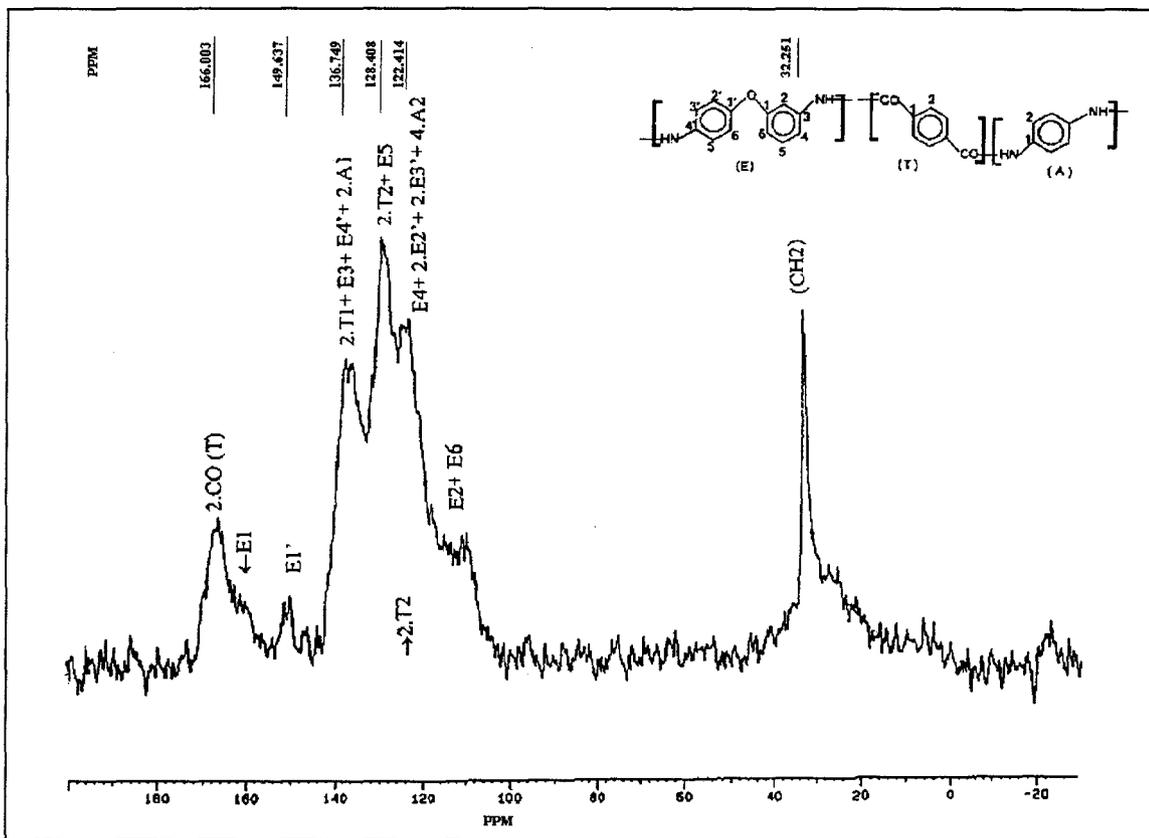


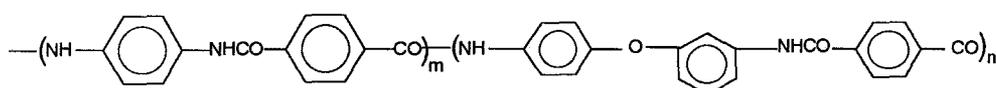
Figure I.3: Spectre de résonance magnétique nucléaire du carbone 13 du Technora à l'état solide.

I.4- Analyse élémentaire.

Pour confirmer l'analyse par RMN, une analyse complémentaire a été réalisée pour tenter de déterminer les valeurs de m et n. Elle a été effectuée sur fibre de Technora désensimée par le Service Central d'Analyse du CNRS (Solaize) et a donné les résultats suivants (sur deux analyses élémentaires concordantes):

Pourcentage de carbone	: 70,30 %
Pourcentage d'hydrogène	: 4,51 %
Pourcentage d'oxygène	: 15,19 %
Pourcentage d'azote	: 9,50 %

Si on considère que l'analyse élémentaire était effectuée sur le Technora pur et si on utilise les résultats pour calculer les valeurs de m et n de la formule du Technora rappelée ci-dessous,



on aboutit à des résultats aberrants (m ou n négatif). Par contre, si on fait intervenir la présence des groupes CH₂, on aura un résultat positif sur les valeurs de m, n.

L'analyse élémentaire confirme donc que le Technora analysé, comporte des impuretés, probablement de l'ensimage. Les valeurs de m et n ne pourront pas être calculées, car le pourcentage de CH₂ n'est pas connu, ce qui ajoute une inconnue de plus à nos équations, les données ne sont pas suffisantes pour une détermination exacte de m et n. Nous en resterons donc aux valeurs obtenues par RMN.

I.5-Etude par microcalorimétrie différentielle à balayage (DSC).

L'appareil utilisé est un DSC de Polymer Laboratories. Cette méthode d'analyse permet de déterminer les manifestations thermiques, par exemple les températures de fusion et de transition vitreuse.(annexe 2)

Les échantillons de masse d'environ 15 mg, sont mis dans des capsules scellées et sont ensuite soumis à un balayage en température, dans notre cas de 25°C à 600°C, la vitesse de balayage est de 10°C/mn. Un courant d'azote circule dans l'appareil évitant l'oxydation. Ces échantillons ont été préalablement mis pendant 24H à l'étuve (~100°C), pour éliminer l'eau, éventuellement présente dans les orifices des fibres.

La figure I.5.1 correspondant à l'analyse du Technora permet l'observation d'un pic endothermique au voisinage de 508°C et d'un pic à 120°C qui correspondrait à un départ d'eau, ce qui voudrait dire que celle-ci n'est pas entièrement partie lors du passage à l'étuve.

Le pic endothermique à 508°C pourrait correspondre à une température de fusion, mais après ouverture de la capsule, on constate que la fibre s'est décomposée. Une analyse thermogravimétrique (Fig.I.5.2), réalisée sur balance Setaram, en présence d'un balayage d'air, permet de montrer une perte de poids en fonction de la température, on en conclut donc que la température à 508°C est une température de décomposition.

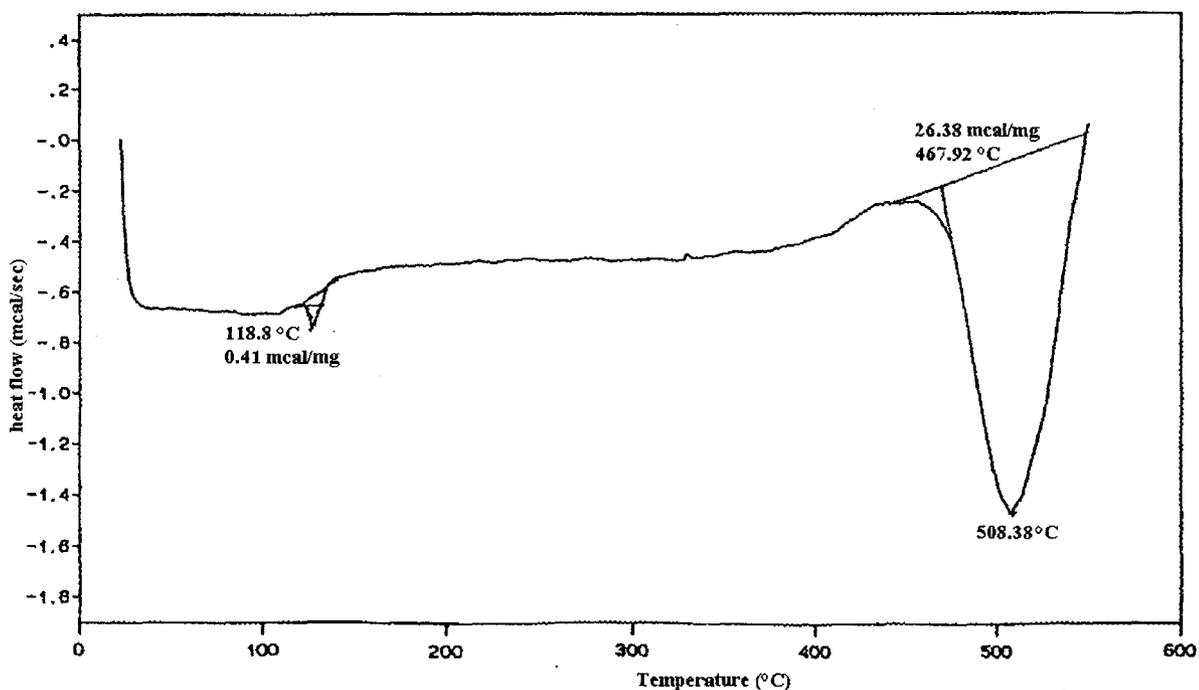


Figure I.5.1: Courbe de DSC du Technora.

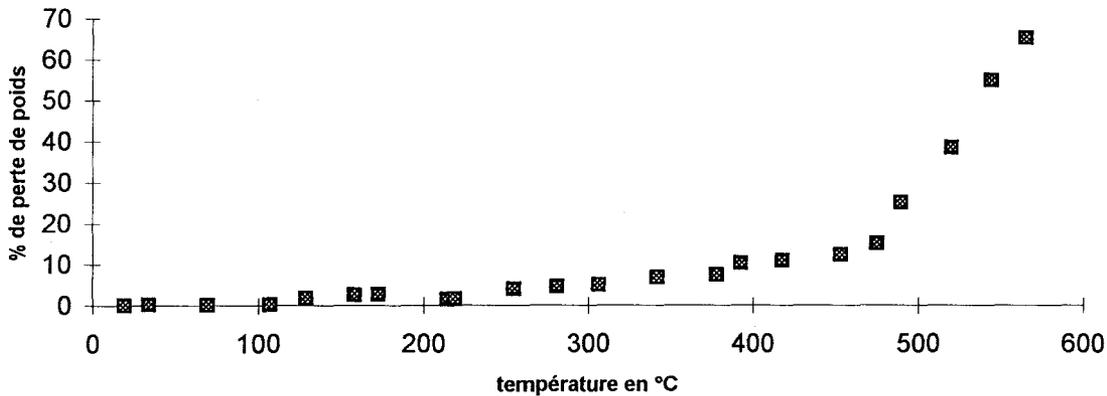


Figure I.5.2: Analyse thermogravimétrique du Technora à une vitesse $V= 10^{\circ}\text{C}/\text{mn}$.

Selon certains auteurs tel que H.H.YANG (2) on aurait une température de transition vitreuse vers 318°C , ainsi qu'une pseudofusion aux alentours de 485°C , proche de notre température de décomposition.

Mais des références telles celles de TEIJIN (1) n'ont rien observé lors d'une étude calorimétrique.

C'est la rigidité des chaînes moléculaires, ainsi que la cristallinité et l'orientation qui sont à l'origine d'une température de transition élevée.

Pour comparaison la figure I.5.3 représente l'analyse calorimétrique du Kevlar 49, on remarque que la température de décomposition est aux alentours de 586°C . La température de décomposition du Kevlar est donc supérieure à celle du Technora, cette différence a également été montrée par H.H.YANG (2). La perte de matière du Kevlar 49 en fonction de la température est suivie par analyse thermogravimétrique (Fig I.5.4). Le pic correspondant au départ de l'eau pour le Technora est absent pour le Kevlar, ceci est dû à la différence de structure des deux fibres, le Technora semble emprisonner fortement l'eau dans ces pores d'où la température de l'ordre de 120°C nécessaire à son évacuation.

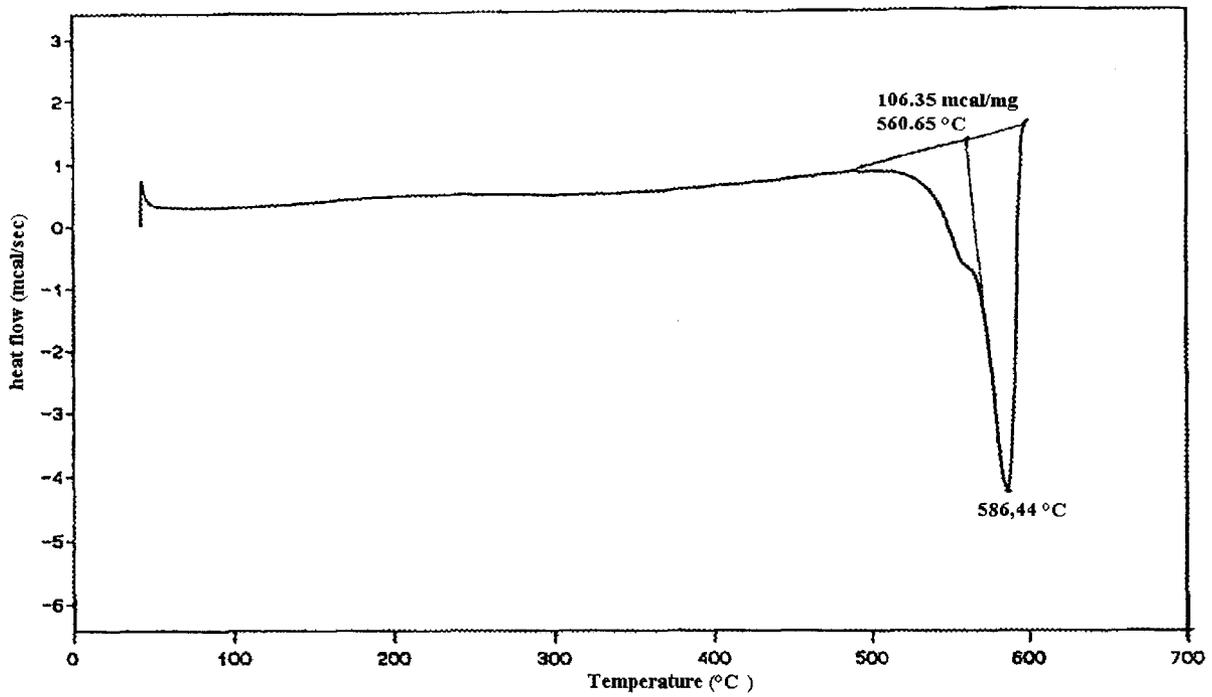


Figure I.5.3: Courbe de DSC du Kevlar 49.

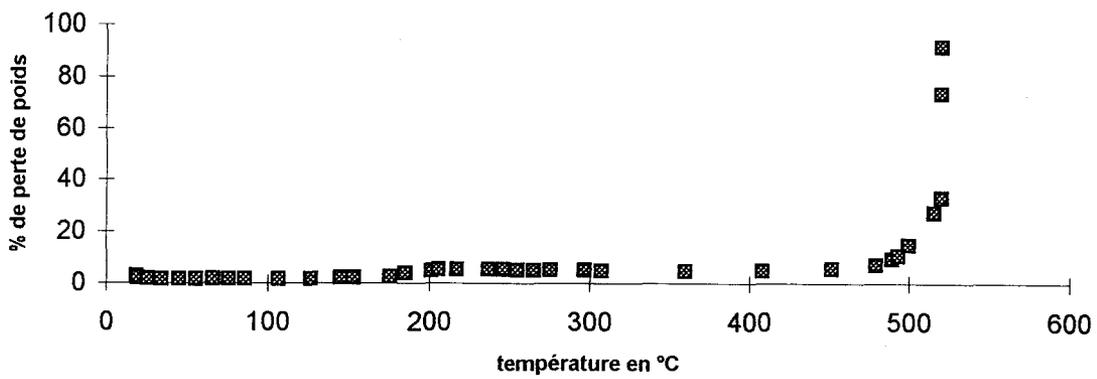


Figure I.5.4: Analyse thermogravimétrique du Kevlar 49 à vitesse $V=10^{\circ}\text{C}/\text{mn}$.

I.6-Analyse thermique mécanique dynamique (DMTA)

L'appareil utilisé est un MK III de Polymer Laboratories.

Cette analyse permet d'observer le comportement mécanique de la fibre de Technora en fonction de la température. L'échantillon est soumis à des oscillations (traction-traction) de fréquence 10Hz. L'analyse a été faite sur un monofilament.

La courbe obtenue figure I.6 qui représente le logarithme du module E' en fonction de la température ainsi que $\tan\delta$ en fonction de cette dernière, a permis de faire les observations suivantes:

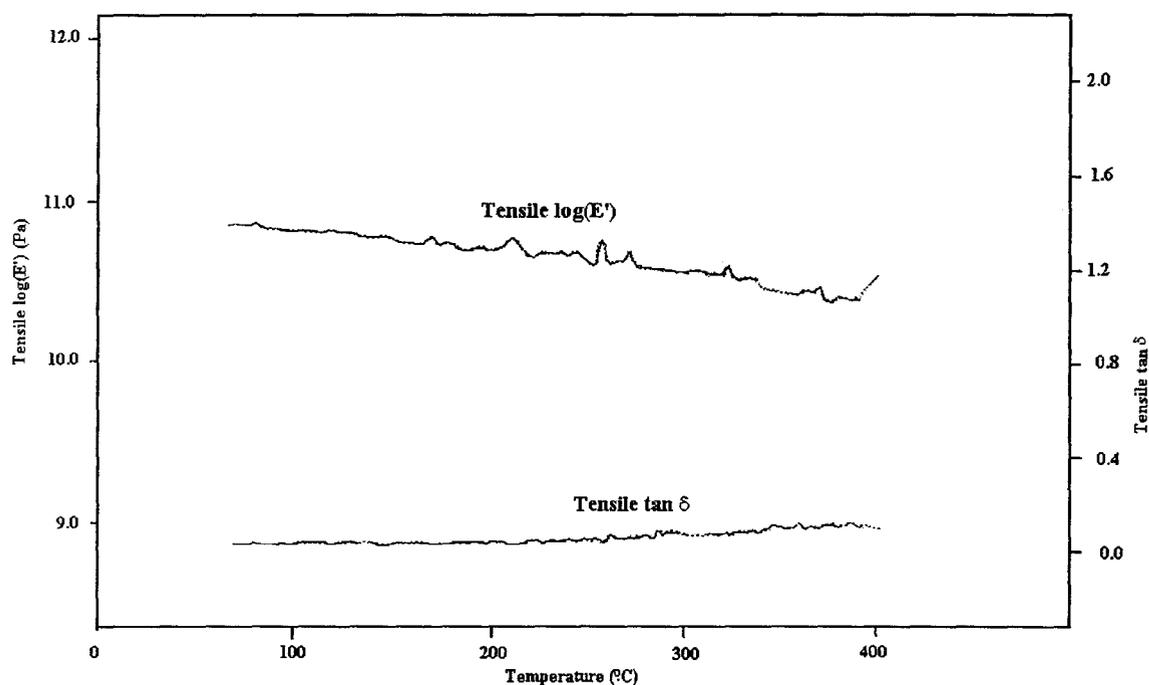


Figure I.6: Courbe de DMTA du Technora.

On constate que $\log E'$ décroît avec la température, le module d'élasticité vers 50°C est aux alentours de 79 GPa et de 22 GPa à 400°C, nous pouvons donc dire que le Technora conserve de bonnes propriétés à haute température. Les fibres de Technora ne possèdent donc pas seulement une résistance et un module élevés à la traction, mais également contrairement aux polymères traditionnels, elles conservent ces qualités à des températures très élevées.

En ce qui concerne $\tan \delta$ on sait que:

$$\tan \delta = E''/E'$$

-E'': module de perte, proportionnel à l'énergie dissipée dans le matériau et correspondant au caractère visqueux.

-E': module de conservation, correspondant au caractère élastique.

Pour le Technora $\tan \delta$ augmente très légèrement avec la température, ce qui correspondrait à la faible diminution de E' avec la température.

La transition vitreuse n'apparaît pas de façon manifeste sur cette courbe.

I.7- Morphologie de la fibre par microscopie optique, électronique à balayage (MEB), et à force atomique (AFM).

I.7.1-Morphologie de la fibre de Technora.

Les observations ont été faites à l'aide d'un Microscope à Force Atomique (AFM) (annexe 1) sur des fibres de Technora T 220 désensimées au chloroforme.

Nous pouvons constater sur la photo I.7.1, des fibrilles parallèles entre elles et d'orientation identique à celle de la fibre.

Ces fibrilles ont un diamètre d'environ 120 nm, diamètre plus important que celui des fibrilles du polyéthylène haut module qui est entre 20 et 90 nm (14).

Cette structure fibrillaire peut être expliquée par le fait que les fibres de Technora ont subi un étirage important, ce qui développe une grande orientation de la structure (13).

Les fibres sont également exposées à des températures élevées lors de l'étirage et du séchage, ce qui facilite le réarrangement à l'intérieur de la fibre (2).

Des observations ont également été faites sur Microscope Electronique à Balayage (photo I.7.2), il semblerait que l'on observe des fibrilles (côté gauche de la fibre).

D'après B.J.Jungnickel (13), l'analyse aux rayons X aux petits angles permet de mettre en évidence la structure fibrillaire d'une manière quantitative.

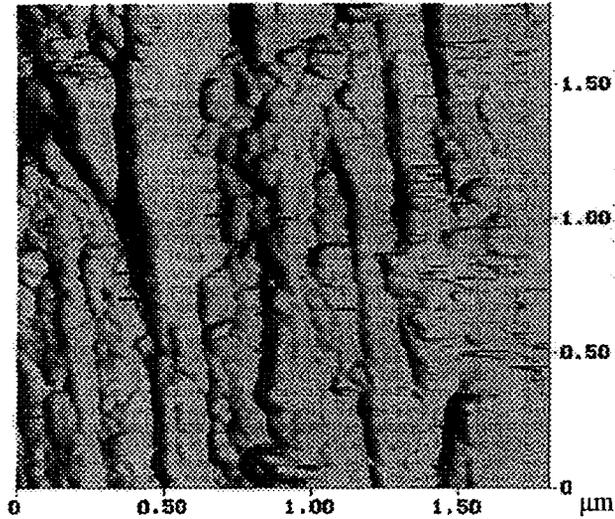


Photo I.7.1: Observation au Microscope à Force Atomique (AFM).

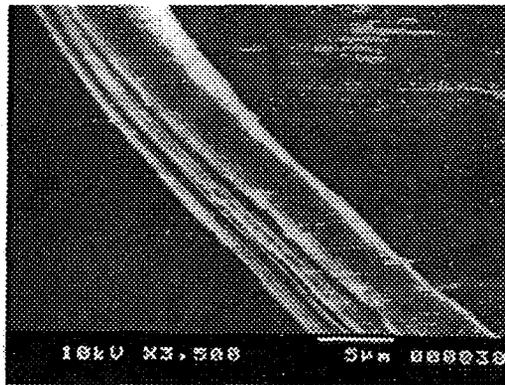


Photo I.7.2: Observation au Microscope Electronique à Balayage (MEB).

I.7.2-Analyse de la rupture lors d'un essai de traction.

Il a été observé deux types de figures de rupture lors des essais de traction:

Premier type : l'extrémité est très fibrillée (photo I.7.3), ceci peut être expliqué du fait que l'on ait une faible cohésion transversale des fibrilles, des fissures initiées au niveau d'un défaut se propagent très facilement par cisaillement et seront pratiquement parallèles à l'axe. Après une micro rupture, la nouvelle répartition des contraintes engendrera d'autres casses à des endroits plus ou moins éloignés. Les deux extrémités seront alors très fibrillées (15)(figure I.7.4).

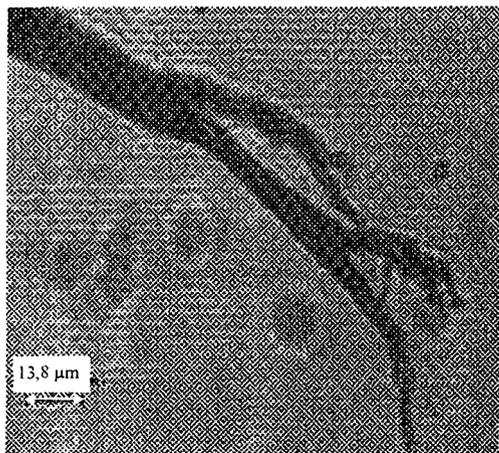


Figure I.7.3: Extrémité très fibrillée

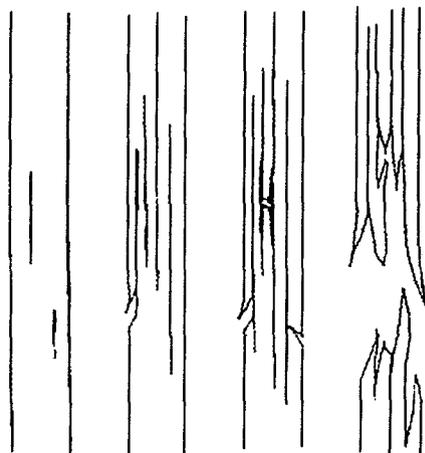
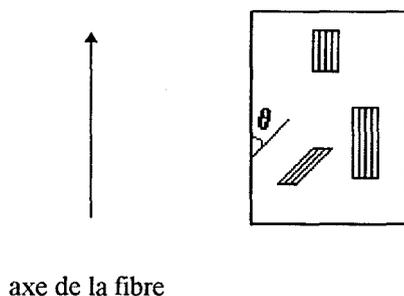


Figure I.7.4: Schéma de rupture en traction d'une fibre de Kevlar 29 modélisée par un faisceau de fibrilles.

Deuxième type : l'extrémité est en fuseau (photo I.7.5), ceci peut être expliqué par le mécanisme de Konopasek et Hearle (16). Une imperfection de surface initie la rupture, la concentration de contrainte au niveau de ce défaut provoque la propagation d'une fissure par cisaillement formant un angle très faible par rapport à l'axe de la fibre. La propagation de la fissure se produit dans un seul sens et les deux faciès de rupture seront différents l'un en forme de fuseau, l'autre éclaté (figure I.7.6).

L'angle du fuseau, qui donne la direction privilégiée du cisaillement, indiquerait l'angle moyen entre la direction des cristallites (de morphologie fibrillaire) et celle de la fibre (cf. Chapitre II (p.38)).



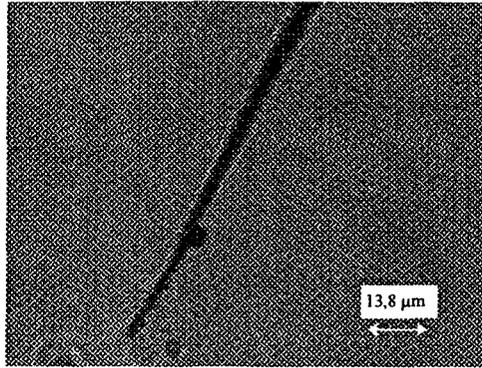


Figure I.7.5: Extrémité en fuseau.

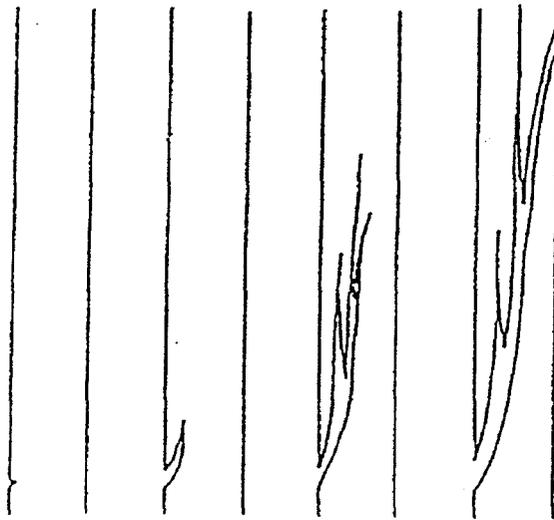


Figure I.7.6: Schéma de rupture en traction d'une fibre de Kevlar 29 proposé par Konopasek et Hearle (16).

I.8-Etude aux rayons X.

L'étude aux rayons X, permet de mettre en évidence la cristallinité de la fibre, et de compléter l'analyse morphologique (17).

Cette étude a été réalisée sur un détecteur multi-canal CPS 120 d'INEL. On place les monofilaments parallèlement entre eux dans un capillaire en verre de diamètre 0,7mm. Le capillaire est fixé sur un goniomètre permettant de le placer bien verticalement et dans l'axe du rayon. Ce système permet d'analyser l'échantillon sur 360° (celui-ci tournant sur lui-même). Pour les essais à haute température, on dispose d'un four qui vient se placer au dessus de l'échantillon. Cette étude a été menée à bien à l'aide de la collaboration du laboratoire "Dynamique et Structure des Matériaux Moléculaires" de l'Université de Lille I (P5).

Si l'on compare le Kevlar, le Technora, et le Polyéthylène (fig.I.8.1.a- b- c):

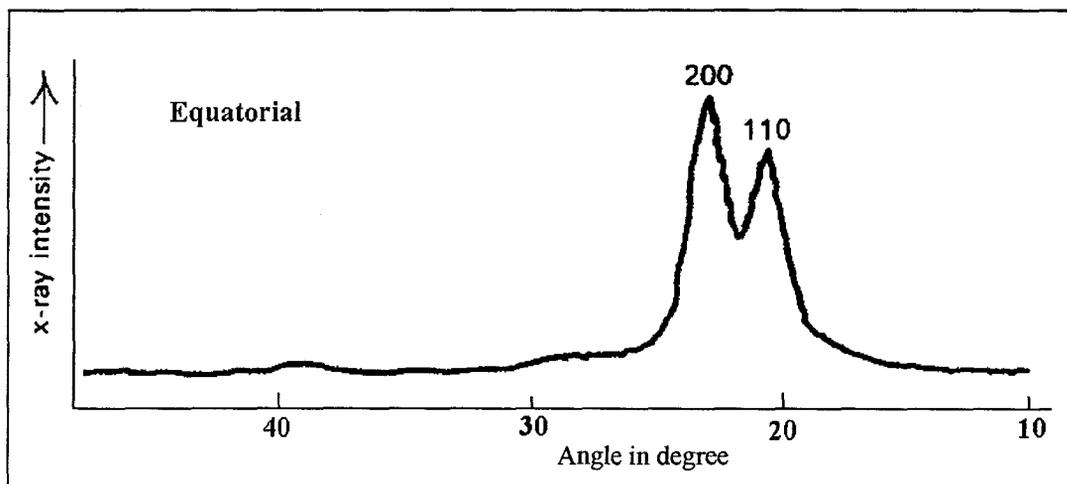


Figure I.8.1.a: Spectre aux rayons X du Kevlar 29

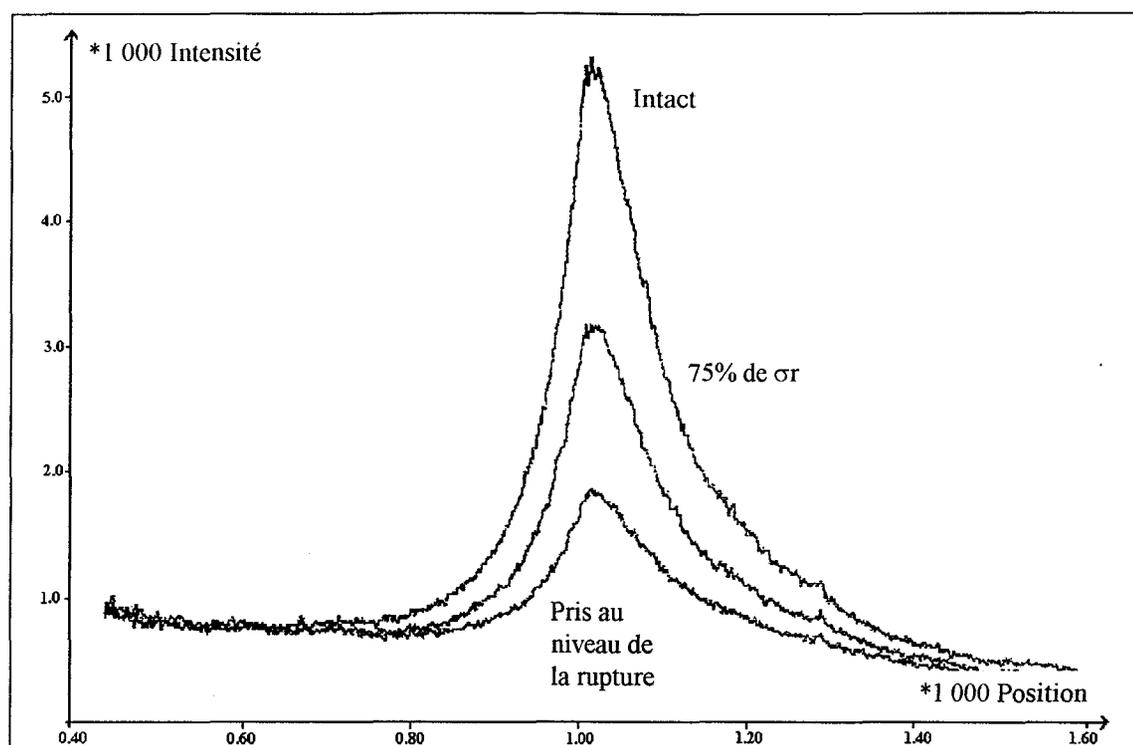


Figure I.8.1.b: Spectre aux rayons X du Technora (la courbe de plus faible intensité est celle de l'échantillon pris au niveau de la rupture, suivi de l'échantillon étiré à 75% de la force rupture, celui de plus haute intensité est l'échantillon intact).

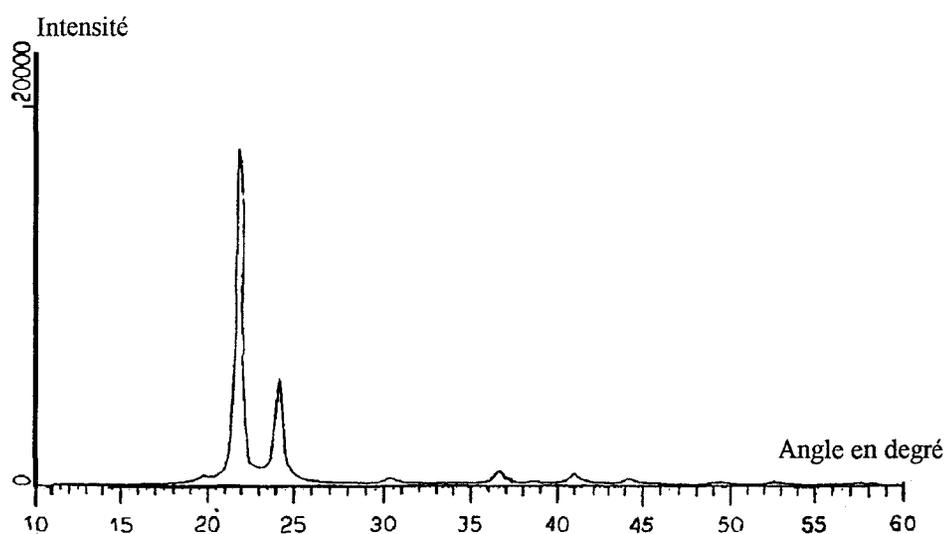


Figure I.8.1.c: Spectre aux rayons X du Polyéthylène Haut Module

On remarque que le polyéthylène possède des raies fines, il possède donc un réseau cristallin bien défini, l'alignement par rapport à l'axe de la fibre varie peu.

Pour le Kevlar, deux pics d'où un réseau cristallin, les raies sont plus larges que pour le Polyéthylène, on a donc une orientation des liaisons par rapport à l'axe de la

fibre. L'analyse aux rayons X d'après certains auteurs (18;19) a également montré une grande irrégularité dans le sens transversal et a révélé la présence de vides ayant leurs plus grandes dimensions dans le sens de l'axe de la fibre. La taille de ces vides dans le sens transversal serait de 20 Å.

Pour le Technora, on a une diffraction aux rayons X d'où une structure ordonnée; le réseau cristallin est mal défini, la raie est large on a donc une orientation par rapport à l'axe de la fibre.

Nous avons cherché à voir si la traction avait une influence sur l'analyse aux rayons X; aussi des essais ont été réalisés sur différents types d'échantillons. Nous avons donc fait les essais sur une fibre de Technora intact, sur une fibre ayant subi un étirement en traction de 75 % de sa force à la rupture, et sur un échantillon pris au niveau de la rupture d'une fibre en traction, nous constatons d'après la figure I.8.1.b que l'intensité du pic diminue avec l'étirement, et encore plus avec la rupture, mais cette différence entre les échantillons n'a pas d'influence sur la position du pic.

Nous réalisons des essais à différentes températures, sur des échantillons de Technora pris sur la fibre rompue. Avec les résultats des différentes courbes obtenues, nous pouvons tracer la position du pic en fonction de la température (fig.I.8.2), nous obtenons une droite décroissante jusqu'à 300°C, qui s'incurve jusqu'à 400°C, puis une hausse de la position avec la température.

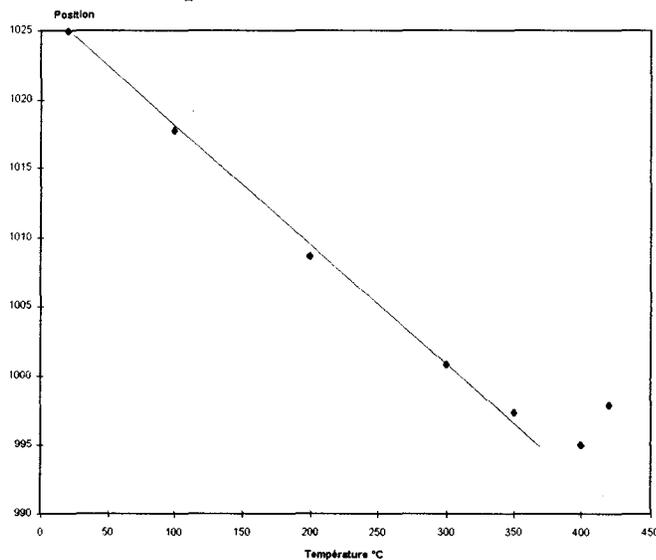


Figure I.8.2: Position du pic en fonction de la température d'essai.

Si l'on trace la largeur à mi-hauteur du pic en fonction de la température (fig.I.8.3), on a également une droite décroissante jusqu'à 300°C, ensuite une chute beaucoup plus importante avec la température. D'après H.H.YANG (3) la température de transition vitreuse est aux alentours de 320°C, l'interruption de la décroissance linéaire correspondrait à la température de transition vitreuse, qui comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent, est très difficile à obtenir par les techniques usuelles.

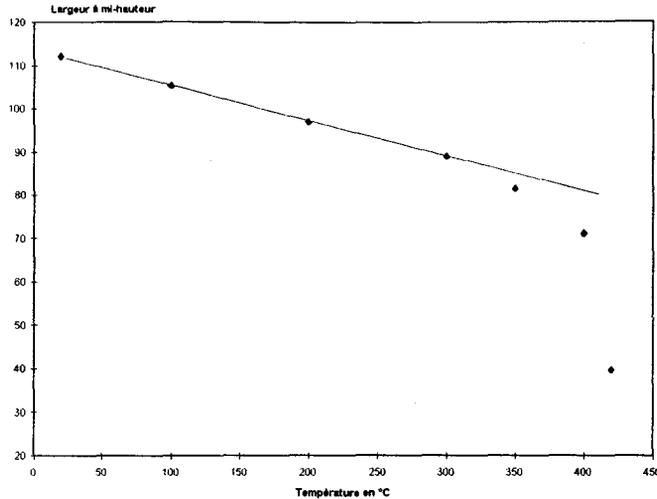


Figure I.8.3 : Largeur à mi-hauteur du pic en fonction de la température d'essai.

En portant l'échantillon à 420°C, puis en le passant à 20°C aux rayons X, on constate que la courbe obtenue ne correspond pas à celle d'un échantillon non chauffé (fig.I.8.4), le traitement thermique provoque un phénomène irréversible. Or si l'on effectue des trempes progressives (fig.I.8.5), c'est à dire à 150, 300, 320°C, et que l'on analyse ensuite les échantillons à température ambiante, on a une diminution de l'intensité du pic qui tend vers celle du pic à température ambiante, il est donc possible que celle-ci diminue jusqu'à la température de transition vitreuse.

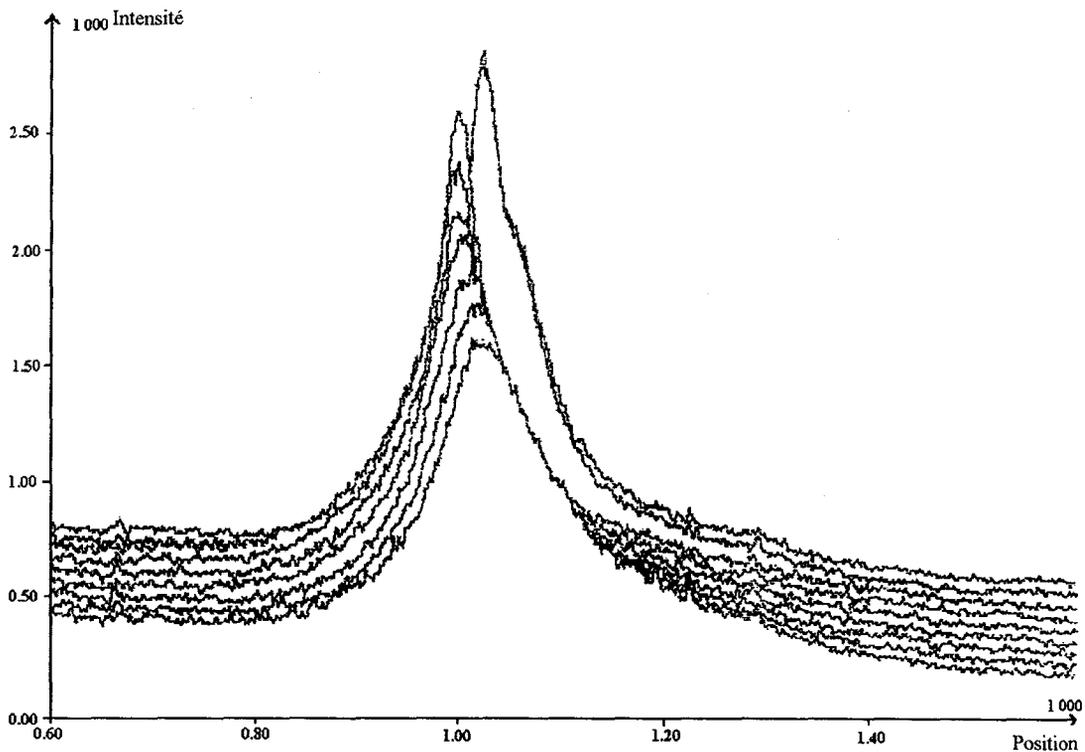


Figure I.8.4: Spectre de rayon X de la fibre de Technora à différentes températures (respectivement 20, 100, 200, 300, 350, 400, 420 °C et à 20°C après une trempe de l'échantillon à 420°C) [courbes du bas vers le haut].

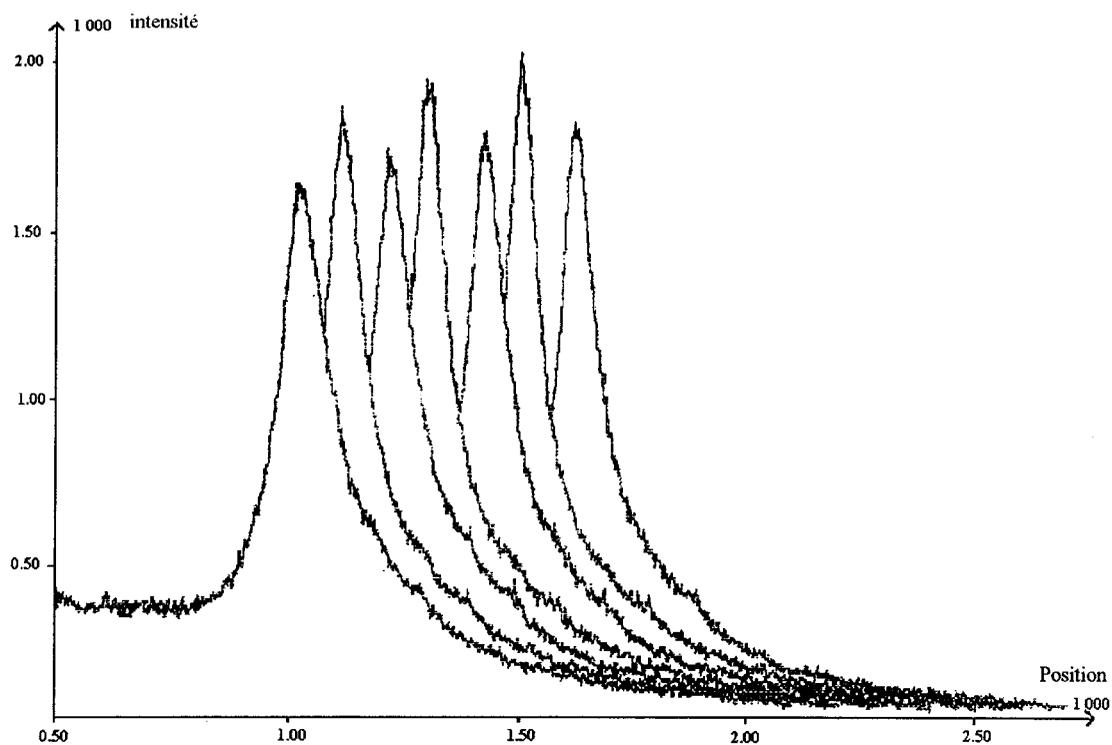


Figure I.8.5: Spectre du Technora passé à différentes températures puis éventuellement suivi d'une trempe (les courbes sont respectivement effectuées à $T=25^{\circ}\text{C}$; $T=150^{\circ}\text{C}$; chauffé à 150°C puis passé à 20°C ; $T=300^{\circ}\text{C}$; chauffé à 300°C puis passé à 20°C ; $T=320^{\circ}\text{C}$; chauffé à 320°C puis passé à 20°C) [courbes de gauche à droite].

CHAPITRE II: PROPRIETES MECANIKUES

CHAPITRE II: PROPRIETES MECANQUES.

Les essais ont d'abord été effectués sur des monofilaments afin d'établir les relations entre les propriétés mécaniques et la morphologie. Ensuite, nous avons travaillé sur des câbles de construction différente (câblée, moulinée, tressée, parallèle). Afin de tenir compte de l'influence de la longueur de l'échantillon sur les caractéristiques de rupture des monofilaments, l'étude a été faite sur la validité de la statistique de Weibull. Nous avons continué à étudier le Technora en le comparant aux Kevlar (Kevlar 29 et Kevlar 49, leurs propriétés mécaniques étant différentes).

II.1 Essais de traction.

II.1.1 Mesure sur monofilaments.

Le diamètre des monofilaments de Technora T221, a été déterminé sur microscope optique, les résultats obtenus sur 10 monofilaments donnent une moyenne de 12,4 μm , la valeur donnée par le fabricant est de 12 μm (1). Celui du Kevlar est de 12 μm .

Les essais de traction ont été réalisés sur trois fibres aramides:

- La fibre de Kevlar 29
- La fibre de Kevlar 49
- La fibre de Technora T 221

Les essais ont été réalisés sur machine ZWICK 1456, le capteur utilisé a une capacité de 10 N. Les mâchoires utilisées sont de Zwick de type 8135 (pinces planes). 50 mesures ont été réalisées pour chaque matériau.

- Vitesse d'essai : $V = 0,5 \text{ mm/mn}$

Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau suivant (Tableau II.1.1).

Tableau II.1.1:

	Kevlar 29 l=40 mm	Kevlar 49 l=20 mm	Technora l=40 mm
Force de rupture moyenne(cN)	29,3 ± 4,3	27,5 ± 2,4	31 ± 4
Allongement moyen à la rupture (%)	3,2 ± 0,4	2,4 ± 0,4	3,6 ± 0,5
Contrainte moyenne à la rupture (GPa)	2,6 ± 0,3	2,43 ± 0,2	2,56 ± 0,35
Ténacité (cN/tex(g/den))	182	168	184
Module d'élasticité à l'origine (GPa)	67,0 ± 6,4	101,7 ± 5,3	65,0 ± 4,5
Module d'élasticité près de la rupture (GPa)	84,0 ± 5,4	101,7 ± 5,7	77,0 ± 5,5
Module d'élasticité spécifique (N/tex)	58,7	70	55,4
1 ^{er} paramètre de WEIBULL m	7,3	11,7	9,2

a- Commentaires:

En comparant nos résultats avec ceux du tableau II.1.2 proposé par H.H.YANG (2) (page suivante) et ceux du fabricant (1) (p.9), on constate que les valeurs des modules d'élasticité que nous avons obtenus sont proches de celles proposées, bien que nos valeurs soient légèrement inférieures.

Les résultats obtenus pour le Kevlar 29 et le Technora sont légèrement différents, l'allongement et la force à la rupture sont plus importants pour le Technora que pour le Kevlar 29; ceci est dû à la présence des groupements éther dans la chaîne moléculaire du Technora qui apporte de la souplesse à la fibre d'où un allongement plus important.

On constate également la présence de deux modules pour le Technora et le Kevlar 29, une discussion à ce sujet sera effectuée dans les paragraphes suivants.

Tableau II.1.2:

	Densité (g/cm ³)	Contrainte (GPa)	Ténacité [cN/tex(g/den)]	Elongation (%)	Module (GPa)	Module spécifique (N/tex)
Kevlar 29	1,43	2,9	203 [23]	3,6	70	49
Kevlar 49	1,45	2,9	203 [23]	2,8	135	93
Technora	1,39	3,3	238 [27]	4,3	70	50

b- Allure des courbes:

On constate pour le Kevlar 29 (figure II.1.4) et le Technora (figure II.1.5), que les courbes de traction présentent un changement de pente. Par contre, pour le Kevlar 49 (figure II.1.3), le changement de pente est absent. La fin de la ou des zones linéaires correspond à la rupture, il n'y a donc pas de déformation plastique.

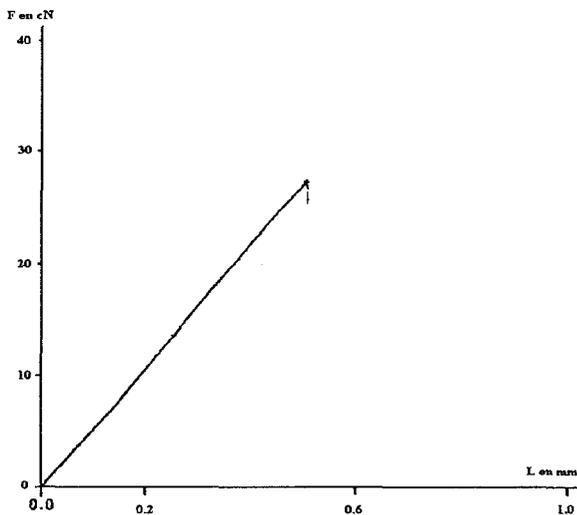


Figure II.1.3: Courbe de traction du Kevlar 49.

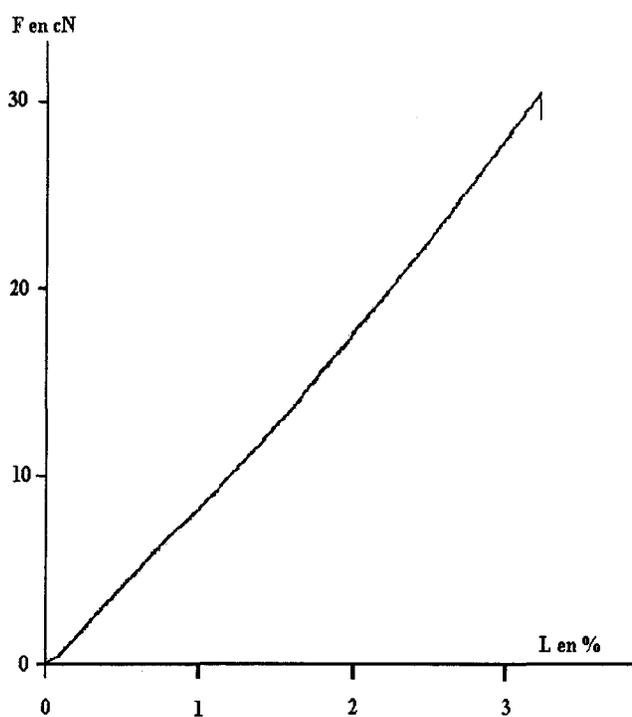


Figure II.1.4: Courbe de traction du Kevlar 29.

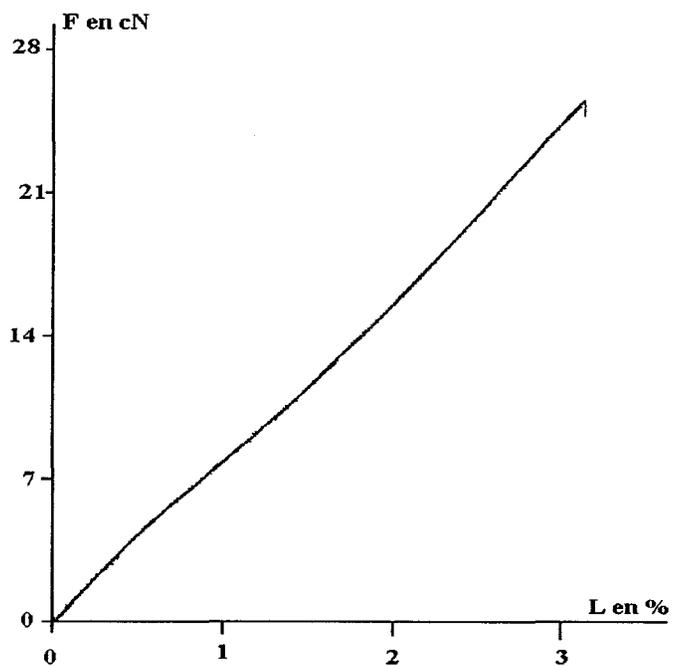


Figure II.1.5: Courbe de traction du Technora.

On peut caractériser les deux pentes du Kevlar 29 et du Technora par un module à l'origine et un module près de la rupture.

- Pour le Kevlar 29 :
- module à l'origine : $E_0 = 67,0 \text{ GPa}$
 - module près de la rupture : $E_1 = 84,0 \text{ GPa}$

$$E_1/E_0 = 1.25$$

- Pour le Technora :
- module à l'origine : $E_0 = 65,0 \text{ GPa}$
 - module près de la rupture : $E_1 = 77,0 \text{ GPa}$

$$E_1/E_0 = 1.18$$

On constate pour le Kevlar 29 comme pour le Technora que le module à l'origine est plus faible que celui près de la rupture.

Le rapport des deux modules est plus important pour le Kevlar ce qui voudrait dire que le kevlar 29 se rigidifie plus que le Technora.

La rigidité de la fibre au cours du chargement peut être expliquée par le fait que les chaînes ou les cristallites s'alignent dans la direction de l'étirement.

Toutefois ce durcissement des fibres peut être expliqué plus en détail à partir de la morphologie du Kevlar, car c'est celle qui est rencontrée dans les différentes publications traitant ce sujet.

Rappelons pour cela le motif du Kevlar:

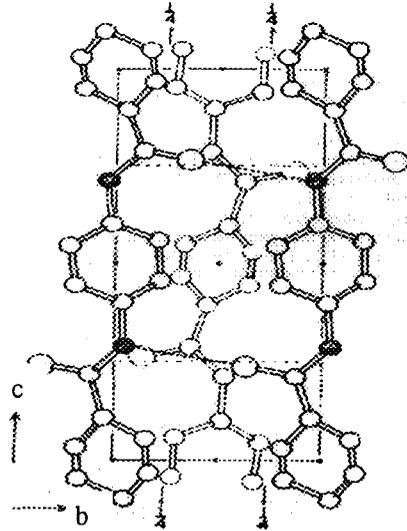


Figure II.1.6: Maille cristalline du kevlar [$a=7,87\text{\AA}$; $b=5,18\text{\AA}$; $c=12,9\text{\AA}$]

L'assemblage des motifs conduit à une chaîne, et le regroupement de ces chaînes (grâce aux liaisons hydrogène) va conduire à un réseau cristallin orthorhombique (fig. II.1.7) (2 et 20), dont on a les dimensions grâce au diagramme obtenu par rayons X.

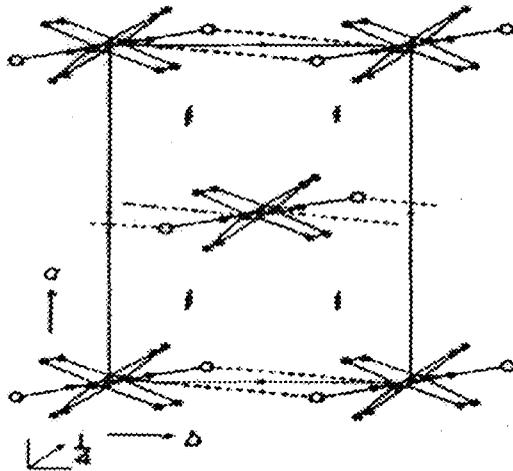


Figure II.1.7: Réseau orthorhombique.

Ces réseaux cristallins sont assemblés en cristallites (fig.II.1.8) de largeur 60nm, les cristallites côte à côte constituent des bandes de 200 nm de manière régulière; Ces

bandes de cristallites forment des feuillets plissés d'angle de 170° ou de 5° , suivant le côté mesuré, ces feuillets sont représentés par la figure II.1.9 (21).

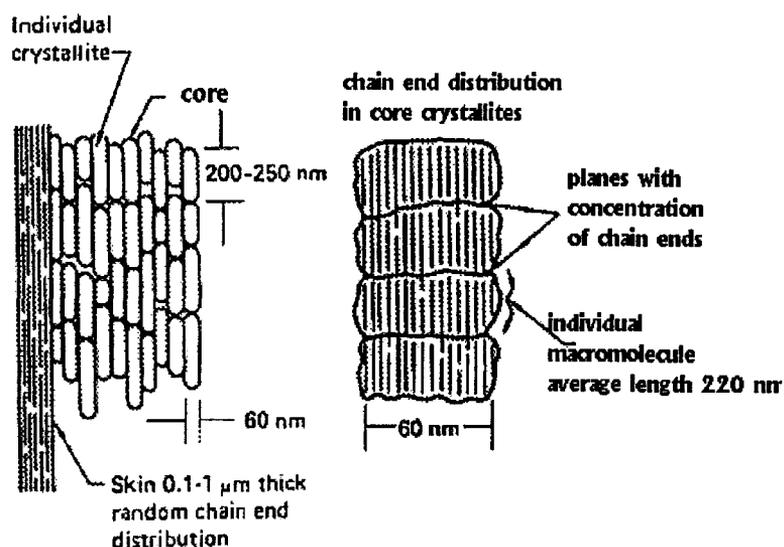


Figure II.1.8: Cristallites

Ces feuillets sont disposés radialement à l'axe de la fibre. On constate d'après la figure II.1.9 que les cristallites ne sont pas parallèles à l'axe de la fibre et que l'axe du réseau n'est pas l'axe de la chaîne, et on constate également que les liaisons NH-CO ne sont pas perpendiculaires à l'axe du réseau (fig.I.1.6) (22).

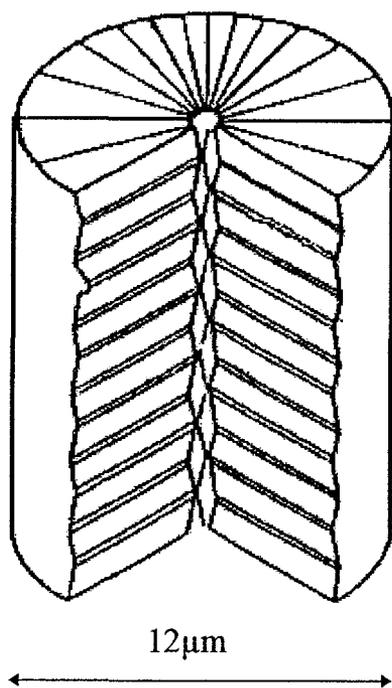
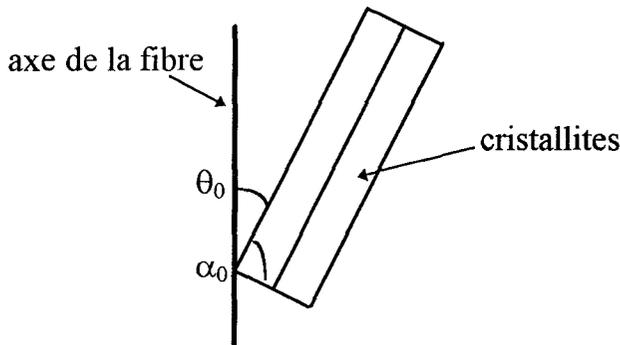


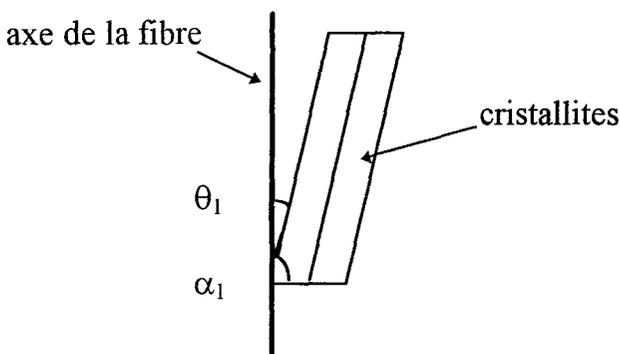
Figure II.1.9: Structure radiale des feuillets plissés

A partir de cette analyse structurale nous pouvons comprendre le phénomène de déformation en traction. Considérons deux cristallites côte à côte formant un angle θ_0 avec l'axe de la fibre, les cristallites ont une inclinaison de α_0 (23).

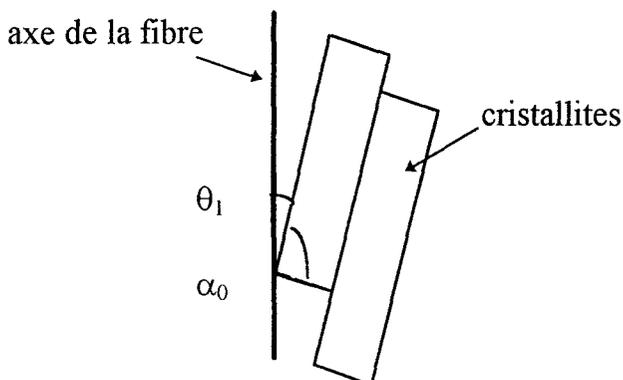


Deux phénomènes peuvent se produire durant la déformation:

- **Premier phénomène:** les cristallites s'orientent par rapport à l'axe de la fibre et l'angle θ_0 passe à θ_1 . Les cristallites forment un nouvel angle α_1 le phénomène est alors réversible; nous sommes dans une déformation élastique.



- **Deuxième phénomène:** les cristallites s'orientent par rapport à l'axe de la fibre, θ_0 passe à θ_1 , mais cette fois ils se déplacent l'un par rapport à l'autre: on a un glissement des liaisons hydrogène entre les cristallites. Si ces liaisons hydrogène n'ont pas atteint un maximum de force, le phénomène reste réversible, mais dès que celles-ci atteignent un maximum de force le phénomène est alors irréversible.



Qualitativement cette morphologie explique d'une part le durcissement des fibres en traction par l'alignement des cristallites par rapport à l'axe de la fibre, d'où la variation du module et d'autre part le fait que l'on ait deux phénomènes l'un réversible et l'autre non, expliqués par ce mécanisme d'orientation des cristallites, et plus loin par des essais de relaxation.

Si on considère que la fibre est un composite avec comme renfort ces cristallites dont l'axe moyen fait un angle θ avec l'axe de la fibre, et que le changement de pente est dû au basculement des cristallites pour se mettre dans la direction de la fibre, alors on peut écrire $E_0/E_1 = \cos^4\theta = 0,85$ d'où $\theta \approx 16^\circ$.

Ce résultat est proche de celui obtenu lors de l'observation de la morphologie de rupture du monofilament par traction (p.23).

Northolt (24) a constaté un changement de comportement en traction du Kevlar par analyse de diffraction aux rayons X et a attribué la dépendance de la contrainte au module, à une augmentation progressive de l'orientation des cristallites. On peut retrouver les résultats précédents par l'équation donnée par Northolt, qui fait intervenir l'allongement, et la contrainte:

$$\varepsilon = (\sigma / E_c) + (1/2) * \langle \sin^2 \theta \rangle * [1 - \exp(-\sigma / G)]$$

ε : allongement en %

σ : contrainte appliquée à la fibre

$\langle \sin^2 \theta \rangle$: paramètre d'orientation

G : module de cisaillement

E_c : module du cristal du monofilament avec ses défauts dit module apparent

On relève les contraintes et les allongements correspondants sur les courbes de traction du Technora et du Kevlar 29, et grâce au logiciel Eurêka, nous pouvons déterminer les valeurs des modules de cisaillement, des modules du cristal, et des paramètres d'orientation pour chaque monofilament.

Pour le Technora on a:

$$\langle \sin^2 \theta \rangle = 0,094$$

$$\text{soit } \theta = 17,8^\circ$$

$$G = 2,7 \text{ GPa}$$

$$E_c = 122 \text{ GPa}$$

Pour le Kevlar 29 on a:

$$\langle \sin^2 \theta \rangle = 0,072$$

$$\text{soit } \theta = 15,5^\circ$$

$$G = 3,11 \text{ GPa}$$

$$E_c = 221 \text{ GPa}$$

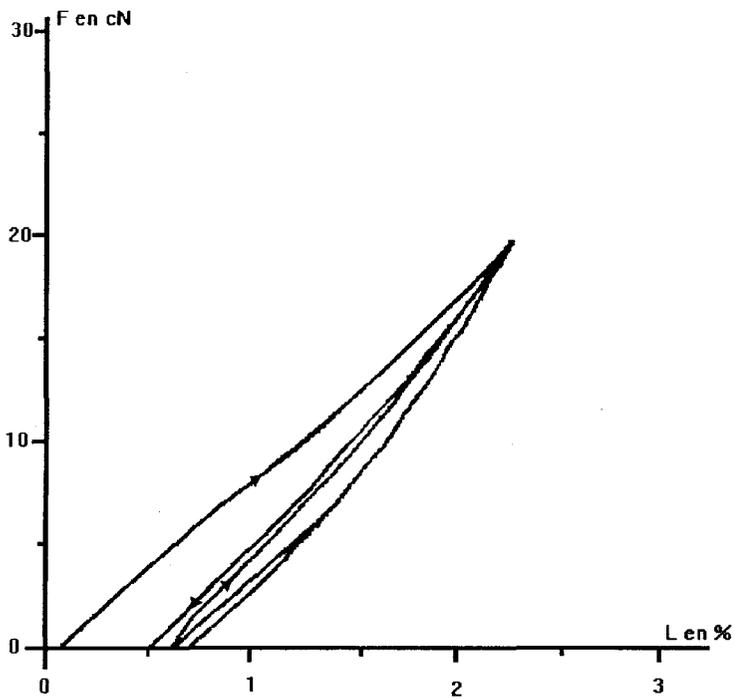
On constate que la valeur de θ obtenue pour le Technora par l'équation proposée par Northolt est voisine de celle obtenue par $E_0/E_1 = \cos^4 \theta$.

Le module apparent est plus important pour le Kevlar ce qui est en accord avec les résultats obtenus aux rayons X. Le Kevlar possède une structure plus cristalline, c'est à dire plus ordonnée.

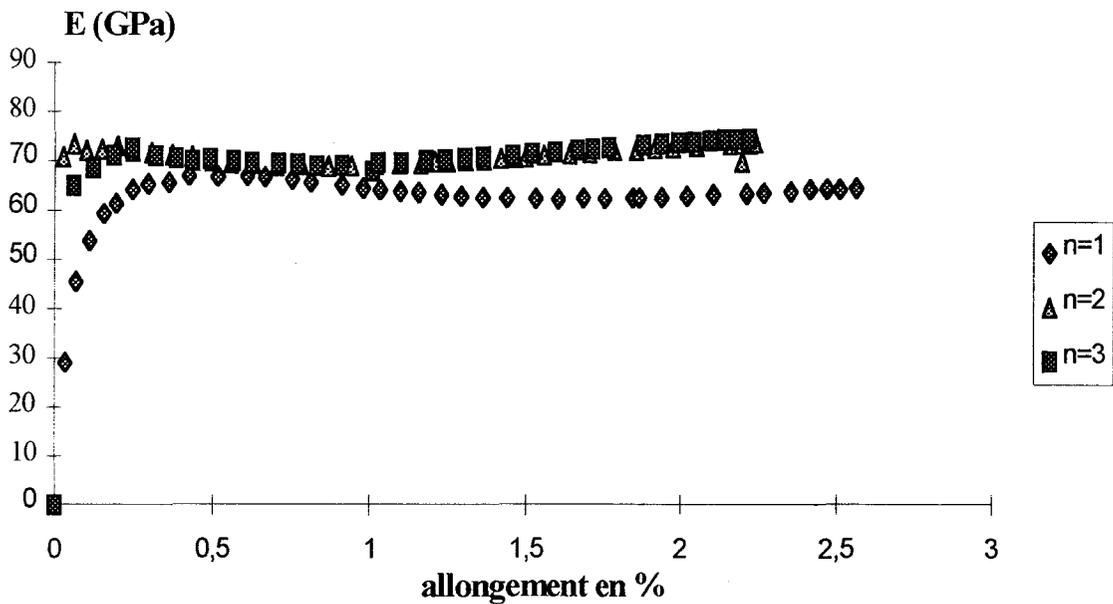
Les modules de cisaillement sont voisins pour les deux matériaux.

On a constaté que les courbes de traction obtenues présentent deux phénomènes un réversible et l'autre non. Or d'après S.R. Allen (25) des déformations irréversible et réversible peuvent être caractérisées par des cycles de chargement. Nous décidons donc pour mettre en évidence le phénomène irréversible, d'effectuer plusieurs cycles d'hystérésis (figure II.1.10) en traction sur le monofilament de Kevlar 29 et de Technora, on trace ensuite le module en fonction de l'allongement pour chaque cycle (n) (graphe II.1.11 et II.1.12).

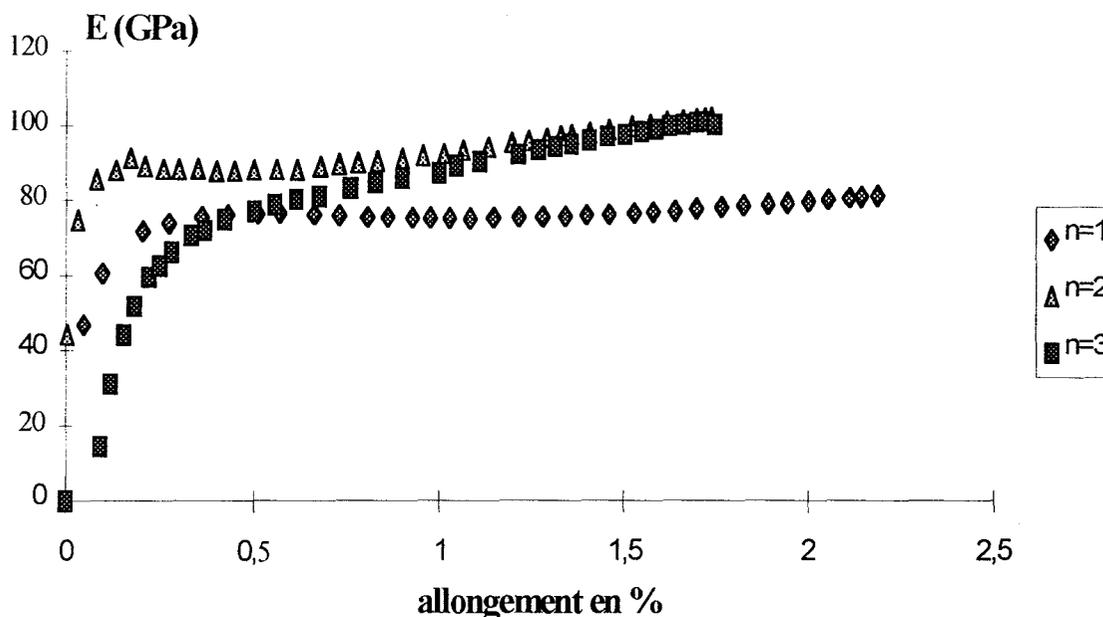
La vitesse de chargement à 20 cN et de déchargement à 0 cN est de 0,5 mm/mn, pour une longueur de jauge de 40 mm.



Graphe II.1.10: Courbe d'hystérésis.



Graphe II.1.11: Module en fonction de l'allongement pour le Technora pour un nombre de cycles n.



Grphe II.1.12: Module en fonction de l'allongement pour le Kevlar pour un nombre de cycles n.

On constate pour le Technora et le Kevlar, tout comme l'a remarqué S.R. Allen (25) pour le Kevlar 29 et 49 pour $n=1$, une diminution du module aux environs de 0,5%, puis une légère augmentation du module en fonction de l'allongement

On constate qu'à la fin du premier cycle, le module a augmenté et ne revient plus à sa valeur d'origine, ce qui montre bien l'irréversibilité.

Ces essais de cycle de chargement confirment donc le phénomène irréversible analysé à partir de la structure.

c- Influence de la vitesse de déformation sur la courbe de traction:

Les essais de traction ont été effectués à différentes vitesses, pour observer l'influence de celles-ci sur les paramètres mécaniques de la fibre de Technora et de Kevlar 29.

Dix essais ont été réalisés pour chaque vitesse de déformation de l'échantillon, ces vitesses sont :

$$10^{-5} ; 5*10^{-5} ; 10^{-4} ; 2*10^{-4} ; 5*10^{-4} ; 8*10^{-4} ; 16*10^{-4}s^{-1}$$

Longueur de jauge : 40 mm

Les valeurs moyennes obtenues pour le Kevlar 29 sont représentées dans le tableau suivant:

Vitesse V (mm/mn)	Vitesse (s ⁻¹)	Force à la rupture Fr (cN) ± 4,3	Allongement ε (%) ± 0,4	Module E ₀ (GPa) ± 6,4	Module E ₁ (GPa) ± 5,4
0,024	10 ⁻⁵	27,8	3,2	63,0	85,0
0,12	5*10 ⁻⁵	31,6	3,4	60,0	82,0
0,24	10 ⁻⁴	28,5	3,1	70,0	84,0
0,5	2*10 ⁻⁴	29,0	3,2	67,0	84,0
1,2	5*10 ⁻⁴	29,9	3,2	72,0	93,0
2	8*10 ⁻⁴	27,8	3,0	73,0	92,0
4	16*10 ⁻⁴	32,0	3,3	73,0	92,0
13,3	5,5 *10 ⁻³	35,5	3,8	75,8	98,4
24	10 ⁻²	36,0	3,6	79,4	98,7
48	2*10 ⁻²	35,8	3,6	78,9	97,4

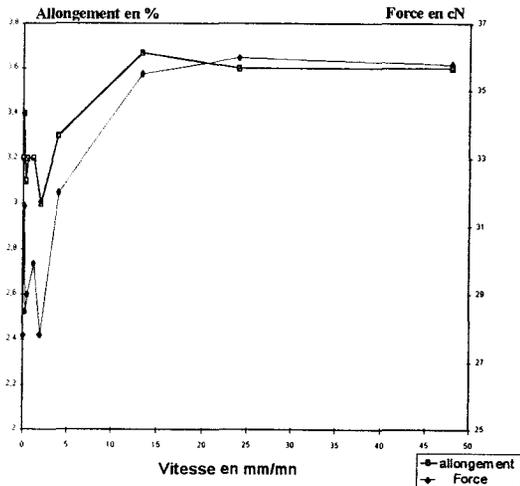


Figure II.1.13: Influence de la vitesse sur la force et l'allongement à la rupture du Kevlar 29.

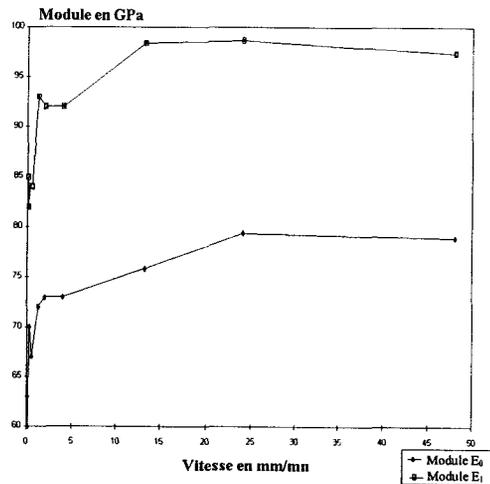


Figure II.1.14: Influence de la vitesse sur les modules du Kevlar 29.

Les valeurs moyennes obtenues pour le Technora sont représentées dans le tableau suivant:

Vitesse V (mm/mn)	Vitesse (s^{-1})	Force à la rupture Fr (cN) $\pm 4,3$	Allongement ϵ (%) $\pm 0,5$	Module E_0 (GPa) $\pm 4,5$	Module E_1 (GPa) $\pm 3,5$
0,024	10^{-5}	30,6	3,6	62,0	78,0
0,12	$5 \cdot 10^{-5}$	29,2	3,5	63,0	78,0
0,24	10^{-4}	28,0	3,4	63,0	83,0
0,5	$2 \cdot 10^{-4}$	31,0	3,6	65,0	77,0
1,2	$5 \cdot 10^{-4}$	30,0	3,6	64,0	76,0
2	$8 \cdot 10^{-4}$	29,9	3,6	63,0	76,0
4	$16 \cdot 10^{-4}$	28,0	3,4	62,0	75,0
13,3	$5,5 \cdot 10^{-3}$	36,4	4,0	67,2	81,6
24	10^{-2}	38,2	4,3	66,0	82,0
48	$2 \cdot 10^{-2}$	37,4	4,2	66,6	82,4

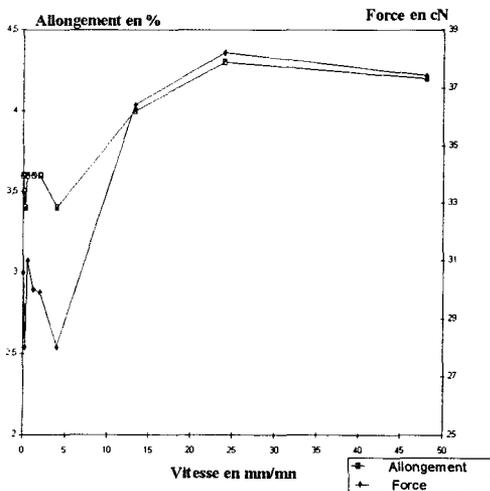


Figure II.1.15: Influence de la vitesse sur la force et l'allongement à la rupture du Technora.

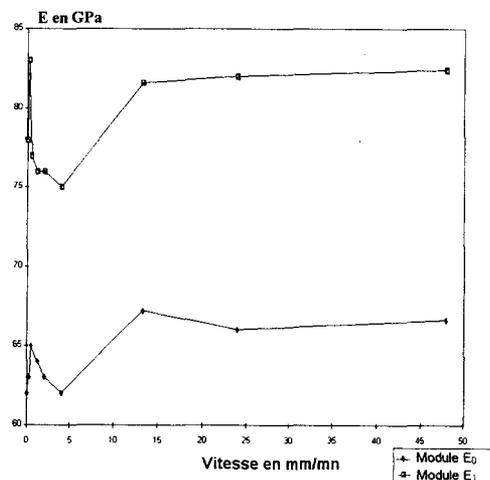


Figure II.1.16: Influence de la vitesse sur les modules du Technora.

On constate que les paramètres des deux matériaux se comportent quasiment de la même façon. Une faible vitesse de déformation a peu d'influence sur la force et l'allongement à la rupture ainsi que sur les modules. A partir de $8 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$, on a une augmentation de la force et de l'allongement, puis à partir de 10^{-2} s^{-1} une stabilisation. En ce qui concerne les modules, pour le Kevlar on a une légère augmentation avec la vitesse (à partir de $16 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$) ensuite stabilisation à partir de 10^{-2} s^{-1} , pour le Technora les modules ont une légère augmentation à la même vitesse conduisant rapidement le module à une stabilisation. En effet nous ne pouvons pas dire que les valeurs observées pour le Technora sont influencées, car ces valeurs restent toujours dans l'encadrement d'erreur.

Le fait qu'une faible vitesse influe peu sur les différents paramètres peut être expliqué par la dissipation de la chaleur dans les matériaux. Lorsque la vitesse augmente, on provoque un échauffement du monofilament; la section de celui-ci étant faible, la chaleur sera très vite dissipée dans l'air, d'où également la faible influence de ces vitesses sur les essais sur monofilament. On remarquera plus loin que pour des vitesses un peu plus importantes le monofilament et le câble en Technora, ont quasiment le même comportement à savoir une augmentation de la force et de l'allongement.

d- La statistique de WEIBULL:

On constate que pour des monofilaments de longueurs de jauge différentes, 40 mm et 70 mm, la contrainte à la rupture varie.

Quel que soit le matériau, la contrainte à la rupture diminue quand la longueur augmente, ceci est dû à la présence de défauts le long de la fibre. Plus celle-ci est longue, plus le nombre de défauts est grand et plus la probabilité de casse est importante.

La statistique de WEIBULL (26) est basée sur le fait que la probabilité de rupture est liée à la densité de défaut, par unité de longueur.

La résistance critique de la fibre pour une longueur donnée peut être évaluée mathématiquement à partir de ce modèle.

On considère que les fibres sont constituées de n chaînons de longueur égale. La résistance de chaque chaînon dépend du chaînon lui-même. La fibre cassera au niveau du chaînon qui aura le défaut le plus sévère c'est à dire, le chaînon le plus faible.

WEIBULL a déterminé une distribution à trois paramètres:

$$P = 1 - \exp \{-n [(\sigma - \sigma_u) / \sigma_0]^m\}$$

- P probabilité que la fibre casse à la contrainte σ .
- n nombre de chaînons.
- m premier paramètre de WEIBULL.
- σ_0 deuxième paramètre de WEIBULL.
- σ contrainte à la rupture.
- σ_u paramètre d'ajustement, sans sens physique, il est donc suggéré de ne prendre que deux paramètres pour la fonction de WEIBULL.

En prenant l'expression logarithmique et en négligeant σ_u , Weibull montre que:

$$\text{Ln}[\text{Ln}(1/(1-P))] = m \text{Ln}(\sigma) + [\text{Ln}(n) - m \text{Ln}(\sigma_0)]$$

En traçant les résultats expérimentaux sous la forme $\text{Ln}[\text{Ln}(1/(1-P))]$ en fonction de $\text{Ln}(\sigma)$, on obtient une droite. La détermination de la pente de cette droite de régression nous permet d'avoir le premier paramètre de Weibull m .

P est déterminé par $P = [(i-0.5)/N]$

avec:

- i fréquence cumulée
- N nombre de mesure.

* Pour la fibre de kevlar 49:

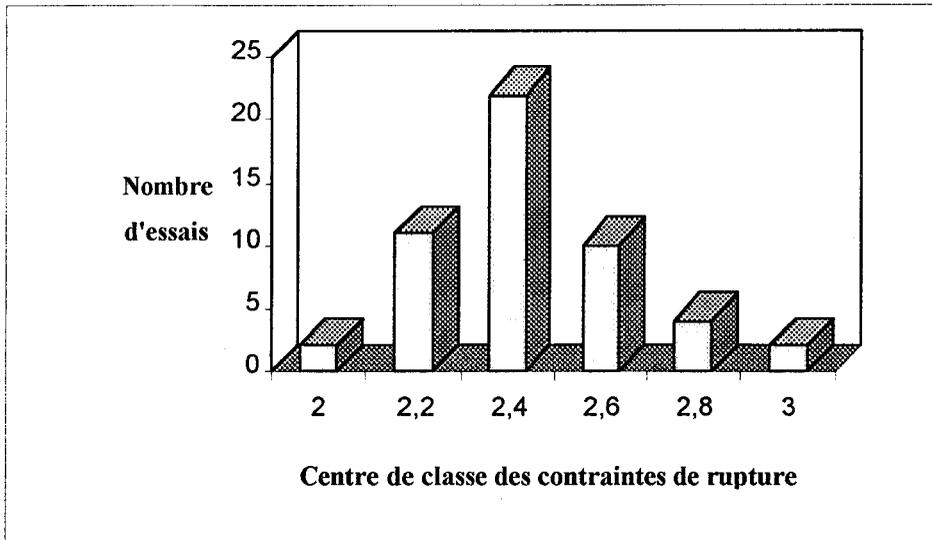


Figure II.1.17: Fréquence des résistances à la rupture du Kevlar 49 pour une longueur de jauge de 20mm

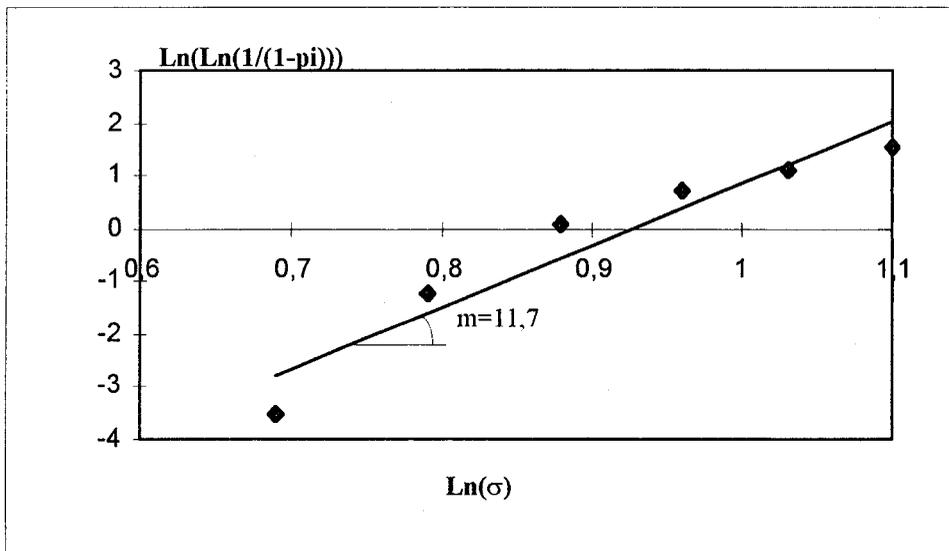


Figure II.1.18: Fréquence cumulative des résistances à la rupture du Kevlar 49 pour une longueur de jauge de 20 mm.

*** Pour la fibre de Technora:**

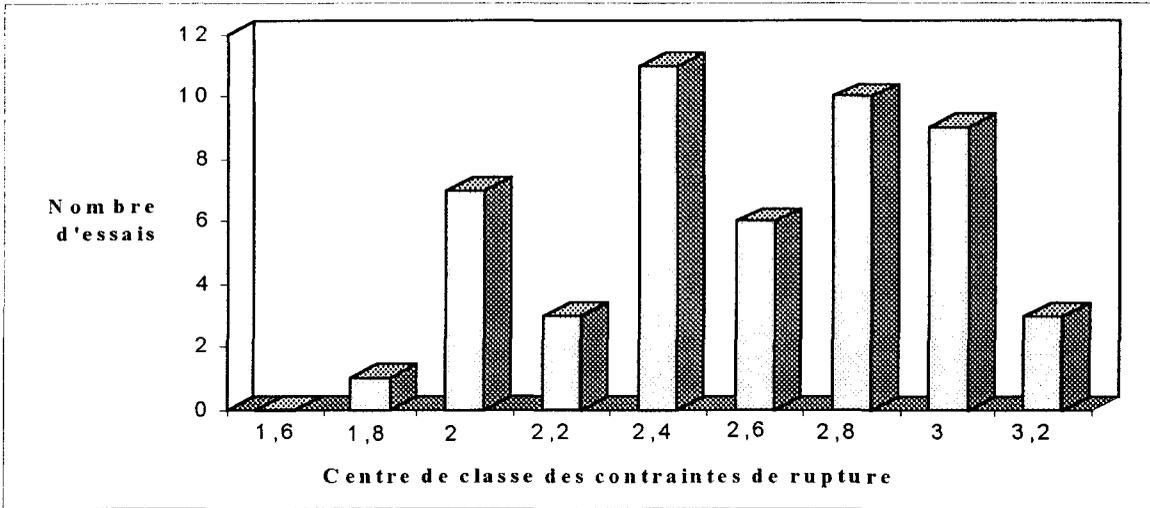


Figure II.1.19: Fréquence des résistances à la rupture du Technora pour une longueur de jauge de 40mm.

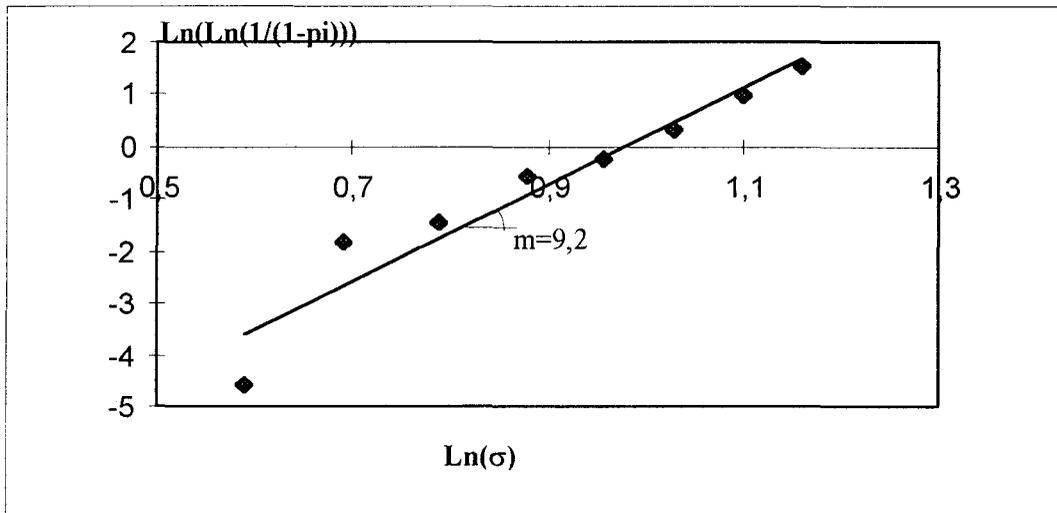


Figure II.1.20: Fréquence cumulative des résistances à la rupture du Technora pour une longueur de jauge de 40 mm.

** Pour la fibre de Kevlar 29:*

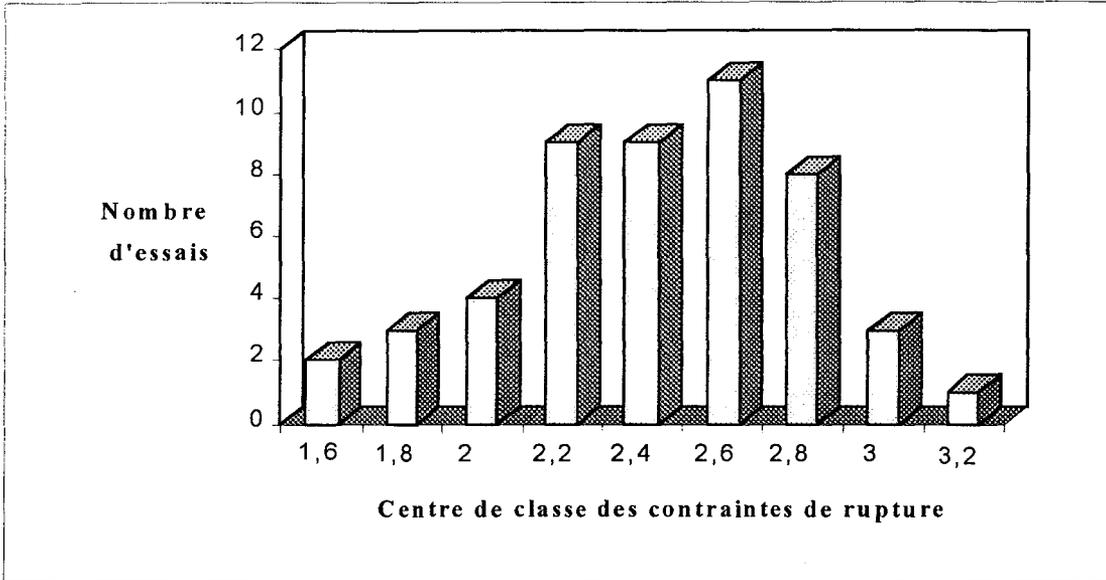


Figure II.1.21: Fréquence des résistances à la rupture du Kevlar 29 pour une longueur de jauge de 40mm.

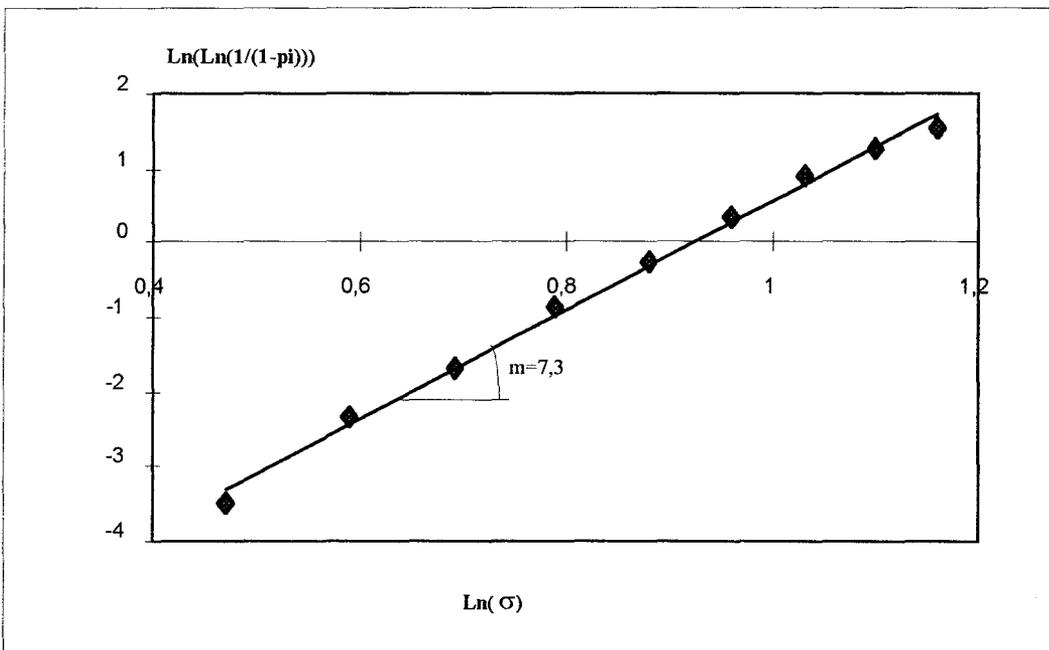


Figure II.1.22: Fréquence cumulative des résistances à la rupture du Kevlar 29 pour une longueur de jauge de 40 mm.

Les pentes m obtenues pour les différents matériaux sont représentées dans le tableau II.1.1 (p.31).

La valeur de m permet de calculer la contrainte de rupture pour une longueur donnée à partir de l'équation:

$$\sigma_2 = \sigma_1 \cdot (l_1 / l_2)^{(1/m)}$$

- σ_1 : contrainte de rupture pour la longueur l_1

Vérification pour le Technora de la loi de WEIBULL:

On a:

$$-m = 9.2$$

$$-\sigma_1 = 2.6 \text{ GPa}$$

$$-l_1 = 40 \text{ mm}$$

soit pour $l_2 = 70 \text{ mm}$ on peut calculer σ_2 :

$$\sigma_2 = \sigma_1 \cdot (l_1 / l_2)^{(1/m)} = 2,4 \text{ GPa}$$

des mesures pour $l = 70 \text{ mm}$ nous donnent:

$$\sigma_{2 \text{ mesuré}} = 2,2 \text{ GPa}$$

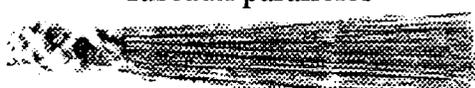
L'expérience montre que la statistique de WEIBULL s'applique aux monofilaments de Technora, elle se vérifie également sur les monofilaments de Kevlar.

II.1.2 Mesure sur câbles de diamètre 2 mm.

Des essais de traction ont été réalisés sur différents types de câbles en Technora T220. Les câbles ont été fabriqués suivant les différentes techniques de construction utilisées industriellement, soit quatre types de construction: tressée, parallèle, moulinée, câblée. Ils sont ensuite enrobés d'une couverture en polyester destinée à les protéger durant leur utilisation. Cette couverture est industriellement fusionnée.

Pour observer le comportement des différents types de câble ainsi que l'influence de la couverture l'étude est menée sur les 4 types de câble avec une couverture fusionnée et sur ces mêmes câbles avec une couverture non fusionnée, l'étude sera complétée par un type de câble sans couverture.

Nous disposons donc des câbles:

Ame	Description	Titre (denier**)	Couverture
Tressée	12 fuseaux* de 5 pas tous les 154 mm (angle de torsion 30°) 	1 500 d	- sans - non fusionnée - fusionnée
Parallèle	fuseaux parallèles 	1 500 d	- non fusionnée - fusionnée
Moulinée	torsion de 12 fuseaux 40 t/m en Z (angle de torsion 13°) 	1 500 d	- non fusionnée - fusionnée
Câblée 4/3	les 12 fuseaux ont été séparés en trois, ils subissent indépendamment une torsion de 57 t/m en S. On applique ensuite à l'ensemble une torsion de 33 t/m en Z (20°). 	1 500 d	- non fusionnée - fusionnée

*fuseau: 1000 monofilaments parallèles entre eux

**denier: finesse d'une fibre. C'est le poids en grammes de 9000 mètres de fibre.

Ces câbles ont été réalisés par la Société *COUSIN FRERES*.

Les essais ont été réalisés sur machine ZWICK 1456, en présence d'extensomètres qui sont en contact avec le câble et qui permettent de mesurer l'allongement de celui-ci, en ne tenant pas compte des glissements du câble dans les mâchoires ici de type "cors de chasse". Le capteur utilisé a une capacité de 10 kN. Trois essais sont effectués pour un même câble si ceux-ci sont concordants, sinon plus.

- Vitesse d'essai: 100 mm/mn soit $0,5 \text{ mn}^{-1}$
- Longueur de câble utilisé pour le test: 2m
- Longueur entre les mâchoires: $\approx 300 \text{ mm}$
- Longueur entre les extensomètres: 200 mm
- Précharge :10N

Le titre de l'âme est déterminé en pesant un mètre de celle-ci.

Les résultats obtenus sont résumés dans les tableaux suivants (tableaux II.1.2.1 et II.1.2.2)

Tableau II.1.2.1: Câbles avec couverture non fusionnée.

Construction du câble	Ame tressée 1500d	Ame parallèle 1500d	Ame moulinée 40T/Z 1500d	Ame câblée 4/3 1500d	Tresse sans couverture
Force à la rupture en N	4671 ± 48	4256 ± 86	4400 ± 64	4859 ± 102	4055 ± 72
Fr par mèche* en N	389 ± 24	354 ± 43	367 ± 32	405 ± 51	338 ± 36
Allongement en %	4,43 ± 0,06	3,7 ± 0,1	4,33 ± 0,06	4,4 ± 0,1	3,83 ± 0,06
Module en GPa à l'origine	58,0 ± 1,4	65,0 ± 3,0	54,0 ± 1,5	60,0 ± 2,6	59,0 ± 2,0
Module en GPa près de la rupture	80 ± 2	85 ± 4	77 ± 2	83 ± 3	79 ± 3
Titre de l'âme en Tex**	2116	2093	2074	2125	2088
Ténacité en cN/Tex	221	203	212	229	194
Module Spécifique en N/Tex	50,0 ± 1,2	55,0 ± 2,6	49,0 ± 1,4	52,0 ± 2,3	51,0 ± 1,7

*une mèche correspond à un fuseau

**Tex: poids en grammes de 1 000 mètres de fibre

Tableau II.1.2.2: Câbles avec couverture fusionnée.

Construction du câble	Ame tressée 1500d	Ame parallèle 1500d	Ame moulinée 40T/Z 1500d	Ame câblée 4/3 1500d
Force à la rupture en N	4712 ± 102	3512 ± 25	4501 ± 53	4564 ± 27
Fr par mèche en N	392 ± 21	298 ± 13	375 ± 27	380 ± 14
Allongement en %	4,23 ± 0,06	2,96 ± 0,05	4,03 ± 0,06	4,06 ± 0,06
Module en GPa à l'origine	64 ± 2	70 ± 2	66 ± 2	65 ± 2
Module en GPa près de la rupture	79 ± 3	83 ± 2	82 ± 2	80 ± 2
Titre de l'âme en Tex	2116	2093	2074	2125
Ténacité en cN/Tex	222	168	217	215
Module Spécifique en N/Tex	53 ± 2	56 ± 2	54 ± 2	53 ± 2

a- Commentaire:

Si l'on compare les résultats du câble tressé sans couverture, avec ceux obtenus pour celui avec couverture, on constate que la présence de la couverture conduit à une force à la rupture plus élevée, ainsi qu'un allongement à la rupture plus important. Par contre les modules restent voisins. La présence de la couverture demande donc une force de rupture pour la rompre qui s'ajoute à celle de l'âme. Par contre la faible rigidité de la couverture ne modifie pas la rigidité du câble.

Si l'on compare maintenant les constructions entre elles pour les câbles avec une couverture non fusionnée, on remarque que la résistance du câble à âme parallèle est beaucoup plus faible que celles des autres constructions. Ceci est dû principalement à la bonne cohésion des autres câbles de part leur angle de torsion. Par contre le câble à âme parallèle donne les modules les plus importants du fait de l'orientation parallèle des filaments, d'où une organisation plus importante par rapport aux autres câbles. Les allongements sont tous voisins.

Les valeurs obtenues sont proches de celles données dans la littérature (3), tout particulièrement pour le module spécifique ($E_{sp}=50$ N/Text), ainsi que la ténacité ($T=238$ cN/Text), le module près de la rupture est supérieur à celui donné par la littérature ($E= 70$ GPa).

On constate que l'on a une perte de résistance des câbles avec couverture fusionnée par rapport à ceux avec couverture non fusionnée, mis à part pour le câble tressé, dont la résistance est quasiment inchangée, ceci est dû à son angle de torsion plus important que pour les autres constructions. On suppose que le câble tressé conserve la même cohésion dans les deux types de couvertures.

En ce qui concerne les modules, on remarque que ceux à l'origine sont légèrement plus grands que ceux obtenus pour les couvertures non fusionnées, ceci est dû à la rigidité de la couverture après fusion.

Nous pouvons calculer la contrainte du monofilament à partir des valeurs obtenues pour le câble à âme parallèle en supposant une répartition uniforme de la force de traction. Le câble est constitué de 12 fuseaux de 1000 monofilaments chacun, nous vérifions que:

$$\sigma_{monofilament} = \frac{F_{cable} / (1000 * 12)}{\pi * (R_{monofilament})^2}$$

soit

$$\sigma_{monofilament} = \frac{4256 / (1000 * 12)}{\pi * (6,2 * 10^{-6})^2} * 10^{-9} = 2,93 GPa$$

La valeur de la contrainte obtenue sur monofilament est de $2,56 \pm 0,35$ GPa (Tab.II.1.1 p.31), la valeur calculée à partir du câble est du même ordre de grandeur, nous avons donc un rapport entre le monofilament et le câble à âme parallèle. Il faut envisager également un rapport avec les autres câbles en tenant compte de l'angle de torsion de ces derniers.

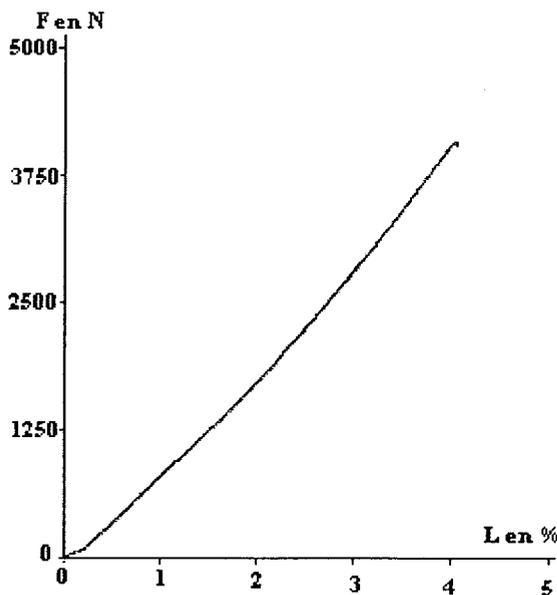
Certains auteurs tels que J.W.S HEARLE et J.L. WHITE (27-28), ont étudié les relations liant le fil torsadé au monofilament le constituant. D'après eux, il est possible de prédire des variations du module en traction et d'orientation des cristallites avec l'angle de torsion donné au fil. Les équations ont été déterminées pour des systèmes parfaits (l'hélice due à la torsion est idéale). Ces auteurs ont pu mettre en évidence que le module en traction diminuait, lorsque l'angle de torsion augmentait.

Nos câbles ont un angle de torsion respectivement de 0° , 13° , 20° , 30° pour l'âme parallèle, moulinée, câblée, tressée. Si l'on regarde l'évolution des modules pour les câbles avec couverture fusionnée (produit fini), on remarque une diminution des modules avec l'angle de torsion, ce qui confirme les résultats trouvés par HEARLE et WHITE.

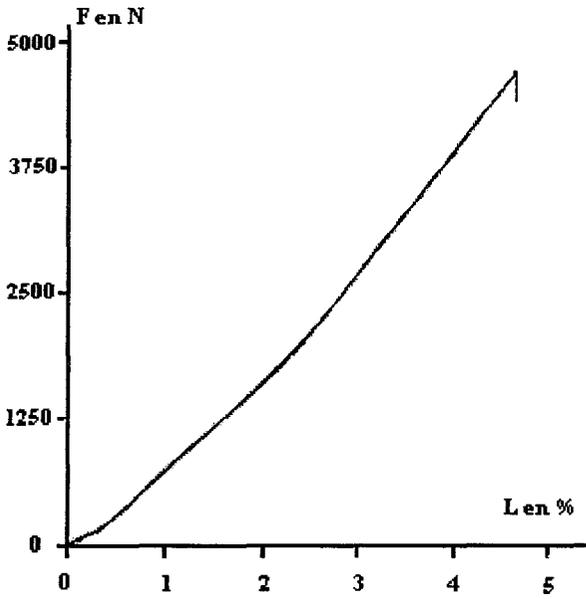
b- Allure des courbes:

On constate que quelle que soit la nature de l'âme du câble, les courbes de traction sont semblables en allure. Les courbes ont une légère incurvation, on peut aussi calculer deux modules d'élasticité, un à l'origine plus faible que celui calculé près de la rupture. Le câble se rigidifie tout comme le monofilament au cours de l'essai de traction, les cristallites s'alignent et conduisent à une structure plus ordonnée.

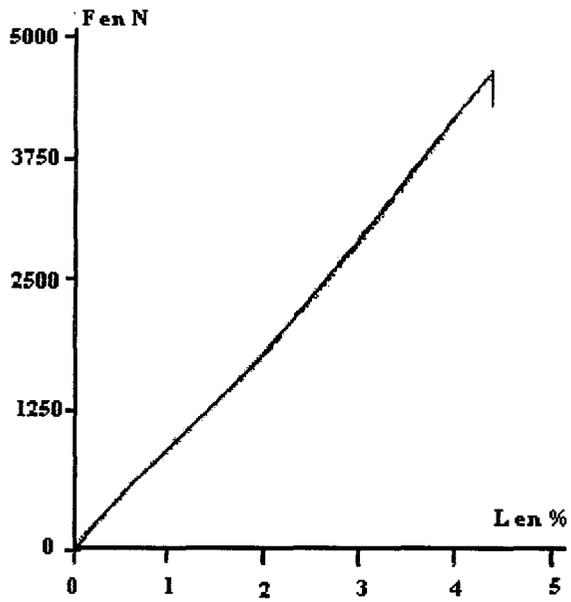
Figure II.1.2.3: Courbes de traction des différents câbles.



Câble à âme tressée sans couverture

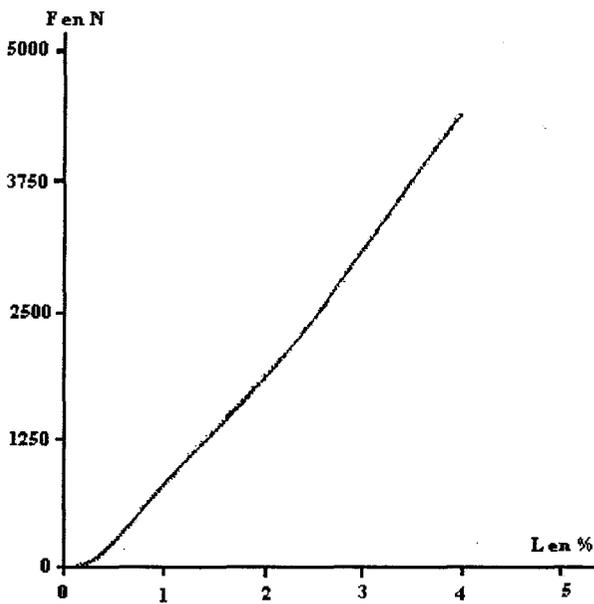


Couverture non fusionnée

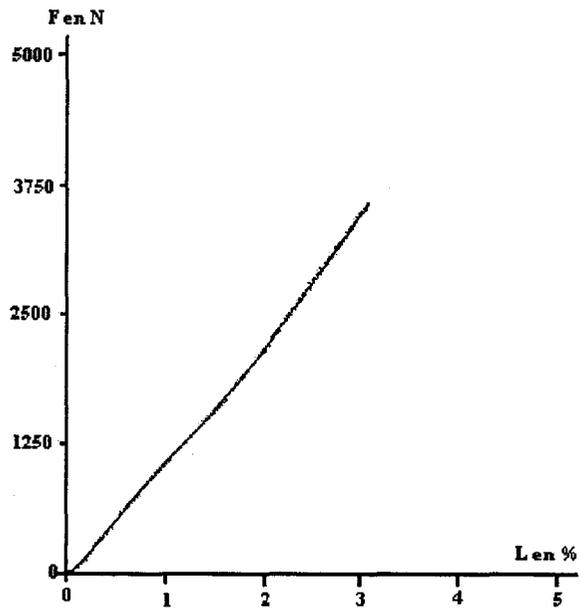


couverture fusionnée

Câbles à âme tressée avec couverture:

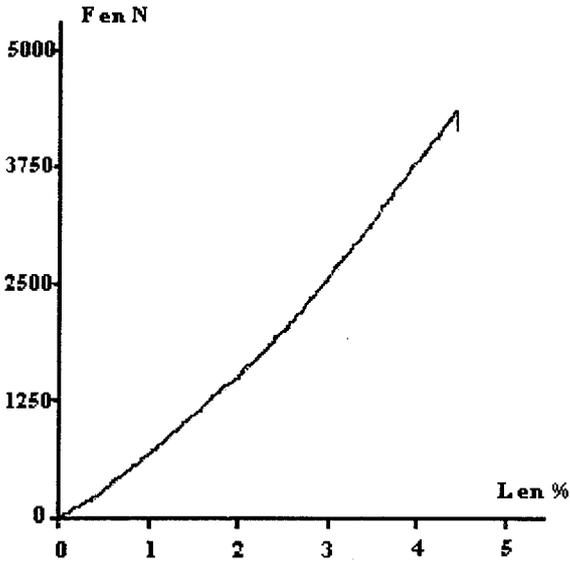


Couverture non fusionnée

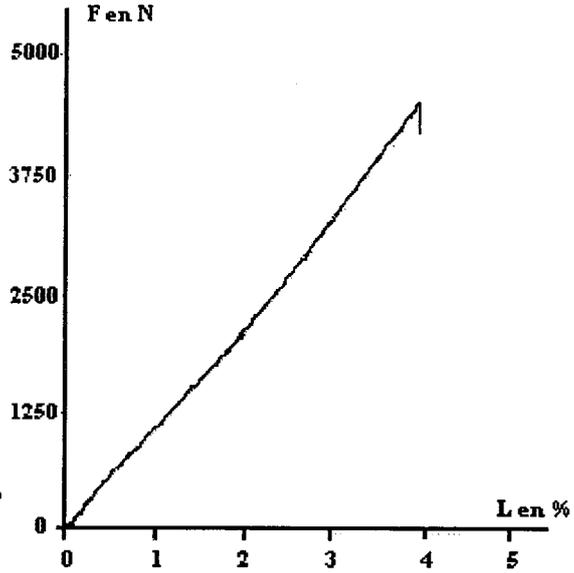


Couverture fusionnée

Câbles à âme parallèle avec couverture:

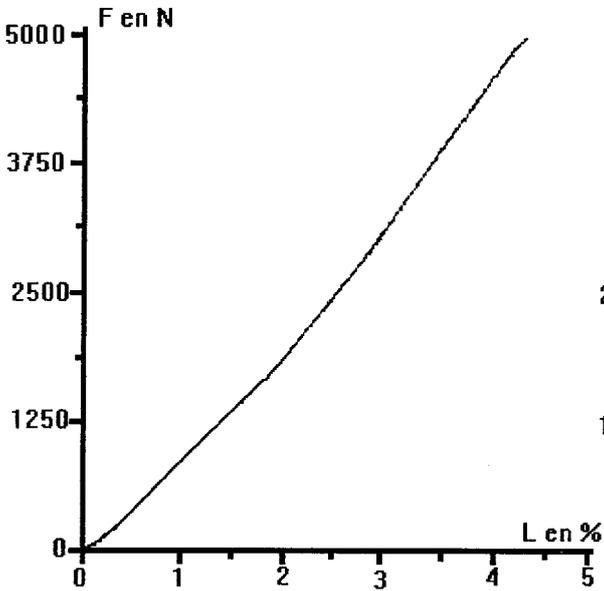


Couverture non fusionnée

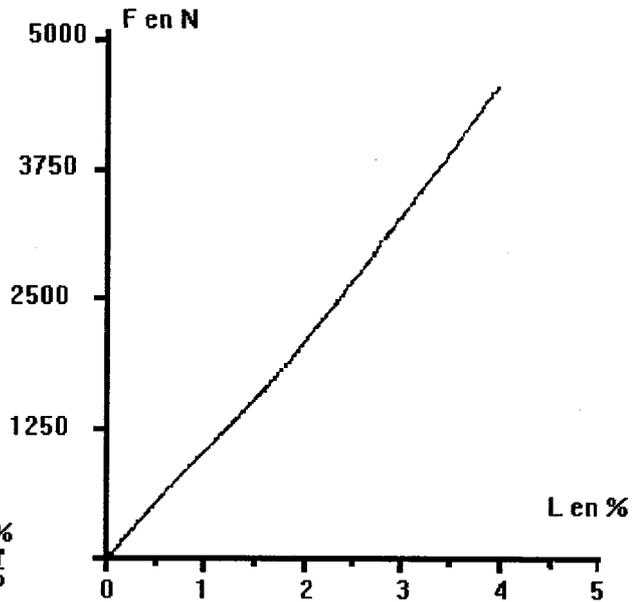


Couverture fusionnée

Câbles à âme moulinée avec couverture:



Couverture non fusionnée



couverture fusionnée

Câbles à âme câblée avec couverture:

La loi de Weibull contrairement aux monofilaments n'est pas applicable pour les câbles: les 12 000 monofilaments de la section répartissent la densité des défauts dans les 200 mm de longueur entre extensomètre.

c- Essai sur câble fatigué.

Des essais de traction ont également été faits sur une tresse fatiguée comportant 12 fuseaux sans couverture. Le câble a subi 12 000 cycles de 4 flexions simples, sur des poulies de diamètre 26 mm, sous une charge de 28 Kg (Cf. Chapitre III).

Résultats obtenus:

- Force à la rupture F_r	: 1635 N
- Allongement	: 2.3 %
- Module	: 52 GPa
- Module Spécifique	: 34 N/Tex
- Ténacité	: 78 cN/Tex

L'allure de la courbe (Fig.II.1.2.4) obtenue ne présente plus d'incurvation, contrairement à la tresse non fatiguée, on peut penser que les chaînes moléculaires se sont alignées lors de la fatigue sous la masse de 28 Kg. Nous constatons un pied de courbe important. Après l'essai de fatigue, la décharge en tension du câble permet peut être une certaine désorganisation des fibres due à la rupture des fibrilles. Le pied de courbe correspond, alors à la remise en place des filaments. Un seul module est calculé. La valeur est nettement plus faible que celle obtenue près de l'origine pour le câble non fatigué. Le câble fatigué a perdu environ 60% de la résistance à la rupture d'une tresse intacte.

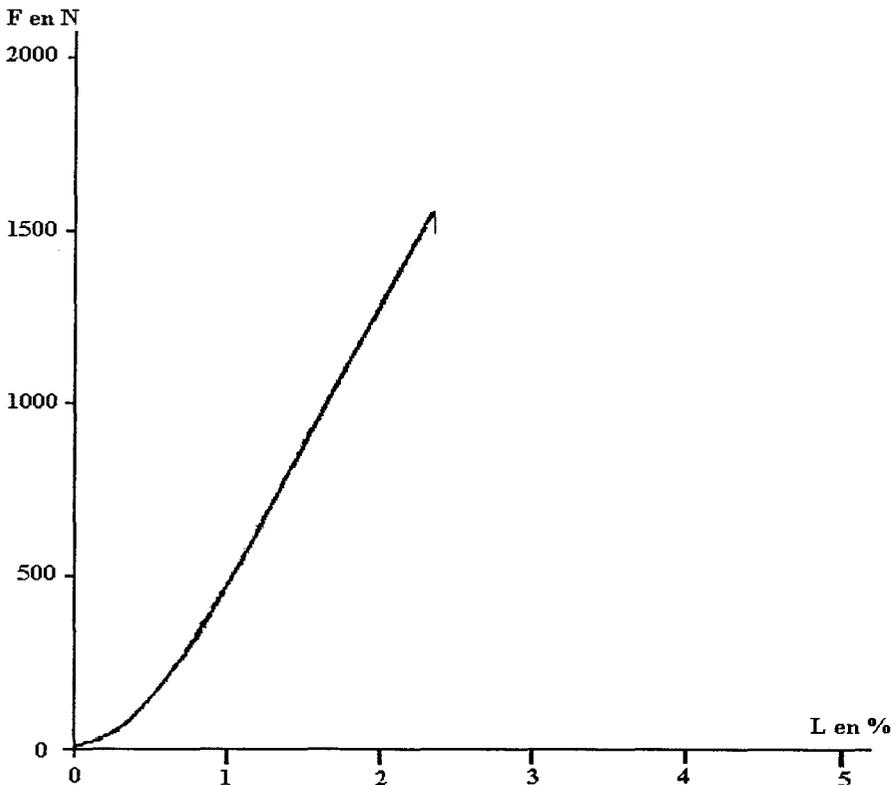


Figure II.1.2.4: Courbe de traction pour une tresse fatiguée.

Des photos (photo II.1.2.5) au microscope optique, ont été réalisées sur monofilaments extraits du câble fatigué. On observe sur ces photos la rupture de certaines fibrilles, sans doute due à l'abrasion. Ces fibrilles forment une pelote autour du filament, ce qui provoque une désorganisation du filament voisin et un gonflement du câble, cela confirme l'analyse du pied de courbe de la courbe de traction.

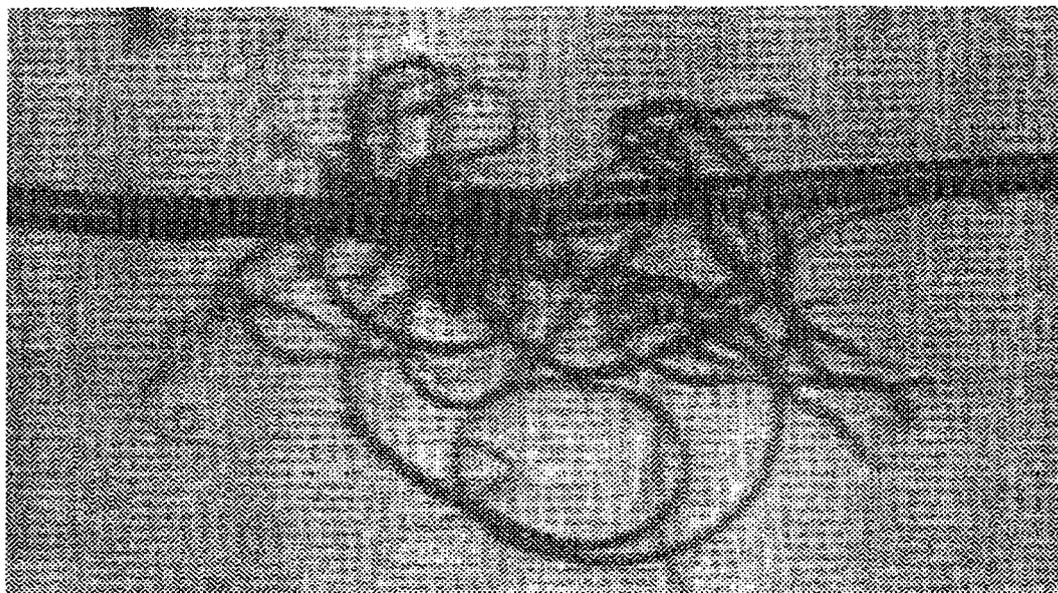


Photo II.1.2.5: Monofilament fatigué.

d- Influence de la vitesse de déformation sur la courbe de traction:

Les essais de traction ont été faits à différentes vitesses de déformation, pour observer l'influence de celles-ci sur les paramètres mécaniques des câbles de Technora (tresse 12 fuseaux). Trois essais ont été réalisés pour une longueur entre les extensomètres de 150 mm pour chaque vitesse, les résultats sont résumés dans le tableau suivant:

Tableau II.1.2.6:

Vitesse V (mm/mn)	Vitesse (s^{-1})	Force à la rupture Fr (N) ± 30	Allongement ϵ (%) $\pm 0,1$	Module E_0 (GPa) ± 2	Module E_1 (GPa) ± 3
10	10^{-3}	3226	3,0	62	83
25	$2,8 \cdot 10^{-3}$	3282	3,0	62	86
50	$5,5 \cdot 10^{-3}$	3207	3,0	62	82
100	10^{-2}	3354	3,3	59	78
200	$2,2 \cdot 10^{-2}$	3537	3,6	62	85
300	$3,3 \cdot 10^{-2}$	3631	3,7	63	79

On constate que la vitesse a une influence sur la valeur de la force à la rupture et sur l'allongement. En effet ces deux paramètres croissent avec la vitesse, surtout lorsque celle-ci est supérieure à $5,5 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. Par contre la vitesse n'a aucune influence sur la valeur des modules. On constate que pour les mêmes vitesses de déformation le câble et le monofilament se comporte de la même façon: augmentation de la force à la rupture et de l'allongement après $5,5 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ et pas d'influence de celle-ci sur les modules.

Ces études de traction donnent des indications sur le comportement mécanique du câble intact. Pour approcher le comportement du câble au cours de son utilisation; des études du comportement dans le temps sont nécessaires. Elles sont envisagées d'un point de vue mécanique par: le fluage et la relaxation d'une part, la fatigue monofilamentaire d'autre part.

II.2.-Essai de fluage.

Un essai de fluage nous permet d'avoir le comportement de l'allongement au cours du temps pour une contrainte constante donnée. La courbe de fluage (fig.II.2) peut comporter trois parties, correspondant à trois étapes de fluage:

- Fluage primaire : pendant lequel la vitesse de déformation diminue, ce qui correspond à une augmentation de la résistance du matériau.
- Fluage secondaire: qui fait apparaître une vitesse de déformation constante au cours du temps.
- Fluage tertiaire : qui est caractérisé par une augmentation de la vitesse de déformation, que l'on peut associer à l'apparition d'un endommagement conduisant à la rupture.

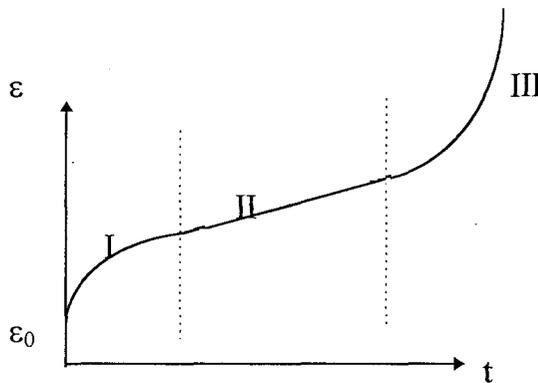


Figure II.2: Courbe de fluage.

II.2.1-Essai de fluage sur DMTA de Polymer Laboratories.

Notre appareil DMTA permet l'étude du fluage grâce à sa mesure précise des déplacements (précision de l'ordre du μm).

Les essais sont réalisés sur monofilament de Technora T220, la longueur d'essai est de 15mm. Les échantillons sont conditionnés pendant 10 mn sous la contrainte à laquelle l'essai de fluage sera réalisé, ensuite ils sont laissés au repos pendant environ 5mn, puis l'essai a lieu.

Le fluage a été effectué à différentes contraintes: 15%, 30%, 65% de la contrainte de rupture.

D'après les courbes obtenues (figure II.2.1.1), on constate une même allure de courbe pour différentes valeurs de contrainte appliquée. On a tout d'abord une droite

quasi verticale traduisant la déformation "élastique" lors de la mise sous contrainte, puis une courbe croissante qui conduit à une stabilité linéaire, quasi horizontale, mais présentant néanmoins une légère pente. Cela correspond aux deux premières étapes du fluage, la 3^{ème} étape n'est pas atteinte car les essais ne sont pas réalisés jusqu'à la rupture du monofilament.

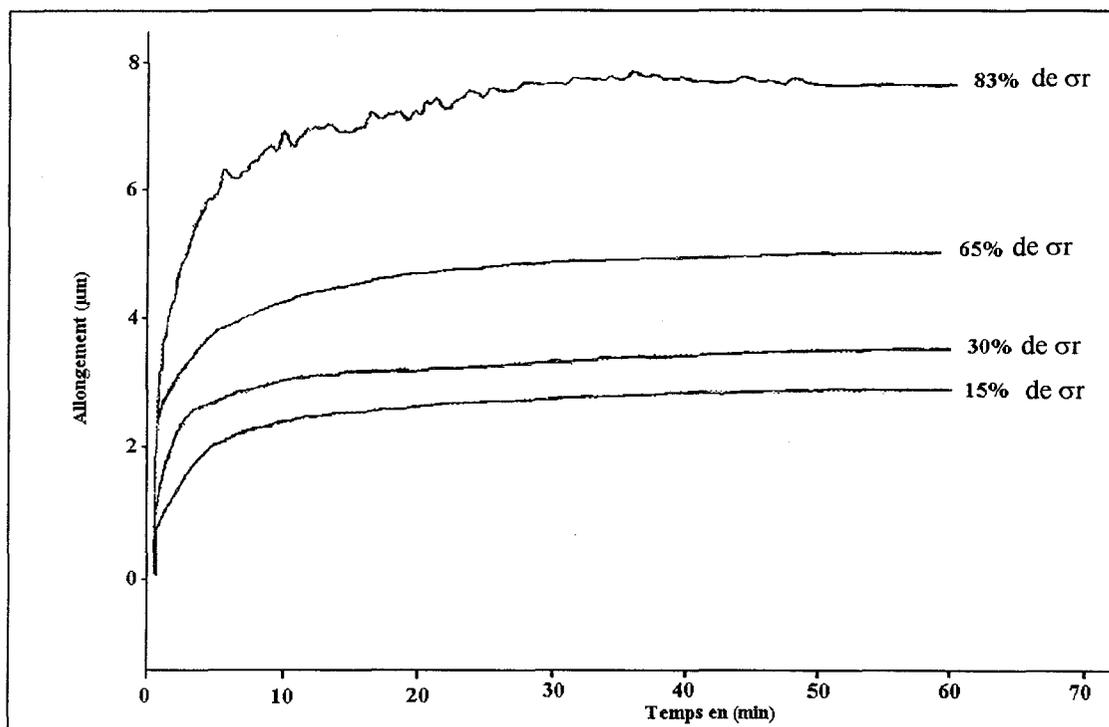


Figure II.2.1.1: Courbes de fluage sur monofilament de Technora à différents pourcentages de la contrainte de rupture.

Différentes études ont été faites pour déterminer les équations des courbes de fluage:

- D'après M.H. LAFFITE (15) l'équation de la courbe de fluage pour le Kevlar 29 est:

$$\varepsilon_f(t) = \tau \cdot m_i \cdot \text{Log} \left[\frac{(t + \tau)}{\tau} \right] + m_s \cdot t$$

- $\varepsilon_f(t) = \text{Log} [1 + (\Delta L / L_0)]$ déformation en fluage à la fin de l'essai (15)
- ΔL : allongement au cours de l'essai pour un temps donné.
- L_0 : longueur d'éprouvette.
- τ : constante de temps .
- m_i : vitesse de déformation initiale.
- m_s : vitesse de déformation à l'infini.

τ , m_i , m_s , ne sont pas accessibles par le calcul, ces constantes sont recherchées à partir des courbes expérimentales et déterminées à l'aide du logiciel Eureka.

Aucune de nos valeurs ne vérifie l'équation proposée par M.H. Laffite. Nous recherchons donc une nouvelle approche.

- D'après S.KACI (29) l'équation de la courbe de fluage d'un câble de Kevlar 29 ou 49 est:

$$\varepsilon_f(t) = a + b \cdot \text{Log } t$$

- $\varepsilon_f = \Delta L / L_0$ allongement de fluage relatif
- ΔL : allongement au cours de l'essai
- L_0 : longueur d'éprouvette
- a et b sont des constantes indépendantes du temps et dépendantes de la température.
- a correspond à l'allongement initial et dépend de la contrainte appliquée.

Nous allons vérifier si nos résultats expérimentaux suivent l'équation plus générale, qui est la suivante:

$$\varepsilon_f(t) = a + b \cdot \text{Log } (1+ct)$$

- $\varepsilon_f(t)$: allongement de fluage relatif
- L_0 : longueur d'éprouvette 15mm.
- a, b, c sont déterminés à l'aide du logiciel Eurêka (tableau II.2.1.2)

Tableau II.2.1.2:

* Charge appliquée	Δl en μm	ϵ_r en %	a	b	c
15%					
t=60mn	10,9 ± 1,3	0,07 ± 0,01	7,8*10 ⁻⁴ ± 1,2*10 ⁻⁴	4,5*10 ⁻⁵ ± 1,6*10 ⁻⁵	0,92 ± 0,05
t=15H	12,5 ± 2,4	0,08 ± 0,02	7,3*10 ⁻⁴ ± 1,6*10 ⁻⁴	2,73*10 ⁻⁵ ± 1,4*10 ⁻⁵	0,75 ± 0,19
30%					
t=60mn	24,9 ± 1,3	0,17 ± 0,01	15,9*10 ⁻⁴ ± 1,3*10 ⁻⁴	4,2*10 ⁻⁵ ± 1,1*10 ⁻⁵	1,00 ± 0,21
t=15H	26,6 ± 1,8	0,18 ± 0,02	15,4*10 ⁻⁴ ± 2,5*10 ⁻⁴	4,05*10 ⁻⁵ ± 0,5*10 ⁻⁵	1,02 ± 0,20
60%					
t=60mn	31,9 ± 2,5	0,21 ± 0,05	20,5*10 ⁻⁴ ± 4,9*10 ⁻⁴	4,4*10 ⁻⁵ ± 1,2*10 ⁻⁵	1,08 ± 0,14
t=15H	27,0 ± 2,5	0,18 ± 0,05	16,7*10 ⁻⁴ ± 4,9*10 ⁻⁴	3,6*10 ⁻⁵ ± 1,3*10 ⁻⁵	0,96 ± 0,15

* Charge appliquée en pourcentage par rapport à la charge à la rupture.

D'après ce tableau nous pouvons dire que:

- a croît avec la contrainte appliquée, et correspond à l'allongement initial. Néanmoins, une petite erreur sur l'origine des temps entraîne une erreur importante sur la valeur de l'allongement initial. Comme il est très difficile de déterminer exactement le temps t=0, la valeur de a est plutôt incertaine. On retrouve ici le problème de démarrage des essais de fluage; la mise en charge durant un certain temps.

- b semble rester constant avec une valeur aux environs de 4*10⁻⁵, bien que l'on ait des valeurs pour des temps de 15 heures légèrement inférieures à celles obtenues pour une heure.

- c est de l'ordre de 1, le temps t étant grand, le développement limité de Log(1+t) est Log(t). La loi peut donc être mise sous la forme

$$\epsilon_f = a + b \cdot \text{Log}(t)$$

On retrouve donc la loi proposée par S. Kaci (29) qui s'applique aux Kevlar 29, et 49 comme au Technora. Pour mieux nous en rendre compte, nous avons tracé l'allongement de fluage relatif (ϵ_f) en fonction du logarithme du temps (jusqu'à 15h) (figure II.2.1.3). Nous avons une droite de pente b. Néanmoins pour des temps très longs les points s'écartent de cette droite, la loi n'est plus logarithmique mais plutôt linéaire en fonction du temps.

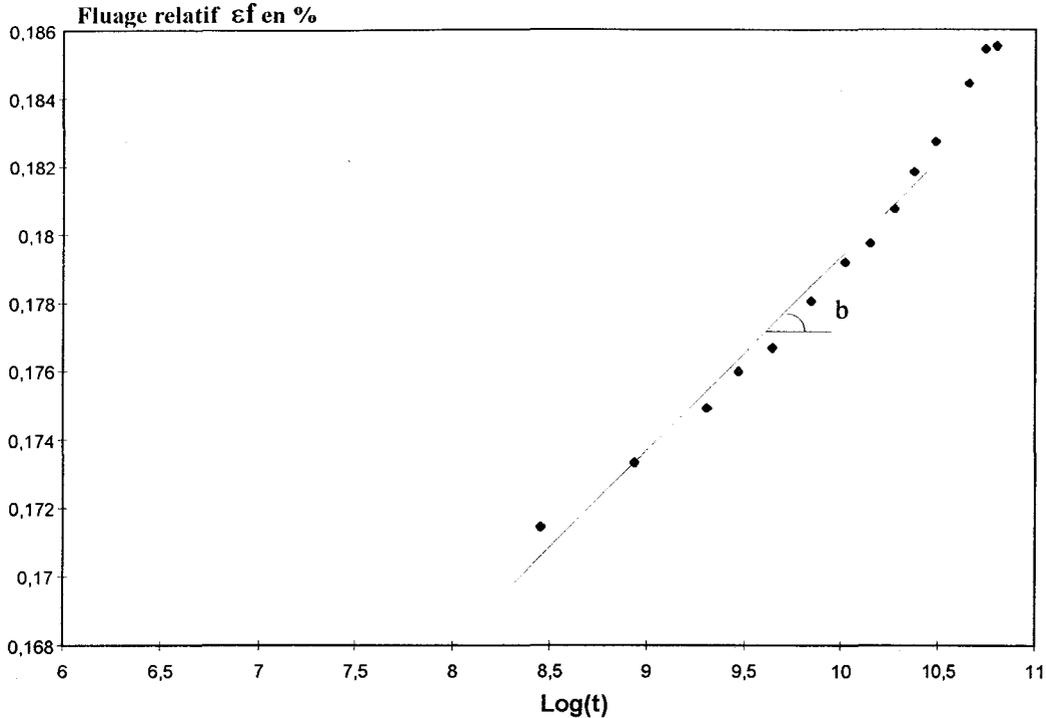


Figure II.2.1.3: Détermination de la pente de la droite allongement =f[$\text{Log}(t)$].

Plusieurs modèles rhéologiques ont été testés pour la première partie de la courbe, tels que les modèles de Burger, de Kelvin-Voigt, mais ces modèles ne sont pas satisfaisants. En conclusion nous pouvons donc dire que nos courbes de fluage vérifient une loi logarithmique.

Pour des temps supérieurs à 10 heures, la courbe peut être considérée comme linéaire en fonction du temps, la pente est très faible.

II.2.2-Essais de fluage, observation au cathétomètre.

Le cathétomètre est un instrument comportant une lunette de visée, se déplaçant le long d'une colonne graduée, qui nous permet de lire à 20 microns près le déplacement de la lunette. Nous pouvons donc mesurer l'allongement du monofilament lors des essais de fluage par visées successives au cours du temps.

Les essais de fluage ont été réalisés sur monofilament de Technora T220, les longueurs initiales sont aux voisinages de 100 et 150 mm. Le fluage a été effectué sous différentes contraintes 10 %, 18%, 25% et 75 % de la contrainte à la rupture.

D'après les différentes courbes obtenues (figure II.2.2.1), on observe une même allure quelle que soit la contrainte appliquée, tout comme pour les essais faits sur DMTA. L'allure semble logarithmique.

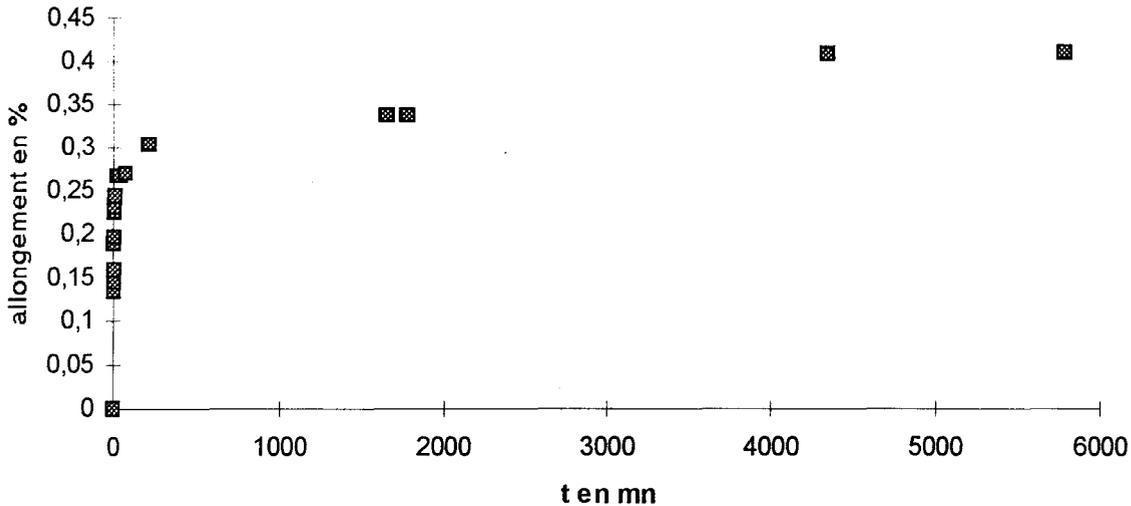


Figure II.2.2.1: Courbe de fluage pour une contrainte de 18 % de sa valeur de rupture, longueur d'essai 140mm

On effectue les mêmes études de courbe que pour les essais faits sur DMTA, et on aboutit à la même conclusion; seule l'équation $\epsilon f(t) = a + b \cdot \text{Log}(t)$ est vérifiée.

- $\epsilon f(t)$ allongement relatif au cours du temps.
- t, temps (en s).
- a, valeur à l'origine, aléatoire par l'observation comme il a été dit, mais pouvant être obtenue par le calcul d'après la courbe contrainte déformation.
- b, est déterminé grâce au logiciel Eurêka. **$b = 10^{-4} (s^{-1})$**

Cette valeur de b est du même ordre de grandeur, bien que plus grande que celle obtenue pour les essais sur DMTA.

Nous avons tracé les courbes expérimentales et recalculées sur un même graphe (figure II.2.2.2) pour une meilleure observation. Nous pouvons voir une quasi superposition des deux courbes.

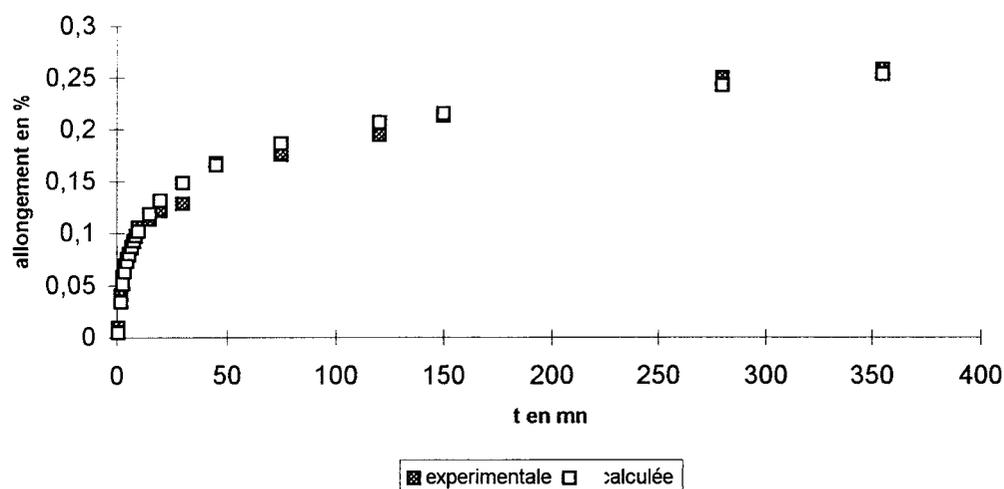


Figure II.2.2.2: Courbes de fluage calculée et expérimentale

Les résultats obtenus confirment ceux obtenus sur DMTA de Polymer Laboratories, où les expériences peuvent être menées de façon plus commode.

Le Kevlar suit la même loi logarithmique pour le fluage (29), c'est à dire $\epsilon(t)=a+b \cdot \text{Log}(t)$, (figure II.2.2.3). La valeur de **b est de $8 \cdot 10^{-3} (s^{-1})$** , plus importante que celle obtenue pour le Technora, de deux ordres de grandeur, ce qui signifie que le Technora flue beaucoup moins que le Kevlar.

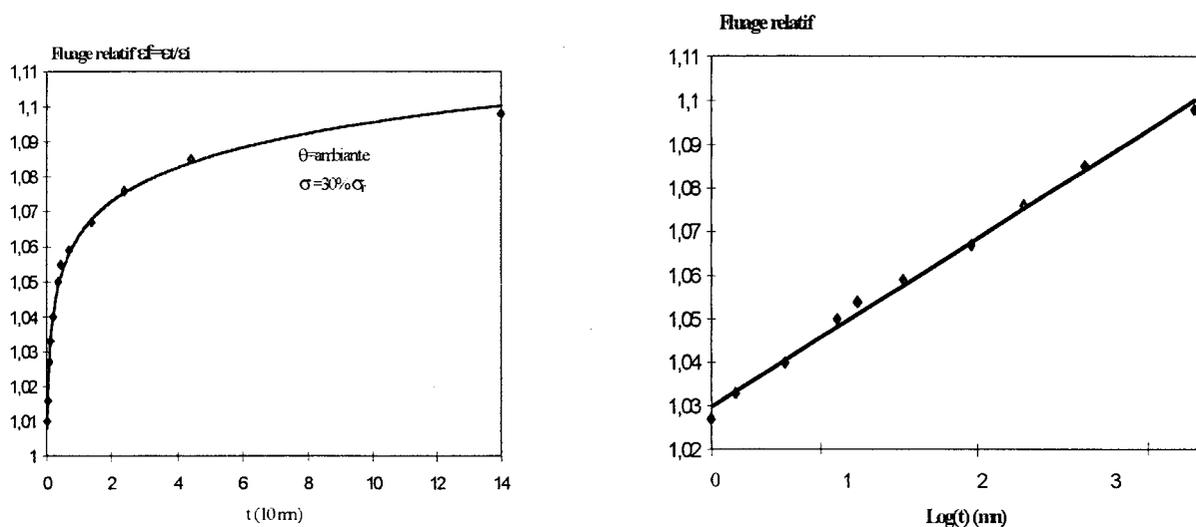


Figure II.2.2.3: Evolution du fluage relatif du Kevlar (type 0,95 TWA) à température ambiante (29).

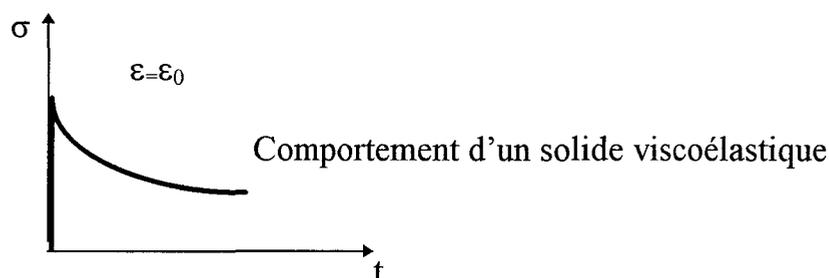
Le comportement en fluage est également gouverné par le glissement des cristallites. En effet le Technora présente un fluage moins important que celui du Kevlar qui est déjà très faible. Bien que la structure du Technora comporte un pont éther qui en principe introduit plus de flexibilité, le faible fluage de cette fibre est dû à des interactions latérales plus importantes que celles du Kevlar (cf.II.1.1.b).

Dans le kevlar c'est la rotation avec glissement des cristallites (glissement des liaisons hydrogène) qui est le facteur prédominant, tandis que dans le Technora le glissement a plutôt lieu dans les zones interfibrillaires. Le Technora étant moins bien organisé que le Kevlar; les liaisons latérales sont plus nombreuses dans les zones interfibrillaires de Technora que celles entre les cristallites du Kevlar, d'où un glissement plus faible et un fluage moins important du Technora.

II.3-Essai de relaxation.

La relaxation consiste à imposer une déformation ε_0 à un échantillon et à suivre la contrainte $\sigma(t)$ nécessaire pour maintenir cette déformation, le comportement du matériau est alors décrit par une fonction $R(t) = \sigma(t) / \varepsilon_0$ dite fonction de relaxation qui a les dimensions d'un module.

La variation de $\sigma(t)$ présente l'aspect décrit dans le schéma suivant:



Il est tout d'abord nécessaire pour imposer la déformation, d'appliquer une contrainte σ élevée. Puis, lorsque se manifeste l'élasticité retardée, une contrainte de plus en plus faible suffit.

Dans le cas d'un matériau qui ne subit pas d'écoulement visqueux, la contrainte tend vers une valeur limite non nulle, ce qui est le cas des fibres de Technora et de Kevlar 29.

II.3.1-Description de l'essai.

On effectue des études de la force de relaxation $F(t)$ pour différents allongements. La courbe de traction présentant deux pentes caractérisant deux déformations: l'une réversible l'autre non (cf.p.34) nous ferons deux essais dans chacune des zones: soit

- 1 et 1,5 % dans la zone réversible
- 2,5 et 3 % dans la zone irréversible.

Pour chaque essai on applique aux monofilaments de Technora et de Kevlar 29 une contrainte, pour amener ceux-ci à l'allongement désiré; on relève ensuite la force F en fonction du temps. Le temps pour chaque essai est limité à 1 000 s.

Les essais sont réalisés sur machine ZWICK 1456 à l'aide du logiciel Z 1007.

II.3.2-Exemple de courbe obtenue :

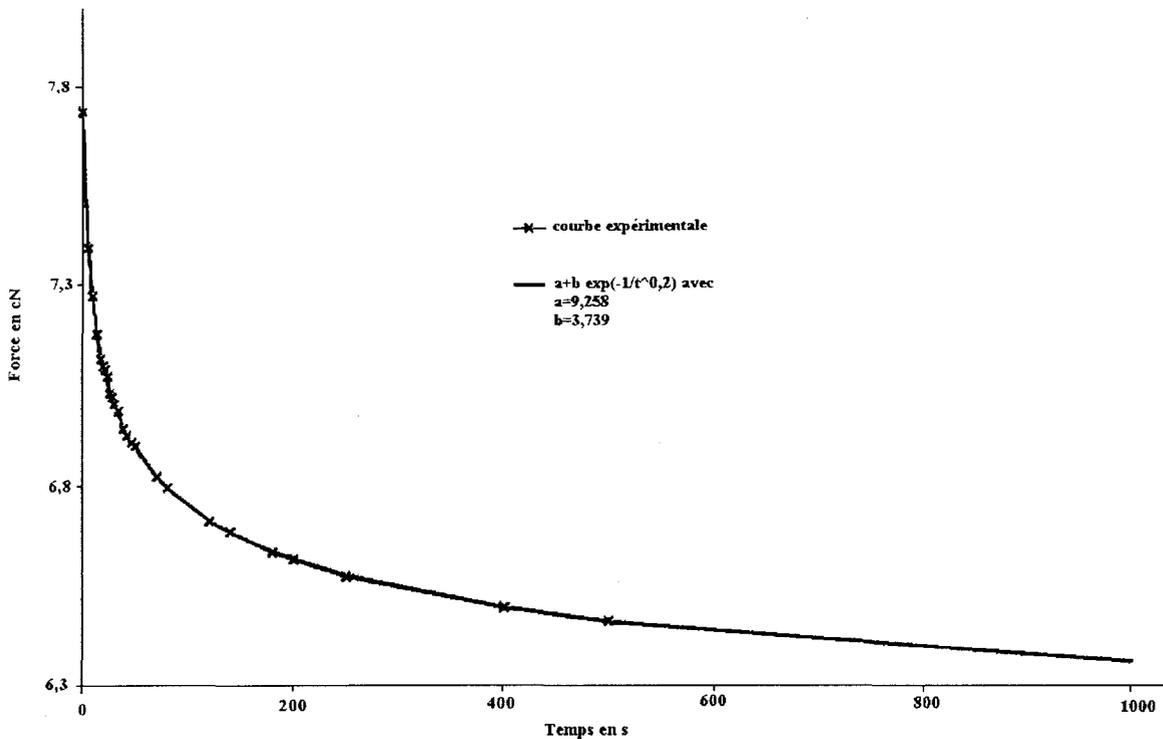


Figure II.3.2 : Relaxation sur monofilament de Technora avec un allongement de 1%

On a une chute rapide de la force, puis celle-ci atteint une valeur limite différente de zéro, tout comme pour les matériaux viscoélastiques, on a la même allure pour les deux fibres Technora et Kevlar 29.

II.3.3-Résultats

Le but essentiel est de déterminer l'équation de ces courbes; cette équation a pu être déterminée par la méthode "des régressions linéaires des moindres carrés", prenant en compte essentiellement les points de la partie quasi linéaire de la courbe.

L'équation obtenue est du type:

$$F(t) = a + b \cdot \exp(-1/t^c)$$

- a correspondant à l'origine: force de départ.

Les valeurs obtenues pour a, b, c, sont les suivantes:

Pour le Technora.

Allongements	a	b	c
1%	9,26	-3,74	0,2
1,50%	14,7	-6,35	0,12
2,50%	21,7	-6,33	0,11
3%	27,38	-6,05	0,15

Pour le Kevlar 29.

Allongements	a	b	c
1%	8,15	-2,45	0,22
1,50%	12,06	-3,19	0,22
2,50%	17,71	-3,46	0,25
3%	27,77	-6,1	0,18

En comparant la courbe obtenue sur la machine de traction pour le Technora et la courbe calculée à partir de l'équation $F(t) = a + b \cdot \exp(-1/t^c)$, on constate qu'elles sont quasiment identiques (II.3.2), la même remarque est faite pour le Kevlar 29. On peut donc pour un temps long déterminer la force $F(t)$ à partir de l'équation obtenue.

Le Technora et le Kevlar suivent la même fonction de relaxation $F(t) = a + b \cdot \exp(-1/t^c)$.

Les valeurs de a peuvent être déterminées à partir des courbes de traction, les valeurs obtenues à partir de celles-ci sont légèrement plus élevées. On remarque que la valeur absolue de b augmente avec l'allongement appliqué pour le Kevlar, tandis que pour le Technora cette valeur semble se stabiliser à partir de 1,5 % tout comme la valeur de c. Pour le Kevlar c semble rester constant.

D'après certain auteurs (29-30-31) qui ont réalisé des essais de relaxation sur la fibre de Kevlar 29, l'équation obtenue est du type $\sigma(t) = a + b \cdot \text{Log}(t)$, or si l'on considère cette équation pour nos résultats, et si l'on trace $\sigma(t)$ en fonction de $\text{Log}(t)$, on constate que pour des temps longs, les points ne font plus partie de la droite. Notre méthode de détermination par régression linéaire des moindres carrées, est basée sur un calcul qui permet de prendre en considération essentiellement la partie quasi linéaire, tandis que pour la loi logarithmique on a des divergences pour des temps très longs. Nous pouvons donc déterminer la force $F(t)$ pour un temps long à partir de l'équation que nous avons obtenue.

II.4- Fatigue en traction-traction d'un monofilament.

L'étude en fatigue étant réalisée sur des monofilaments de diamètre aux alentours de 12 μm , le nombre de types d'essai est réduit.

Certains auteurs (32-33) ont employé l'essai de la flexion rotative pour simuler un essai de tension-compression sur des monofilaments de gros diamètres, mais ce genre d'essai ne peut pas être réalisé sur des fibres d'une dizaine de microns telles que les nôtres. La compression longitudinale des éprouvettes n'étant pas possible, les essais de fatigue sont donc limités à des essais cycliques en tension-tension. Un certain nombre de techniques expérimentales a été utilisé et discuté par Hearle (34).

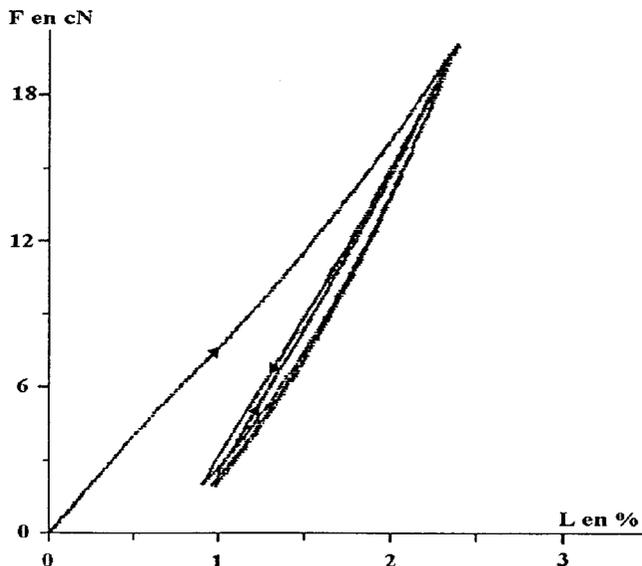
La technique choisie pour nos essais, est celle qui consiste à faire des sollicitations cycliques en tension à charge maximale contrôlée.

II.4.1- Descriptif de la méthode:

On fait subir au monofilament un certain nombre de cycles en traction de charge 20 cN (on se situe donc dans la deuxième partie de la courbe de traction). Après chaque chargement le monofilament subit une décharge jusqu'à 2 cN. Nous utilisons pour cela le logiciel Z1007 de relaxation et d'hystérésis de chez ZWICK. Le monofilament est donc fatigué longitudinalement en traction-traction. On arrête la fatigue après un nombre de cycles donné et on effectue ensuite un essai de rupture en traction sur le monofilament fatigué (logiciel Z1005).

La vitesse de charge et de décharge est 0,5 mm/min identique à celle de l'essai de traction, la longueur de jauge est de 40 mm.

II.4.2-Exemple de cycle de fatigue:



II.4.3- Résultats:

a- Pour le Technora.

La courbe de traction après fatigue possède deux pentes quel que soit le nombre de cycles effectués tout comme la courbe de traction d'un monofilament n'ayant pas subi de fatigue (n=0).

La deuxième pente reste supérieure à la première, et on a une faible variation des modules avec le nombre de cycles appliqués. Le module E_0 (première partie de la courbe) n'évolue pratiquement pas, tandis que le module E_1 (deuxième partie de la courbe) augmente légèrement. Nous pouvons observer l'allure d'une courbe de traction après fatigue figure II.4.3.2.

Nombre de cycles n	Module E_0 (GPa) ± 5	Module E_1 (GPa) ± 5
n=0	65	77
n=10	67	84
n=20	64	82
n=40	65	85
n=80	64	84

Tableau II.4.3.1: Influence de la fatigue sur les modules en traction du Technora.

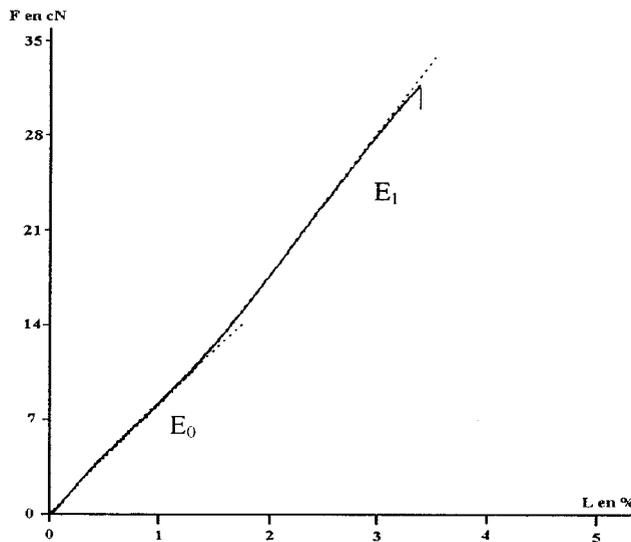


Figure II.4.3.2: courbe de traction d'un monofilament de Technora après 40 cycles.

b. Pour le Kevlar 29.

Pour $n=10$, la courbe de traction a la même allure que pour $n=0$, c'est à dire deux pentes, mais on constate une augmentation des modules d'environ 20 % (voir Tableau II.4.3.3). Cette augmentation des modules peut être expliquée par l'orientation et les glissements des cristallites lors de la fatigue; car la charge maximale appliquée est supérieure à celle correspondant au changement de pente.

Pour $n=20$ à 40, on constate trois pentes pour la courbe de traction (fig.II.4.3.4). On remarque que la troisième pente est semblable à la première et plus faible que la deuxième. On suppose que ceci est dû à la présence de micros ruptures dans la fibre fatiguée. Des observations ont été faites au microscope optique, qui ont mis en évidence ces micros ruptures.

Pour $n=80$, on constate toujours trois pentes, mais la troisième n'est plus maintenant parallèle à la première, ce qui signifie que le module est encore plus faible et qu'il y a donc une présence de rupture plus importante dans la structure interne.

Pour $n=200$, mêmes remarques, le troisième module diminue encore plus, ce qui implique une dégradation encore plus importante du monofilament.

Nombre de cycles n	Module E_0 (GPa)	Module E_1 (GPa)	Module E_2 (GPa)
n=0	67	84	
n=10	84	105	
n=20	92	117	94
n=40	90	117	88
n=80	89	114	85
n=200	86	113	83

Tableau II.4.3.3: Influence de la fatigue sur les modules en traction du Kevlar 29.

L'augmentation du module n'est pas proportionnelle au nombre de cycles appliqués. On constate que les valeurs des modules E_0 et E_1 augmentent rapidement et atteignent une valeur limite pour $n=100$, à $n=400$ nous avons confirmation de cette remarque.

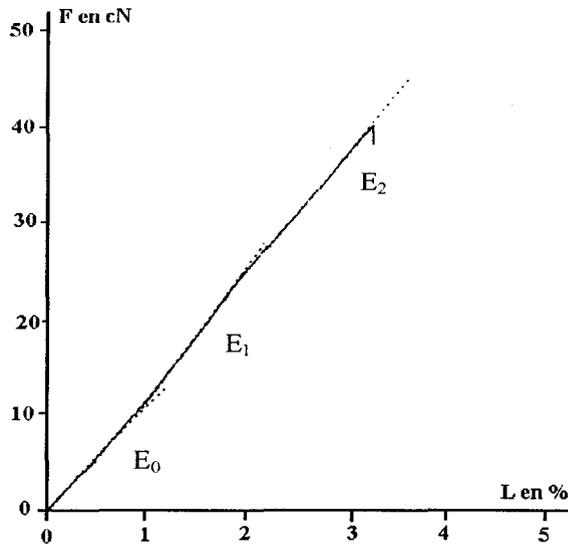


Figure II.4.3.4: courbe de traction d'un monofilament de Kevlar 29 après 20 cycles.

Nous pouvons donc émettre l'hypothèse que le Technora, étant plus "souple" que le Kevlar, il revient donc plus facilement à son état initial, et ne subit pas l'effet de la fatigue pour un nombre de cycles inférieur à 80.

II 5-Conclusions.

On a constaté que le module d'élasticité augmentait lors des essais de traction pour le Technora ainsi que pour le Kevlar 29, ceci étant dû à un alignement des chaînes, des cristallites et des feuillets plissés. La courbe de traction du Technora et du Kevlar 29 présente deux phénomènes, un réversible et l'autre non que l'on a caractérisé par deux modules. L'irréversibilité est également montrée en faisant des cycles d'hystérésis en traction, on constate que le module de rigidité augmente après le premier cycle et ne revient pas à sa position initiale.

On a également constaté que la vitesse de déformation en traction avait peu d'influence sur le monofilament, du moins lorsque celle-ci est faible. Quand elle est plus importante, on a tout comme pour les câbles une augmentation de la force et de l'allongement à la rupture.

La loi de WEIBULL est vérifiée pour les monofilaments de Technora, ainsi que pour le Kevlar.

A partir des essais de fluage, on a vérifié que les courbes suivaient une loi logarithmique en fonction du temps. On a montré que le Technora flue moins que le Kevlar. Le glissement des chaînes est à l'origine de ce phénomène. Ceci est dû aux

interactions latérales des liaisons hydrogène plus importantes dans le Technora. Le Technora étant moins bien organisé que le Kevlar (ceci est montré par diffraction aux rayons X), il comporte plus de chaînes que de cristallites. Les liaisons hydrogène étant plus nombreuses entre les chaînes qu'entre les cristallites, les mouvements, en particulier les glissements, se font plus difficilement, d'où un fluage moindre.

Des essais de relaxation ont été réalisés sur monofilaments de Technora et de Kevlar 29, on constate à partir de ces résultats que les deux matériaux ont une équation de relaxation du même type $F(t) = a + b \cdot \exp(-1/t^c)$.

Les essais de fatigue sur monofilaments ont permis de différencier le comportement du Kevlar 29 et du Technora. En augmentant les cycles de fatigue, on constate que les deux modules pour le Technora évoluent très peu, tandis que pour le Kevlar on a l'apparition d'un troisième module.

CHAPITRE III: ETUDE DE LA FATIGUE DES CABLES

CHAPITRE III: ETUDE DE LA FATIGUE DES CABLES.

Rappel: Lors d'essais de traction sur les câbles fatigués, nous avons remarqué que le module d'élasticité était nettement inférieur à celui des câbles intacts. Nous avons donc fait l'hypothèse qu'il y avait une relation entre le module et la résistance du câble.

Le type de fatigue a été choisi en se basant sur une application des câbles, dans les appareils de levage. Le câble en s'enroulant sur le treuil et sur différentes poulies permet de transmettre et de déplacer à distance les efforts en traction. Il peut exister plusieurs causes d'usure du câble dans des conditions normales de conception, d'utilisation et d'entretien. La seule cause qui soit prépondérante est cependant celle de la fatigue par flexion sous tension que ce câble subit sur les poulies. Nos câbles vont donc subir une fatigue par flexion. Pour cela une machine a été conçue et réalisée à l'ENSAIT.

Les flexions sont plus ou moins sévères suivant le diamètre des poulies et la charge à soulever, c'est pourquoi la réglementation ISO impose des valeurs maximales pour la charge (par l'intermédiaire du coefficient d'utilisation Z_p) et des valeurs minimales pour le diamètre (par l'intermédiaire du coefficient d'enroulement H_t) (35).

$$Z_p = R / T$$

Z_p : coefficient d'utilisation
 R : charge de rupture (fournisseur)
 T : Charge maximale du câble

$$H_t = D/d$$

H_t : coefficient d'enroulement
 D : diamètre d'enroulement (il est égal à l'addition du diamètre du fond de gorge de la poulie et d'un diamètre de câble)
 d : diamètre du câble

III.1-Machine de fatigue (fig. III.1.1).

Afin de fatiguer un câble, il est nécessaire de passer ce dernier sur des poulies amenant une suite de flexions. La fatigue est également due à la charge T de tension appliquée au câble. Désirant une fatigue sur un mètre de câble cela oblige à déplacer la charge d'un mètre verticalement en utilisant la pesanteur comme tension. Ce déplacement amène une énergie potentielle à fournir par le groupe moteur à la montée de la masse.

L'énergie est restituée à la descente de cette dernière mais amène à prévoir un système irréversible dans l'entraînement afin d'éviter une accélération durant cette descente.

De ce fait, il est décidé de mettre deux câbles en opposition: lorsque l'un monte, l'autre descend, les énergies potentielles se compensent et l'énergie cinétique étant faible, seul le frottement amène un groupe propulseur qui reste donc faible. La sécurité concernant une masse pouvant atteindre 40 kg et qui peut tomber d'un mètre lors de la rupture par fatigue du câble, amène des problèmes qui ont conduit à ne pas déplacer la masse mais de la maintenir proche du sol (sécurité résolue). Le choix est donc de déplacer les poulies en les montant sur un chariot mobile guidé en translation par des galets sur le bâti, le groupe moteur-réducteur doit amener un mouvement cyclique d'aller et de retour, qu'il déplace les câbles ou un chariot. De par les inerties, notamment celle du rotor du moteur et d'autre part par l'influence néfaste des changements de sens des phases pour l'alimentation électrique du moteur, il est préférable d'avoir une rotation continue et donc dans un seul sens du moteur. Le choix pour le mouvement cyclique conduit alors à choisir une chaîne sans fin: le chariot lié à un maillon est translaté par un mouvement alternatif à vitesse constante. Aux deux extrémités, une décélération puis une accélération sinusoïdale minimisent les effets dynamiques du changement de sens du chariot.

Une étude judicieuse de toutes les liaisons mobiles, évitant un frottement glissant et hyperstatique permet qu'une puissance de 80 W suffise à fatiguer quatre câbles simultanément.

Une puissance de 250 W a cependant été choisie pour maîtriser les variations de vitesse suivant les charges et le nombre de câbles: cette variation se révèle inférieure à 2%.

Tout cela conduit donc à pouvoir fatiguer en même temps et de manière différente quatre câbles. Quatre compteurs indépendants et programmables permettent un arrêt à un nombre de cycles donnés pour un câble ou à un arrêt en cas de casse impromptue (annexe 3).

Un aller et un retour du chariot correspondent à deux cycles pour le câble.

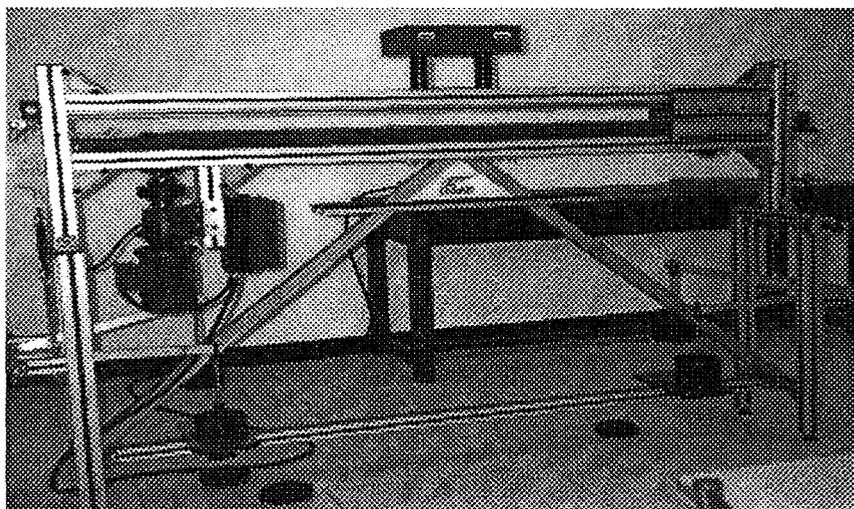
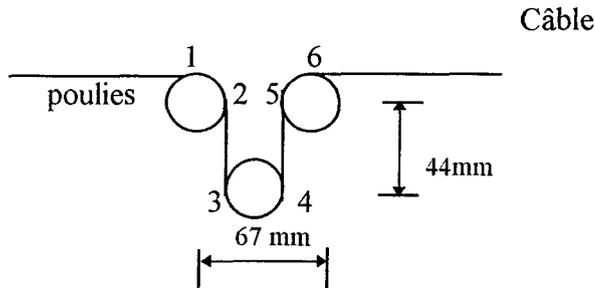


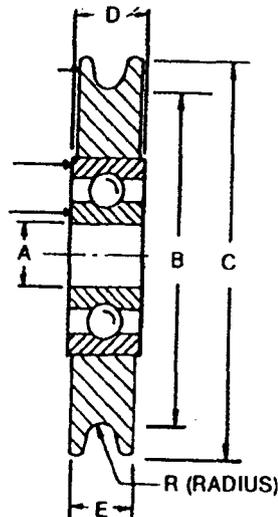
Figure III.1.1: Machine de fatigue.

Nous avons décidé de commencer les essais de fatigue, en faisant six flexions simples par cycle (une flexion simple correspond au passage d'une position rectiligne du câble à une position incurvée ou réciproquement; un cycle correspond à un passage de chariot sur le câble). Le câble est maintenu sous tension à l'aide d'une charge de 30 Kg (soit environ 7% de la force à la rupture c'est à dire un coefficient d'utilisation $Z_p \approx 14,3$).



Représentation des six flexions du câble sur les poulies

On utilise des poulies en polyamide avec roulement à billes pour nos premiers essais.



- A= $4,8 \pm 0,01$ mm
- B= $27,0 + 0,38$ mm
- C= $32,0 + 0,38$ mm
- D= $5,6 \pm 0,13$ mm
- Rayon de gorge= 0,9 mm

Le coefficient d'enroulement: $H_t \approx 14,5$.

III.2-Essais de fatigue réalisés sur des poulies en polyamide.

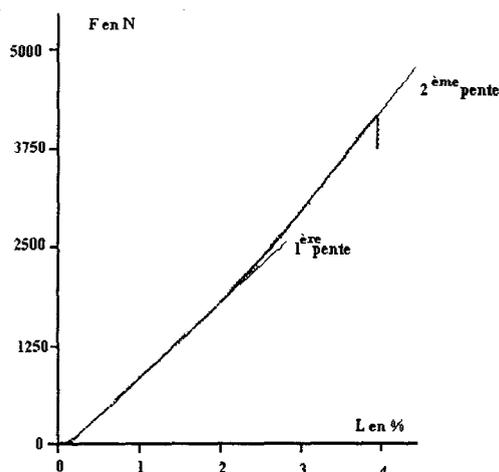
III.2.1-Influence de la fatigue sur le module.

Les essais de fatigue sont d'abord réalisés sur câbles tressés de 12 fuseaux en Technora T220 N sans couverture.

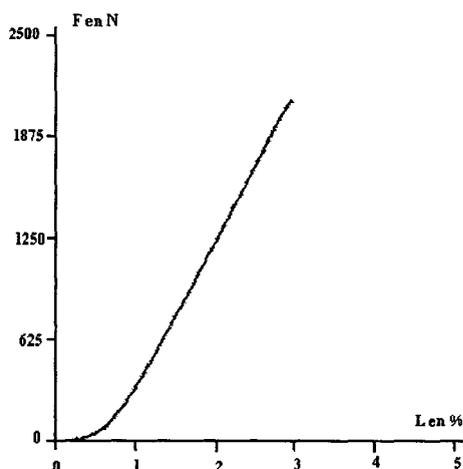
La fatigue est caractérisée d'une part par le nombre de cycles que le câble a subis et d'autre part par un essai de rupture en traction après cette fatigue. L'évolution des modules de rigidité est suivie ainsi que la rupture.

a-Allure des courbes de traction obtenues:

Câble intact.



Câble ayant subi 3000 cycles



b-Tableau de mesure.

Nombre de cycles de fatigue	Module près de l'origine en GPa	Module près de la rupture en GPa	Force à la rupture en N	Force résiduelle en %	Allongement à la rupture en %
0	59,4 ± 0,6	79,2 ± 2,5	4 055,2 ± 10	100,0	3,80 ± 0,01
66	67,6 ± 0,7	77,6 ± 3	3 196 ± 20	78,8	3,90 ± 0,01
100	70,4 ± 0,7	76,2 ± 3	3 322 ± 10	81,9	2,95 ± 0,07
500	72,3 ± 0,5	73 ± 0,3	3 079 ± 2	75,9	2,90 ± 0,01
1000		71 ± 2,5	2 442 ± 160	60,2	2,40 ± 0,14
2000		57,2 ± 3	1 663 ± 600	41,0	2,65 ± 0,21
3000		48,6 ± 3	1 842 ± 366	45,4	2,50 ± 0,01

Tableau III.2.1.1: Influence de la fatigue sur les différents paramètres obtenus en traction

Si on trace le module en fonction du nombre de cycles de fatigue, on a :

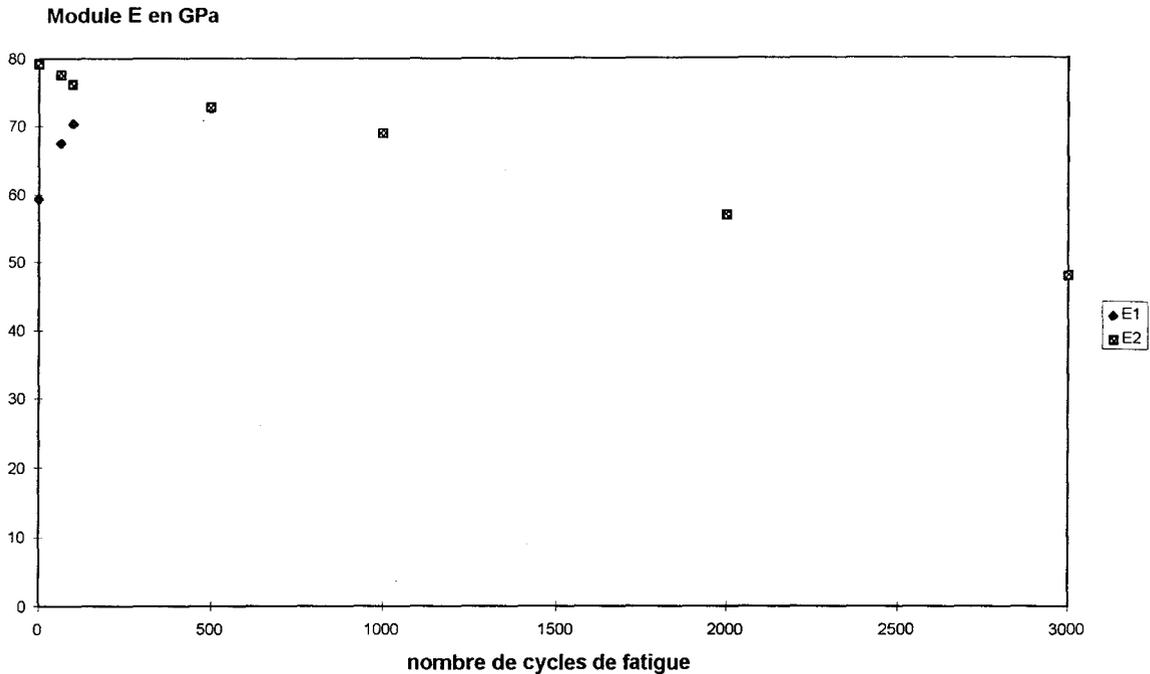


Figure III.2.1.2: Influence de la fatigue sur le module de traction de la tresse.

On constate que le module 1 croît alors que le module 2 décroît durant les premières centaines de cycles. A partir de 500 cycles, ils se confondent et il n'y a plus qu'un module, ce qui correspond à une seule pente pour la courbe de traction.

Comme nous l'avons vu lors des essais de traction sur les monofilaments et les câbles (Chapitre II p.33), ceux-ci se rigidifiaient lors de l'essai, on avait une augmentation du module pendant la traction ($E1 < E2$). Le phénomène de durcissement avait été expliqué par la présence des deux modules et par l'alignement des cristallites et des chaînes dans la direction de la fibre. Ici, le même phénomène se présente, l'alignement des cristallites est amorcé par les essais de fatigue, ceci est montré par l'augmentation du module 1 pendant celle-ci.

Si l'on trace la force de rupture en traction des câbles fatigués en fonction du nombre de cycles de fatigue, on a:

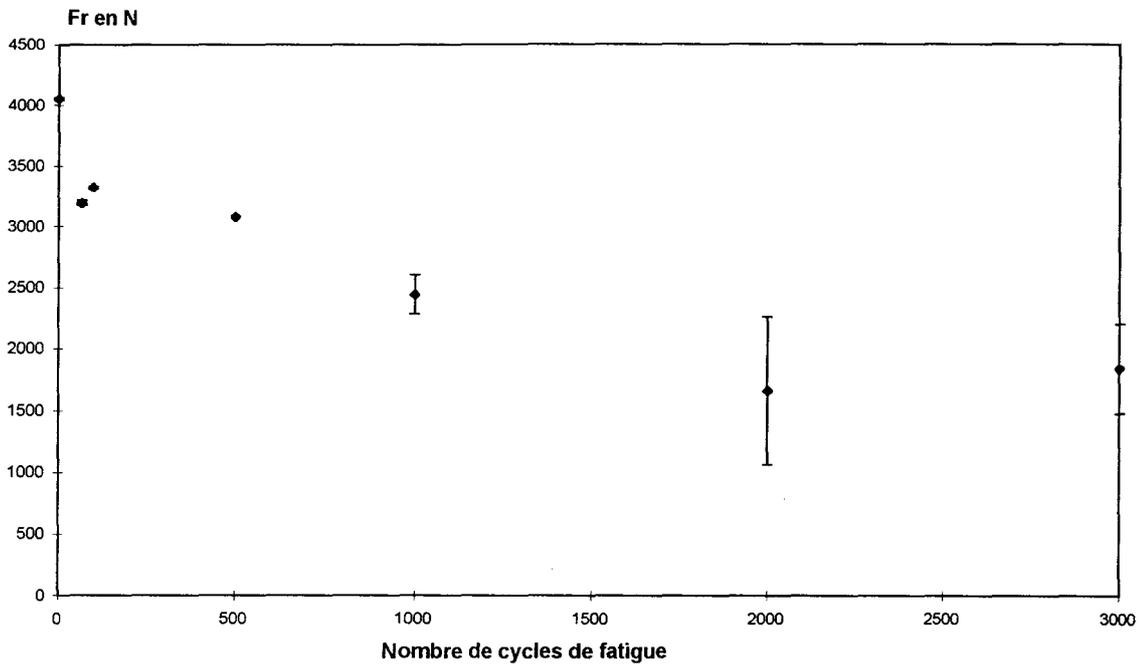


Figure III.2.1.3: Influence de la fatigue sur la force à la rupture en traction.

On constate (fig. III.2.1.3) tout d'abord une chute de la force de rupture en fonction de la fatigue, puis à partir de 2000 cycles une légère stabilisation de celle-ci compte tenu de l'encadrement d'erreur. De plus la dispersion sur les valeurs augmente avec la fatigue.

Remarque: Si le câble est placé sur les poulies avec une légère torsion celui-ci peu rompre avant d'effectuer ces 3000 cycles. Il faut donc disposer le câble avec précaution pour éviter ce phénomène. Cependant la dispersion semble inéluctable traduisant une reproductibilité difficile liée aux essais ou à des câbles non parfaitement similaires au départ.

Si l'on trace la force à la rupture en fonction du module:

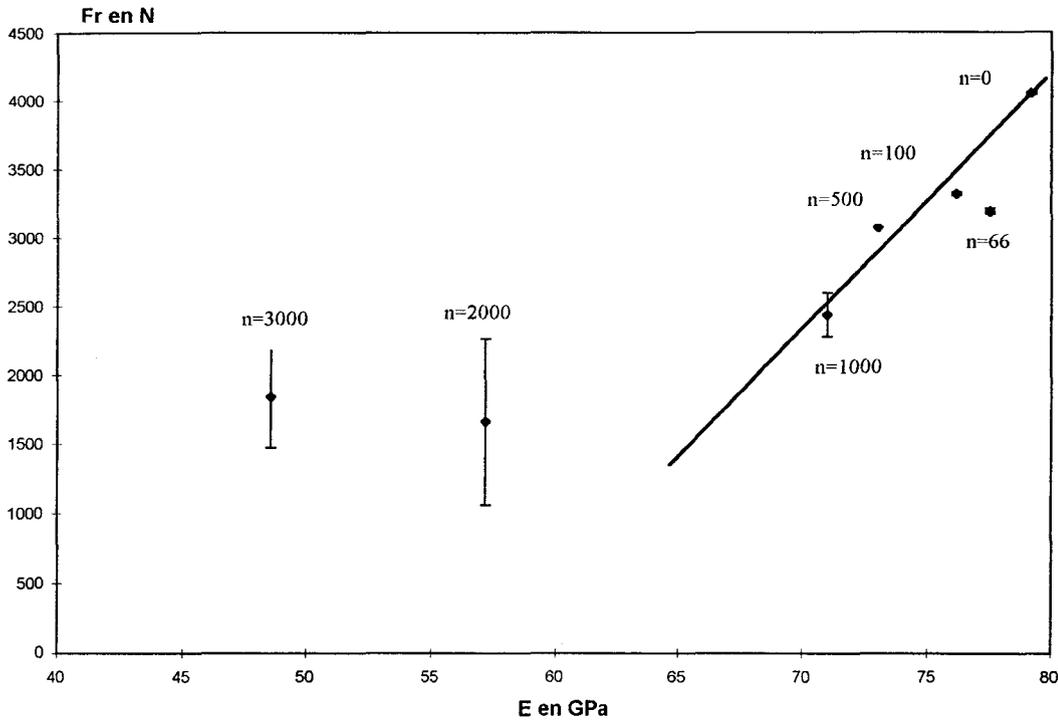


Figure III.3.2.4: Force de rupture résiduelle (Fr) après fatigue en fonction du module après n cycles de fatigue

Le module tout comme la force diminue avec le nombre de cycles de fatigue, on a une chute quasi-linéaire puis une stabilisation de la force, une discussion plus détaillée sur l'allure de la courbe $Fr = f(E)$ sera effectuée dans le paragraphe III.4.

III.2.2-Influence de la couverture du câble.

Les essais de traction ont été réalisés sur des câbles de Technora dont la construction est toujours une tresse de 12 fuseaux avec cette fois une couverture en polyester non fusionnée ou fusionnée . Ces câbles ont subi 500 cycles de fatigue.

Construction tressée	Module en GPa ± 2	Force à la rupture en N ± 5	Allongement à la rupture en % $\pm 0,1$
sans couverture	E1=72,3 E2=73	3 079	2,9
couverture PA non fusionnée	70,7	2 490	2,4
couverture PA fusionnée	72,3	1 778,5	1,7

Tableau III.2.2.1: Influence de la couverture après 500 cycles de fatigue

On constate tout d'abord qu'après 500 cycles de fatigue, on n'a plus qu'un module d'élasticité en traction, celui-ci varie peu avec ou sans couverture. On constate par contre que la couverture a une influence sur la force à la rupture ainsi que sur l'allongement. En effet la présence d'une couverture provoque la diminution de ces deux paramètres et cette diminution est d'autant plus importante que la couverture est fusionnée.

Lors de la fatigue, on a un échauffement du câble, et en faisant une analyse visuelle des câbles, on constate que les brins se sont collés entre eux sous l'échauffement de l'ensimage (fig.III.2.2.2). Pour les câbles possédant une couverture, on remarque l'empreinte de la couverture sur l'âme du câble (fig. III.2.2.3 et fig.III.2.2.4).

On a donc une abrasion brin-brin et âme-couverture qui amène l'échauffement interne du câble. La couverture fusionnée étant très rigide celle-ci provoque plus de dommage, d'où une fatigue plus importante et une chute de la force en traction, tandis que le câble sans couverture est moins abîmé en surface.

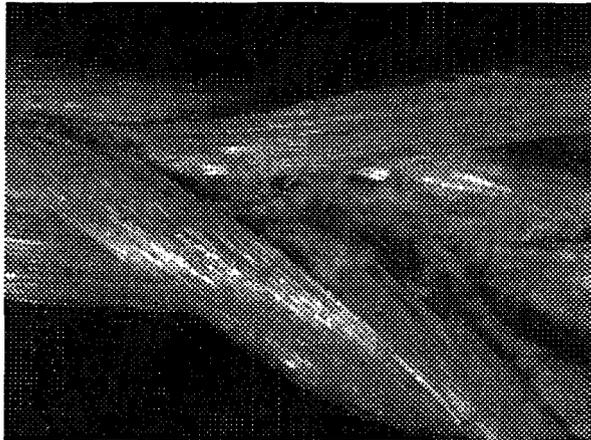


Figure III.2.2.2: Tresse 12 fuseaux sans couverture après 500 cycles de fatigue.

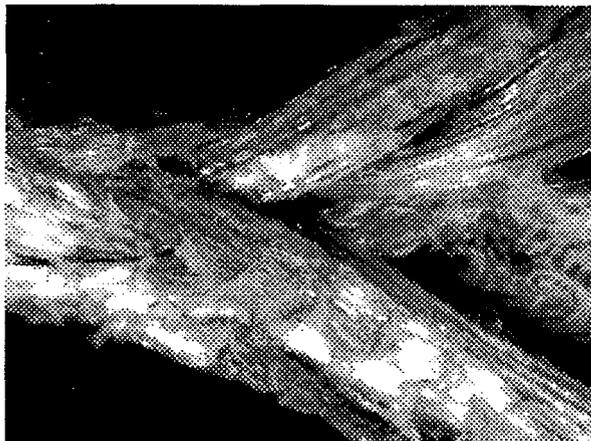


Figure III.2.2.3: Ame tressée du câble avec couverture non fusionnée après 500 cycles de fatigue.

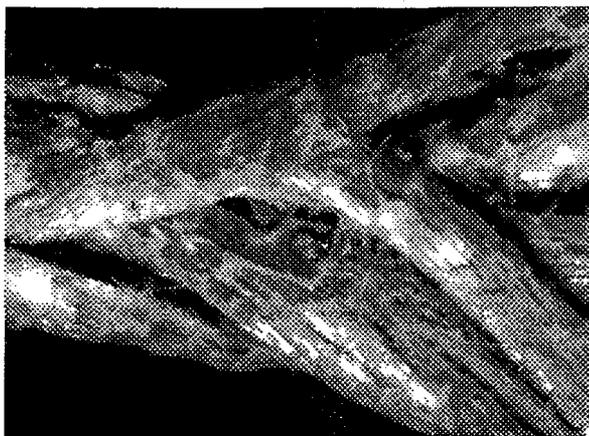


Figure III.2.2.4: Ame tressée du câble avec couverture fusionnée après 500 cycles de fatigue.

III.2.3-Influence de la construction du câble.

Les essais de fatigue sont réalisés maintenant sur les autres types de câbles de Technora T220 avec une couverture en polyester non fusionnée. Comme précédemment on étudiera la fatigue par comparaison entre un essai de traction après fatigue et un essai de traction d'un câble neuf. Nous rappelons donc ici les résultats sur les câbles non fatigués (Tableau III.2.3.1).

Construction du câble	Module près de l'origine en GPa $\pm 2,5$	Module près de la rupture en GPa $\pm 2,5$	Force à la rupture en N $\pm 50,0$	Allongement à la rupture en % $\pm 0,1$
Ame parallèle	65,2	85,0	4 256,0	3,7
Ame tressée	58,4	80,6	4 671,4	4,4
Ame moulinée	54,4	77,5	4 400,0	4,3
Ame câblée	60,2	82,8	4 859,3	4,4

Tableau III.2.3.1: Résultats en traction de câbles n'ayant pas subi de fatigue

On constate que le câble à âme parallèle possède un module légèrement plus important que les autres câbles, tandis que sa force à la rupture ainsi que son allongement sont plus faibles. Par contre pour les trois autres constructions les résultats sont voisins. On a par ordre décroissant de la force à la rupture: le câble à âme câblée, moulinée, puis tressée (cf. p.54).

Les essais de traction sont maintenant réalisés sur les mêmes types de câbles, après 700 cycles de fatigue.

Construction du câble	Module en GPa $\pm 2,5$	Force à la rupture en N $\pm 50,0$	Allongement à la rupture en % $\pm 0,1$
Ame parallèle	39,5	968,0	1,8
Ame tressée	69,1	2 173,5	2,2
Ame moulinée	68,4	2 377,0	2,4
Ame câblée	67,8	2 059,0	2,1

Tableau III.2.3.2: Résultats en traction de câbles ayant subi 700 cycles de fatigue

Nous n'avons effectué que 700 cycles de fatigue, car le câble à âme parallèle subissait une dégradation trop rapide. La fatigue a donc été stoppée pour pouvoir faire une comparaison entre les différentes constructions.

On peut d'ailleurs voir que la force à la rupture est très faible pour l'âme parallèle, elle a chuté de 77 % par rapport au câble intact.

Pour les autres constructions, on a une chute de la force de traction presque identique:

soit pour l'âme tressée une perte de 53,5 %

l'âme moulinée une perte de 46 %

l'âme câblée une perte de 57,6 %.

Ces résultats peuvent être observés sur la figure III.2.3.3.

Force de rupture en traction (N)

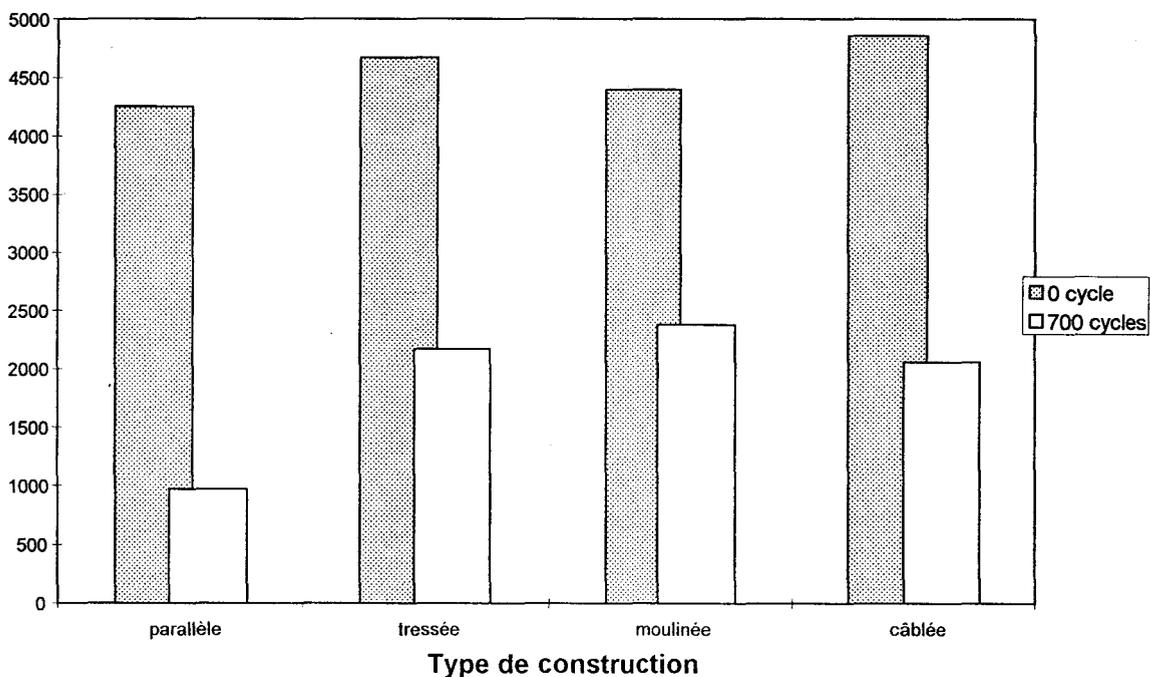


Figure III.2.3.3: Comparaison de la force à la rupture en traction avant et après fatigue

En faisant une analyse visuelle de l'âme des câbles, on comprend pourquoi le câble à âme moulinée a le plus faible pourcentage en perte (fig. III.2.3.4). En effet contrairement aux autres âmes, la partie interne de celle-ci n'a subi quasiment aucune abrasion. Il n'y a que la partie externe, celle qui est en contact avec la couverture, qui est marquée par l'usure.

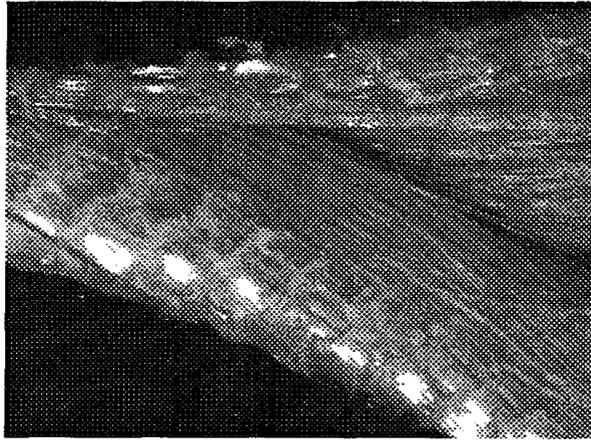


Figure III.2.3.4: Ame moulinée du câble avec couverture non fusionnée après 700 cycles.

Par contre pour les autres constructions, on a une abrasion externe et interne, les brins sont collés entre eux par l'échauffement de l'ensimage dû au frottement brin-brin.

Le câble à âme parallèle est très détérioré, ceci est dû à l'absence de cohésion entre les monofilaments (cf. p.54).

Les modules ont également chuté par rapport aux câbles intacts (fig. III.2.3.4):

- pour l'âme parallèle, on a une chute de 53,5 %
- pour l'âme tressée, une chute de 14 %
- Pour l'âme moulinée, une chute de 11,7 %
- pour l'âme câblée, une chute de 18 %.

Module de rigidité E2 en GPa

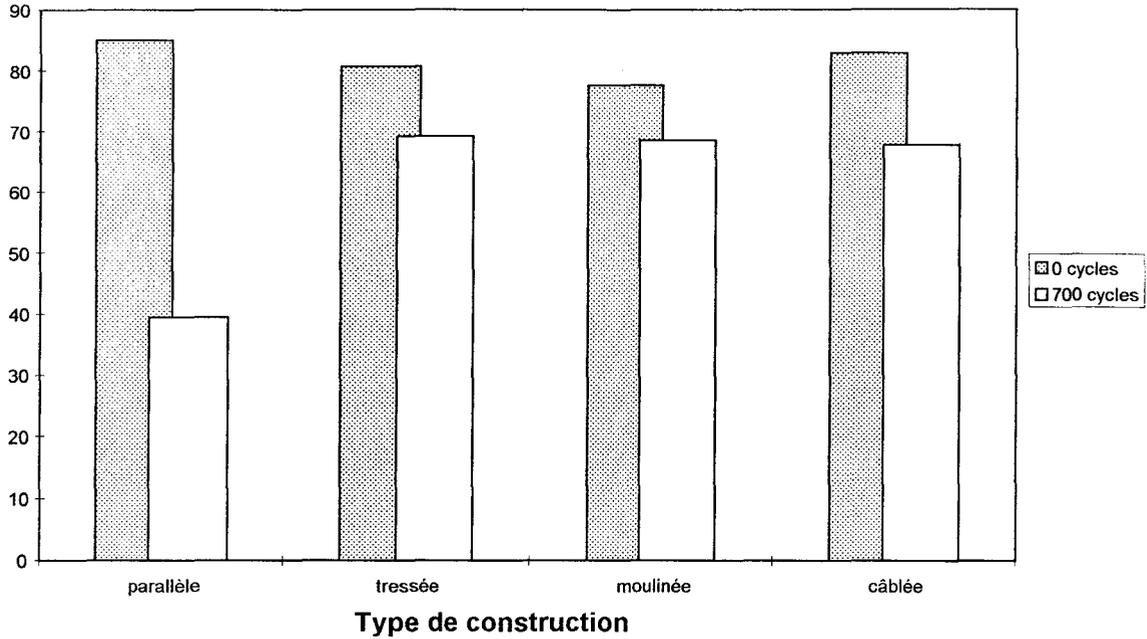


Tableau III.2.3.4: Comparaison du module près de la rupture après et avant fatigue.

III.2.4- Conclusion.

Ces études ont pu mettre en évidence, l'influence de la fatigue sur les modules et de voir ainsi les variations, d'où l'intérêt de réaliser des études de fatigue plus approfondies, en développant l'étude des câbles en fonction de leurs états de fatigue et d'étudier l'influence d'autres paramètres tels que la charge et l'influence de la nature des poulies.

III.3-Essais de fatigue réalisés sur des poulies en aluminium.

III.3.1-Fatigue de câbles de constructions différentes:

III.3.1.1-Essais.

Les essais ont été réalisés sur les mêmes types de câbles que ceux utilisés dans la première partie, c'est à dire des câbles à âme en Technora, de construction moulinée, câblée, tressée, et parallèle, avec une couverture en polyester non fusionnée, ainsi que sur la tresse douze fuseaux en technora sans couverture. Les essais de fatigue ont été réalisés dans les mêmes conditions que celles avec les poulies en polyamide, c'est à dire sous une charge de 30 kg (soit environ 7% de la charge de rupture des câbles), c'est une fatigue de six flexions simples sur trois poulies en aluminium de même diamètre que celui des poulies en polyamide (les deux sortes de poulies ont exactement les mêmes dimensions extérieures). Nous conservons donc un coefficient d'utilisation $Z_p \approx 14,3$, un coefficient d'enroulement $H_t \approx 14,5$ et un diamètre d'enroulement de 29 mm dans une gorge de rayon 0,9 mm.

III.3.1.2- Résultats.

On a réalisé une fatigue progressive des câbles, à chaque nombre de cycles de fatigue effectuée, on réalise un essai de traction (contrôle destructif) et on en déduit les forces et les allongements à la rupture ainsi que les différents modules. Les résultats sont récapitulés dans les tableaux suivants:

Tableau III.3.1.2.1: Tresse sans couverture.

Nombre de cycles de fatigue	Force à la rupture en traction (N)	Force résiduelle en %	Allongement à la rupture en %	Module près de l'origine (GPa)	Module près de la rupture (GPa)
0	4055,2 ± 10,0	100	3,8 ± 0,01	59,4 ± 0,6	79,2 ± 2,5
50	3599,8 ± 98,5	88,8	3,23 ± 0,04	68,2 ± 0,1	84,1 ± 0,8
100	3402,4 ± 167,0	83,9	3,10 ± 0,10	68,1 ± 0,8	82,2 ± 2,5
500	3150,9 ± 62,5	77,7	2,98 ± 0,04	70,4 ± 4,7	74,5 ± 1,8
1000	2661,9 ± 65,2	65,6	2,73 ± 0,01		64,9 ± 0,4
2000	2248,5 ± 63,2	55,45	2,45 ± 0,07		62,6 ± 0,6
3000	1942,3 ± 28,1	47,9	2,40 ± 0,17		56,1 ± 3,2
4000	1806,5 ± 39,2	44,55	2,60 ± 0,04		54,5 ± 0,7
4500	1676,0 ± 30,0	41,3	2,40 ± 0,04		52,4 ± 0,8
7059 ± 100	Rupture	7,2			

Remarque: Pour chaque série d'essais, nous réalisons une fatigue du câble jusqu'à sa rupture. Ceci afin d'en déduire sa durée de vie et son comportement à la fatigue.

Tableau III.3.1.2.2: Construction moulinée

Nombre de cycles de fatigue	Force à la rupture en traction (N)	Force résiduelle en %	Allongement à la rupture en %	Module près de l'origine (GPa)	Module près de la rupture (GPa)
0	4730,6 ± 185,6	100	4,10 ± 0,10	66,4 ± 1,0	89,4 ± 1,1
200	3392,3 ± 129,5	71,7	4,42 ± 0,96	78,2 ± 0,6	75,6 ± 0,4
500	3011,5 ± 84,0	63,6	6,40 ± 0,70	74,1 ± 1,2	72,7 ± 0,2
1000	2826,4 ± 98,4	59,7	3,58 ± 0,11		70,8 ± 0,3
2000	2436,1 ± 71,6	51,5	3,04 ± 0,22		69,0 ± 0,6
3000	2130,9 ± 197,6	45,0	2,51 ± 0,27		60,9 ± 1,6
4000	1069,2 ± 43,6	22,6	1,70 ± 0,30		54,3 ± 4,0
6500	899,0 ± 41,3	19,0	8,95 ± 1,34		14,1 ± 1,9
9423 ± 200	Rupture	6,2			

Tableau III.3.1.2.3: Construction parallèle

Nombre de cycles de fatigue	Force à la rupture en traction (N)	Force résiduelle en %	Allongement à la rupture en %	Module près de l'origine (GPa)	Module près de la rupture (GPa)
0	4255,9 ± 86,5	100	3,70 ± 0,10	65,2 ± 1,0	85,0 ± 1,2
200	2733,9 ± 50,0	64,2	5,10 ± 0,20		66,8 ± 1,4
500	2241,7 ± 49,6	52,7	2,50 ± 0,21		56,4 ± 1,1
1000	1412,5 ± 51,3	33,2	5,60 ± 0,12		33,2 ± 0,9
2000	903,9 ± 51,6	21,2	9,70 ± 0,31		18,1 ± 0,7
3000	843,0 ± 59,1	19,8	9,45 ± 2,50		14,7 ± 2,5
4000	844,4 ± 36,3	19,8	8,65 ± 2,05		13,7 ± 1,9
5000	815,2 ± 51,4	19,1	10,7 ± 2,34		8,07 ± 1,8
6277 ± 200	Rupture	6,9			

Tableau III.3.1.2.4: Construction câblée

Nombre de cycles de fatigue	Force à la rupture en traction (N)	Force résiduelle en %	Allongement à la rupture en %	Module près de l'origine (GPa)	Module près de la rupture (GPa)
0	4598,1 ± 122,4	100	4,20 ± 0,30	65,2 ± 0,4	88,2 ± 0,8
200	3240,9 ± 3,25	70,5	3,55 ± 0,50	74,0 ± 0,2	75,6 ± 0,2
500	2831,0 ± 85,3	61,5	4,35 ± 2,33		69,7 ± 0,2
1000	2433,2 ± 39,5	52,9	5,75 ± 0,35		63,3 ± 0,3
2000	1418,7 ± 43,3	30,8	5,45 ± 4,30		40,9 ± 0,8
3000	986,0 ± 67,2	21,4	9,35 ± 1,06		15,34 ± 0,8
4000	928,6 ± 37,1	20,1	8,50 ± 0,40		15,7 ± 0,4
5300	860,6 ± 40,2	18,7	8,80 ± 0,52		12,8 ± 0,9
6728 ± 200	Rupture	6,4			

Tableau III.3.1.2.5: Construction tressée

Nombre de cycles de fatigue	Force à la rupture en traction (N)	Force résiduelle en %	Allongement à la rupture en %	Module près de l'origine (GPa)	Module près de la rupture (GPa)
0	4671,4 ± 48,4	100	4,43 ± 0,06	58,4 ± 0,4	80,6 ± 0,9
200	3092,7 ± 50,1	66,2	3,00 ± 0,20	72,6 ± 0,2	71,6 ± 0,3
500	2509,2 ± 80,2	53,7	2,45 ± 0,07	69,6 ± 2,5	68,1 ± 0,4
1000	2411,2 ± 49,5	51,6	2,50 ± 0,25		64,3 ± 0,5
2000	1082,0 ± 53,2	23,1	6,40 ± 1,30		29,4 ± 0,6
3000	1099,2 ± 70,8	23,5	6,95 ± 1,90		22,2 ± 0,5
4000	1008,6 ± 30,3	21,6	6,45 ± 0,20		20,9 ± 0,7
5500	904,4 ± 50,2	19,3	7,00 ± 0,42		19,1 ± 0,9
7059 ± 200	Rupture	6,3			

III.3.1.3- Discussion

Si l'on observe les courbes de traction lors des différents cycles de fatigue, on constate une évolution de celles-ci. Cette évolution est identique quelle que soit la construction de l'âme des câbles possédant une couverture. On a tout d'abord des courbes de traction possédant deux pentes distinctes et un très léger pied de courbe (fig.III.3.1.3.1). Plus le nombre de cycles de fatigue augmente, plus le pied de courbe est important; celui-ci est dû à un arrangement des brins du câble de manière conséquente après un certain nombre de cycles de fatigue, ces brins subissent un gonflement permis par la suppression de la charge en fatigue; gonflement dû à l'abrasion de l'ensimage provoquant ainsi une décohésion des brins. Ils vont donc mettre un certain temps à s'aligner et à se réorganiser correctement avant que la traction s'effectue réellement. La fatigue influe également sur le module, la courbe de traction ne présente plus qu'une seule pente comme on l'a vu dans le paragraphe III.2.1. Il y a également en fin de traction un affaiblissement de la force de rupture et un allongement qui croît rapidement (fig.III.3.1.3.2). L'augmentation de l'allongement avec la fatigue peut être observée dans les tableaux des résultats. Celle-ci est due à la rupture de quelques monofilaments, la couverture maintenant la cohésion des monofilaments restants. L'essai de traction se poursuit donc sur les éléments restants, la couverture devenant majoritaire et étant plus souple, cela se traduit par cette allure de courbe. Cette remarque est confirmée par les résultats obtenus pour la tresse sans couverture, en effet on a une évolution de la courbe de traction comme pour les autres câbles c'est à dire augmentation du pied de courbe et une seule pente, mais il n'y a pas cette troisième phase à la fin de la courbe de traction: l'absence de couverture provoque une rupture franche de la tresse (fig.III.3.1.3.3).

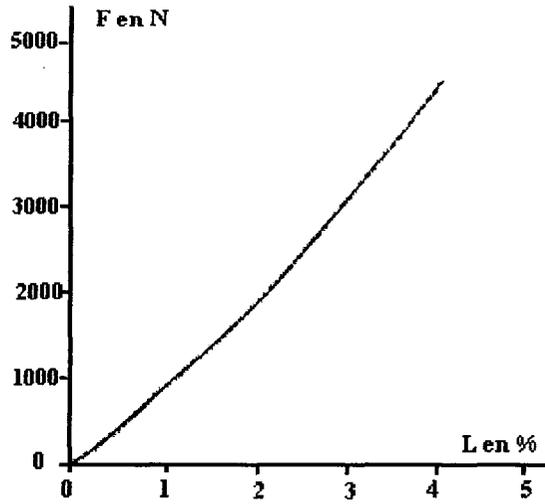


Figure III.3.1.3.1: Essai de traction du câble à âme câblée avec couverture non fusionnée n'ayant pas subi de fatigue.

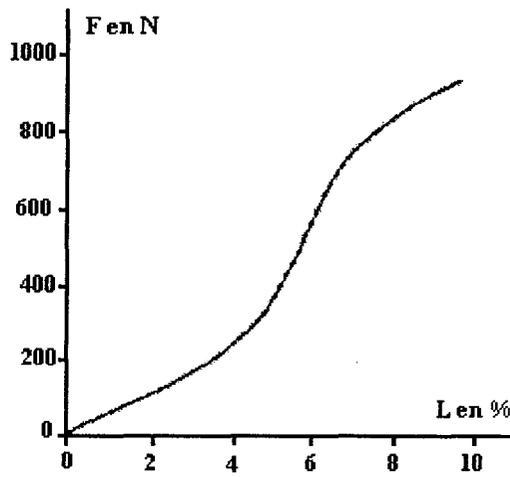


Figure III.3.1.3.2: Essai de traction du câble à âme câblée avec couverture non fusionnée après 4000 cycles de fatigue.

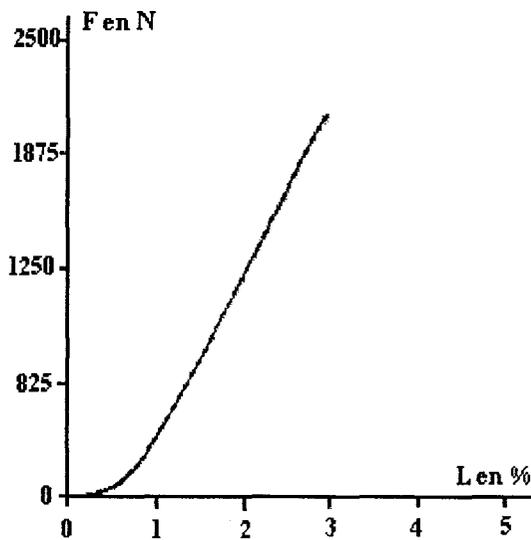


Figure III.3.1.3.3: Essai de traction de la tresse sans couverture après 4 000 cycles

Si l'on regarde la figure III.3.1.3.4 qui regroupe toutes les courbes représentant la force résiduelle (Fr) en fonction du nombre de cycles de fatigue (n) des différents câbles, on constate que l'allure de la courbe du câble à âme moulinée se distingue des autres; on a une diminution progressive de la force résiduelle en fonction de la fatigue, qui est moins importante que pour les autres constructions. On a ensuite aux alentours de 3000 cycles une chute de la force résiduelle conduisant celle-ci à 25%, ensuite on a une décroissance progressive mais faible jusqu'à la rupture. La durée de vie de l'âme moulinée est plus importante que celles des autres constructions. On a une diminution de Fr moins importante et plus progressive, la fatigue est plus longue à se faire sentir (cf. III.2.3).

Pour les trois autres constructions des câbles, on constate une même allure de la courbe $Fr = f(n)$, on a une chute assez rapide de Fr , puis un palier plus ou moins important selon la construction avant la rupture. Les durées de vie sont respectivement plus importantes pour l'âme tressée, câblée puis parallèle (cf. III.2.3). En ce qui concerne la tresse sans couverture l'allure est semblable à celle du câble à construction moulinée, mais avec des valeurs de Fr plus importantes et une chute de la valeur de Fr plus tardive. Cette chute conduit quasiment le câble à la rupture, mais sa durée de vie reste voisine de celle du câble à âme tressée. On peut donc dire que la couverture provoque une abrasion de l'âme pendant la fatigue, traduisant des valeurs de Fr moins importantes pour le câble (cf. III.2.2) mais par contre la rupture est moins instantanée.

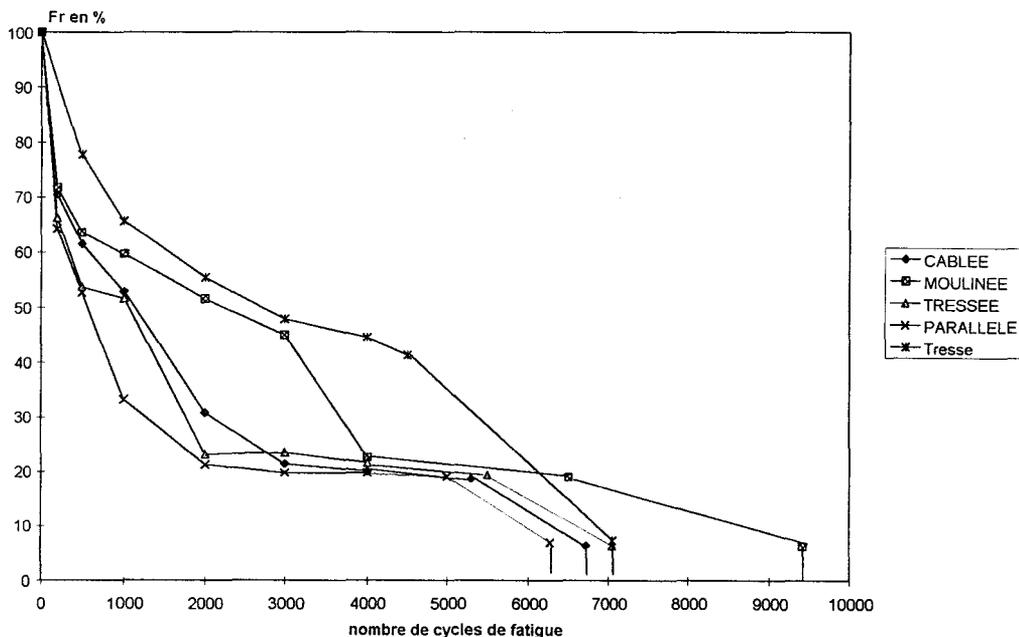
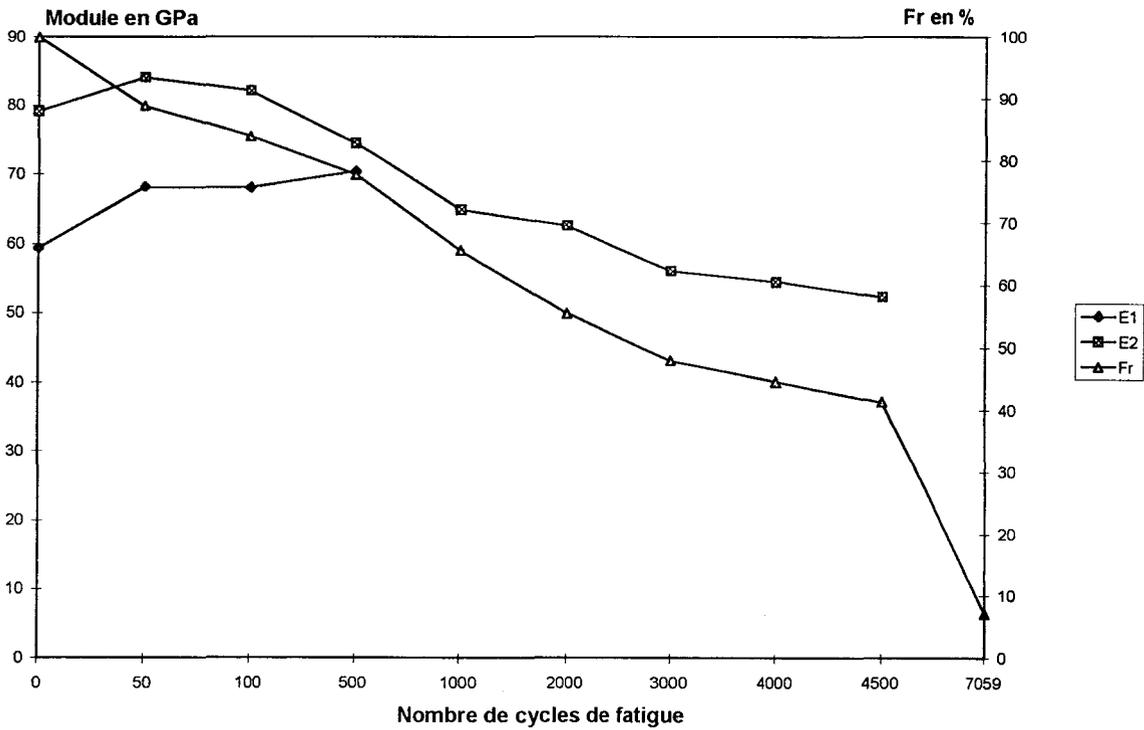


Figure III.3.1.3.4: Abaques force résiduelle de rupture après fatigue en fonction du nombre de cycles pour les différentes constructions de câbles.

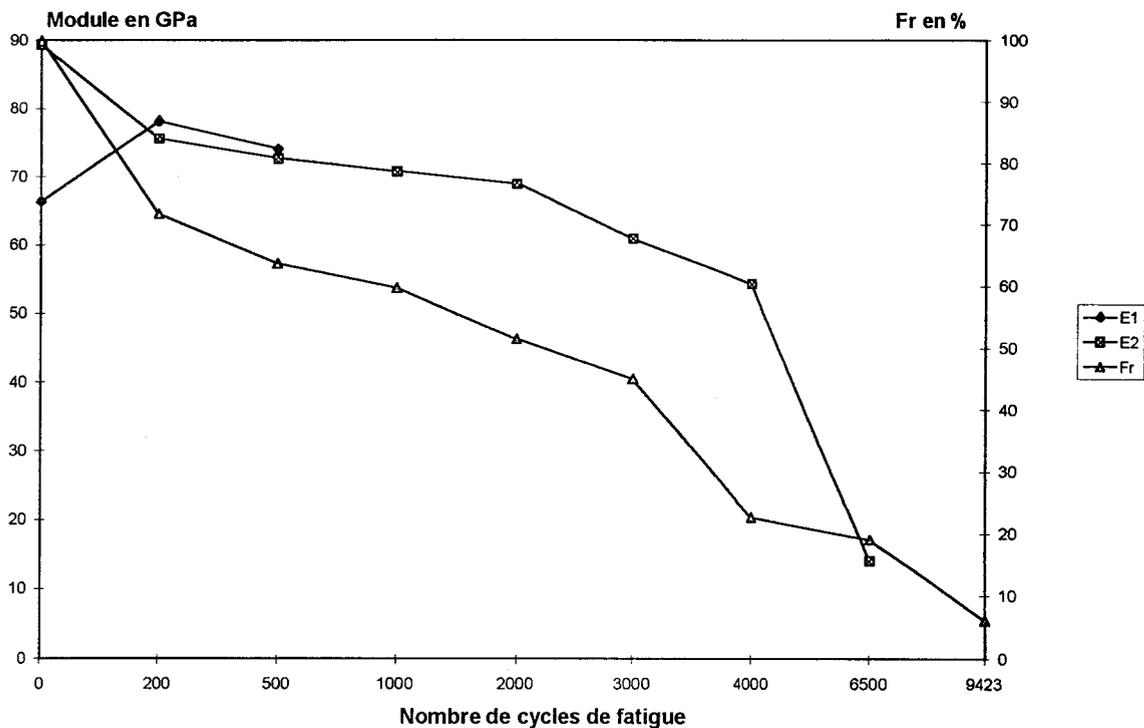
Si l'on compare maintenant l'allure des courbes du module (E) en fonction du nombre de cycles (n) de fatigue $E = f(n)$ pour chaque câble, on constate que quelle que soit la construction du câble avant la fatigue, on a deux modules, ensuite après un certain nombre de cycles il n'y a plus qu'un seul module (cf. III.2.1).

On constate que les courbes $E = f(n)$ évoluent de la même façon que celles $Fr = f(n)$ pour la tresse sans couverture, les câbles à âme moulinée, parallèle, câblée et tressée.

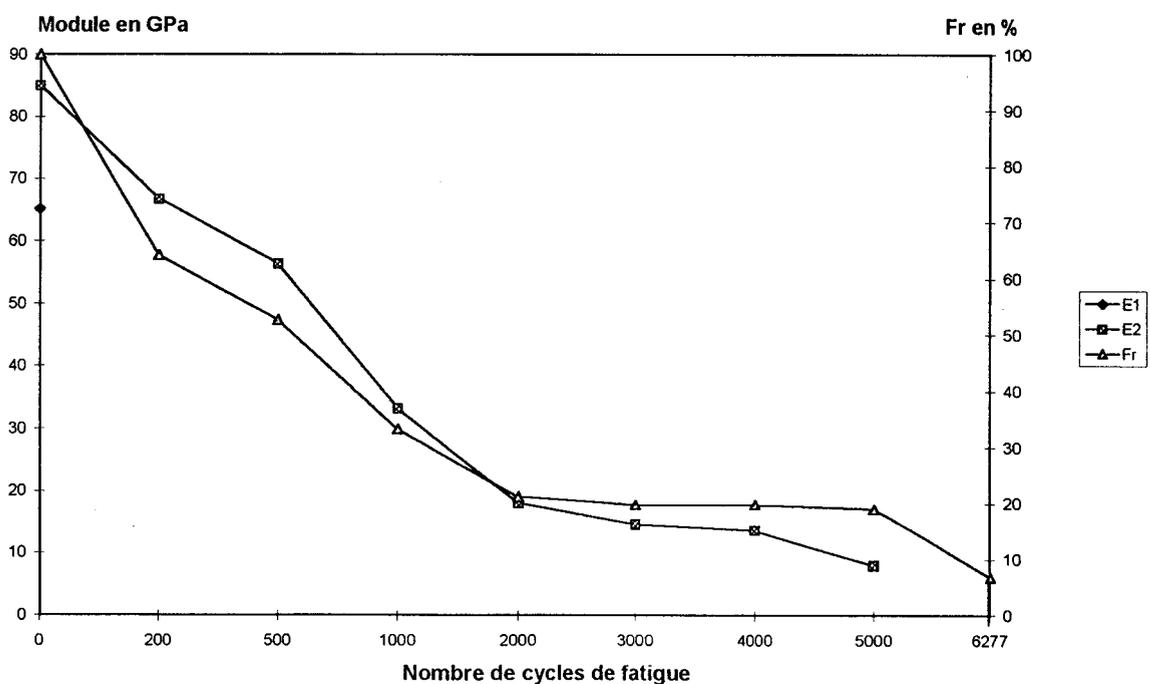
Pour la tresse sans couverture, on constate une diminution progressive de la force résiduelle Fr et des modules E avec le nombre de cycles de fatigue n , nous rappelons qu'un cycle correspond à six flexions.



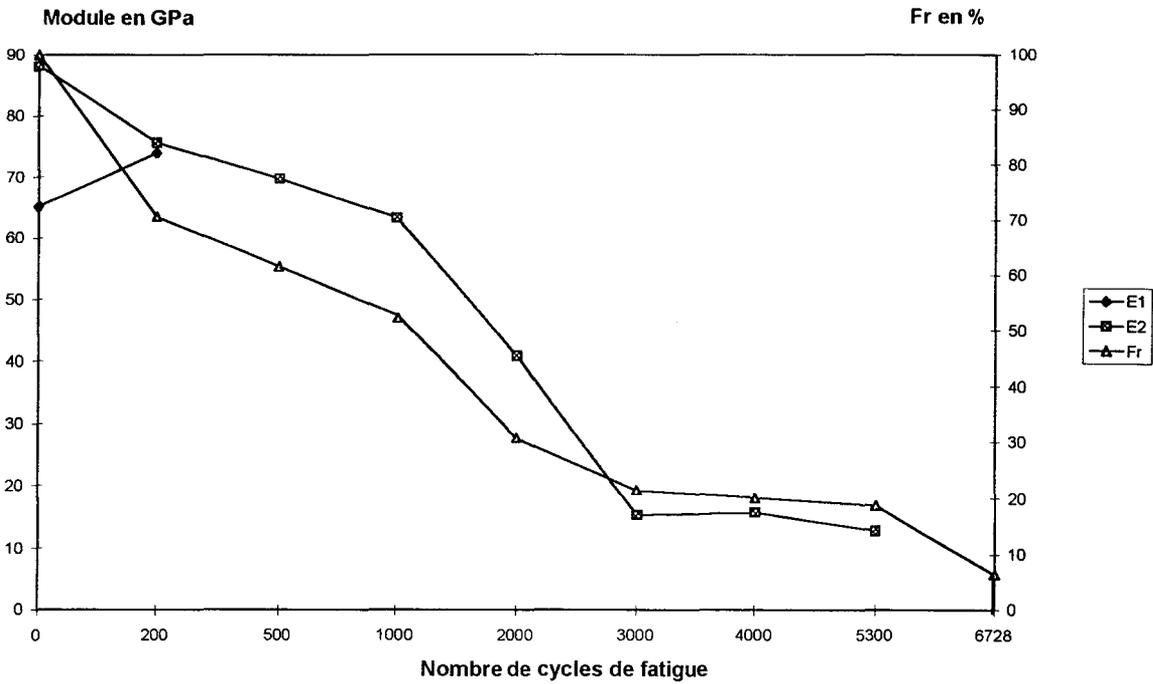
Pour le câble à âme moulignée, on a une diminution quasi linéaire du module, on pourrait en dire de même de Fr en excluant la valeur à 4000 cycles de fatigue.



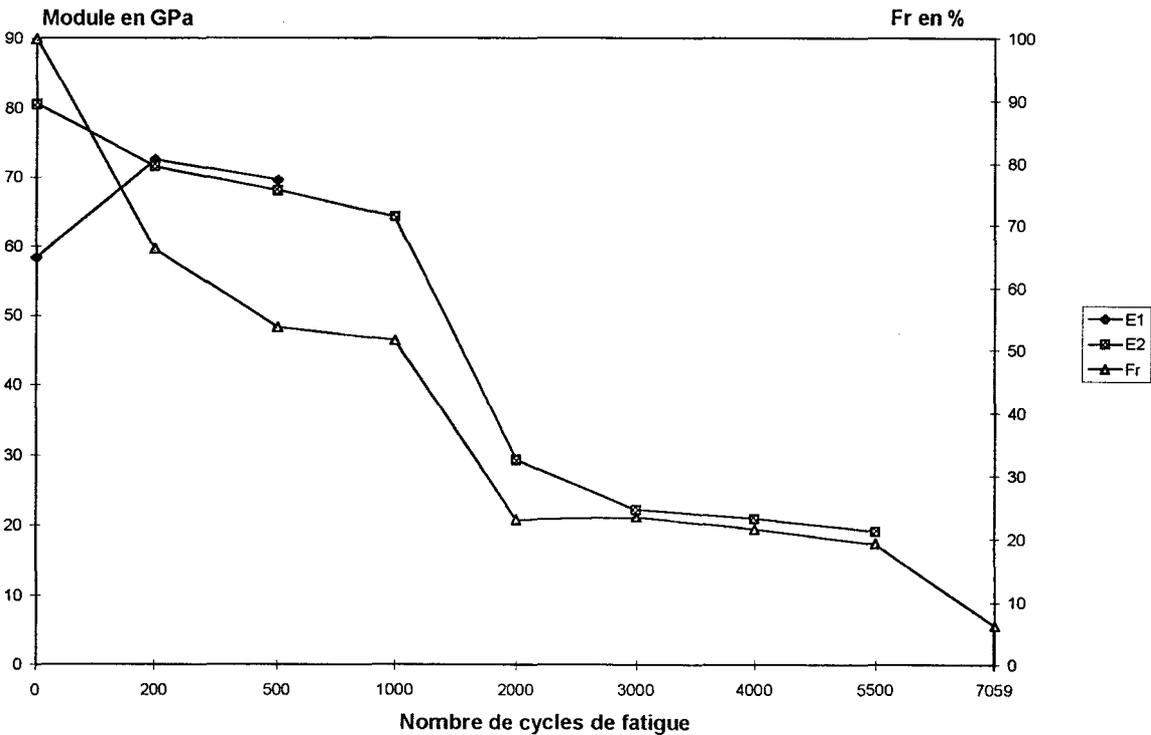
Pour le câble à âme parallèle, la stabilisation de Fr est aux alentours de 2000 cycles, il en est de même pour son module.



Pour le câble à âme câblée la stabilisation de Fr est aux alentours de 3000 cycles, la stabilisation de son module est aux alentours du même nombre de cycles.



Pour le câble à âme tressée la stabilisation de Fr est aux alentours de 2000 cycles, son module a un palier qui commence aux alentours de 2000 à 3000 cycles de fatigue.



En constatant que l'évolution du module et celle de la force résiduelle en fonction de la fatigue sont quasi identiques, on envisage de trouver une relation liant F_r et E , cette relation nous permettra par la suite de faire la liaison avec les résultats en contrôle non destructif (Chapitre V).

III.3.2- Comportement en fatigue d'un câble en Technora de type A.

Le câble de type A est un assemblage de 6 brins enroulés jointivement en hélice (torsion S) autour d'un brin central. Chaque brin est lui-même constitué d'un assemblage de fils enroulés jointivement en hélice. Les sept brins ont le même titre soit 1500 deniers, ces brins ont été traités en surface, le diamètre du câble est de 1,75 mm, ce câble ne possède pas de couverture.

Schéma du câble:



III.3.2.1-Essai.

Le câble a été fatigué sous une charge de 30kg soit environ 14,8 % de la force de rupture du câble, et sur trois poulies en aluminium les mêmes que celles utilisées précédemment, soit un coefficient d'enroulement H_t de 15,4.

III.3.2.2- Résultats

Le tableau suivant récapitule les résultats obtenus lors des essais de traction, sur les câbles ayant subi différents cycles de fatigue.

Tableau III.3.2.2.1: câble en Technora de type A:

Nombre de cycles de fatigue	Force à la rupture en traction (N)	Force résiduelle en %	Allongement à la rupture en %	Module près de l'origine (GPa)	Module près de la rupture (GPa)
0	2031,4 ± 65,2	100	3,94 ± 0,12	18,5 ± 0,4	26,3 ± 0,1
100	1330,9 ± 16,9	65,5	2,77 ± 0,24	21,8 ± 0,6	23,6 ± 0,8
200	1097,5 ± 7,4	54,0	2,30 ± 0,01		21,3 ± 0,7
500	955,5 ± 84,1	47,0	2,45 ± 0,21		17,4 ± 0,8
750	866,8 ± 50,1	42,7	2,50 ± 0,41		16,0 ± 0,8
1000	690,2 ± 249,2	34,0	2,60 ± 0,56		12,4 ± 0,7
1200	734,5 ± 210,2	36,1	3,1 ± 0,67		11,4 ± 0,8
1623 ± 186	Rupture	14,5			

III.3.2.3-Discussion.

La durée de vie de ce câble est très faible soit quatre fois moins que celle de la tresse sans couverture, ceci est dû en partie à la charge appliquée: elle représente 14,8% au lieu de 7,2% pour la tresse soit deux fois moins, mais également à la composition du câble, le câble de type A est plus rigide, cette rigidité est due à son traitement en surface, l'abrasion sera donc plus importante.

La courbe $Fr = f(n)$ (fig.III.3.2.2.2) décroît rapidement jusqu'à 200 cycles puis plus légèrement jusqu'à une stabilisation aux environs de 1000 cycles avant une évolution amenant la rupture. On retrouve ce début de stabilisation pour le module (fig. III.3.2.2.2) au voisinage du même nombre de cycles de fatigue.

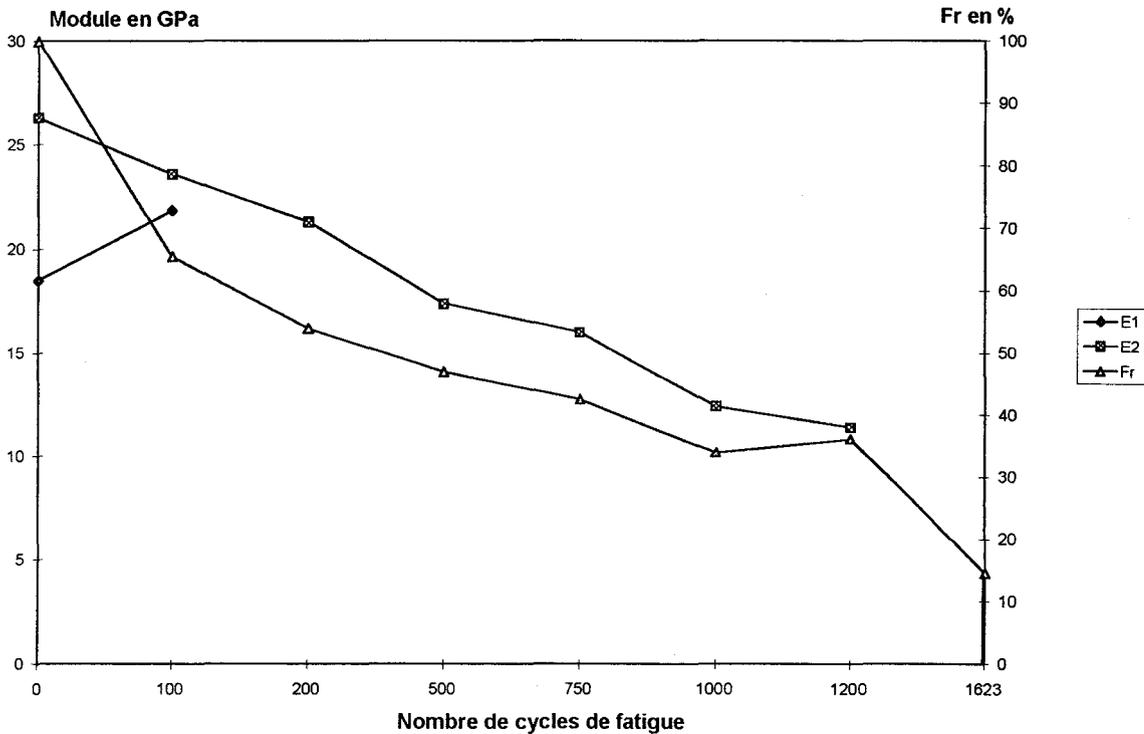


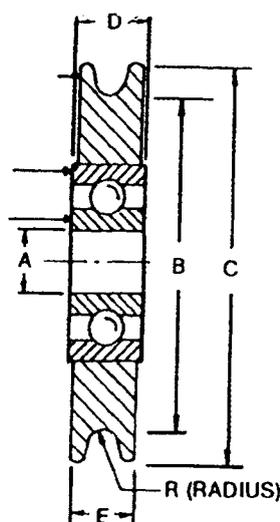
Figure III.3.2.2.2: Comparaison du comportement de Fr et de E en fonction de n

III.3.3-Fatigue des câbles de Technora et de Kevlar 49 de type A.

Afin de pouvoir continuer à situer le Technora par rapport au Kevlar, une campagne d'essais de fatigue des câbles dans chacun des deux matériaux est envisagée. Pour poursuivre les résultats précédents, on décide de réaliser des essais de fatigue sur des poulies de diamètre plus important. Car sur les poulies précédentes, le câble en Technora était très vite détérioré, donc pour une comparaison plus appréciable entre les deux natures de câbles, ces essais sont nécessaires.

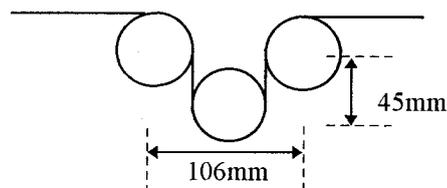
III.3.3.1- Essai

Dimension des poulies:



- A= 9,0 mm
- B= 50,2 mm
- C= 60,0 mm
- D= 9,0 mm

Disposition des poulies:



Le technora est fatigué sous une charge de 40 kg soit 19,3 % de sa charge de rupture, le coefficient d'enroulement est de $Ht=29,7$.

Le câble de Kevlar 49 est fatigué sous une charge de 25 kg soit 18,1 % de sa charge de rupture, le câble ayant un diamètre de 1,7 mm, on a donc un coefficient d'enroulement de $Ht=30,5$.

III.3.3.2-Résultats.

On réalise différents cycles de fatigue et on procède ensuite à des essais de traction sur les câbles en Technora et Kevlar, les résultats sont résumés dans les tableaux suivants.

Tableau III.3.3.2.1: Câble en Kevlar 49 de type A.

Nombre de cycles de fatigue	Force à la rupture en traction (N)	Force résiduelle en %	Allongement à la rupture en %	Module près de l'origine (GPa)	Module près de la rupture (GPa)
0	1354,0 ± 57,7	100	2,03 ± 0,15	24,1 ± 1,5	35,2 ± 1,0
100	1175,9 ± 13,4	86,8	1,80 ± 0,01		34,3 ± 0,2
200	1131,5 ± 37,7	83,6	1,65 ± 0,07		33,6 ± 0,2
500	1072,1 ± 15,3	79,2	1,73 ± 0,04		32,2 ± 0,3
1000	925,7 ± 12,5	68,4	1,50 ± 0,14		31,2 ± 0,3
1300	792,4 ± 10,8	58,5	1,30 ± 0,01		29,9 ± 0,2
2100	730,6 ± 22,1	53,9	1,30 ± 0,21		26,9 ± 0,3
2500	511,9 ± 20,2	37,8	1,50 ± 0,10		17,2 ± 0,4
2790 ± 1000	Rupture	18,1			

Tableau III.3.3.2.2: Câble en Technora de type A.

Nombre de cycles de fatigue	Force à la rupture en traction (N)	Force résiduelle en %	Allongement à la rupture en %	Module près de l'origine (GPa)	Module près de la rupture (GPa)
0	2031,4 ± 65,2	100	3,94 ± 0,12	18,5 ± 0,4	26,3 ± 0,1
1000	1673,6 ± 25,1	82,4	3,00 ± 0,15		23,9 ± 0,3
3000	1433,5 ± 17,7	70,5	2,80 ± 0,12		23,1 ± 0,2
5000	1388,2 ± 11,3	68,3	2,90 ± 0,10		21,9 ± 0,4
7000	1270,9 ± 15,2	62,5	3,00 ± 0,09		20,5 ± 0,5
9000	1184,3 ± 20,1	58,3	2,90 ± 0,08		19,9 ± 0,2
15200	964,6 ± 25,2	47,5	2,80 ± 0,08		17,2 ± 0,4
19409 ± 1000	Rupture	19,3			

III.3.3.3-Discussion.

Les pourcentages de charge appliquée sont sensiblement identiques pour les deux câbles, ainsi que le coefficient d'enroulement. Malgré ces mêmes conditions, le Technora possède une durée de vie beaucoup plus importante soit 19409 cycles pour une force résiduelle de 19,3 %, tandis que celle du Kevlar est aux alentours de 2790 cycles pour une force résiduelle du même ordre de grandeur. La différence entre les deux durées de vie est importante: sept fois environ. Le comportement du Kevlar est plus imprévisible; sa position sur la machine de fatigue est très délicate: le câble peut casser aux alentours de 1500 cycles s'il a été mal positionné sur la machine, c'est à dire avec une légère torsion. Le câble de Kevlar a de moins bonnes propriétés que le Technora,

ceci est dû entre autres à la construction du câble, car les deux fibres ont des propriétés en traction voisines (cf. p.31).

En ce qui concerne les courbes de traction sur les câbles fatigués, on a deux pentes distinctes soit deux modules pour un nombre de cycles faible. Puis, un pied de courbe apparaît avec la fatigue ainsi que la disparition de l'une des deux pentes: ne subsiste alors plus qu'un seul module.

Pour le Kevlar l'allure de la courbe $Fr = f(n)$ (fig.III.3.3.3.1) présente une diminution progressive de Fr en fonction de la fatigue, il y a une chute de Fr aux alentours de 2000 cycles qui s'accroît ensuite pour amener la rupture du câble. Le module possède le même comportement que Fr en fatigue, il y a une diminution quasi linéaire, puis une chute du module pour le même nombre de cycles (fig.III.3.3.3.1).

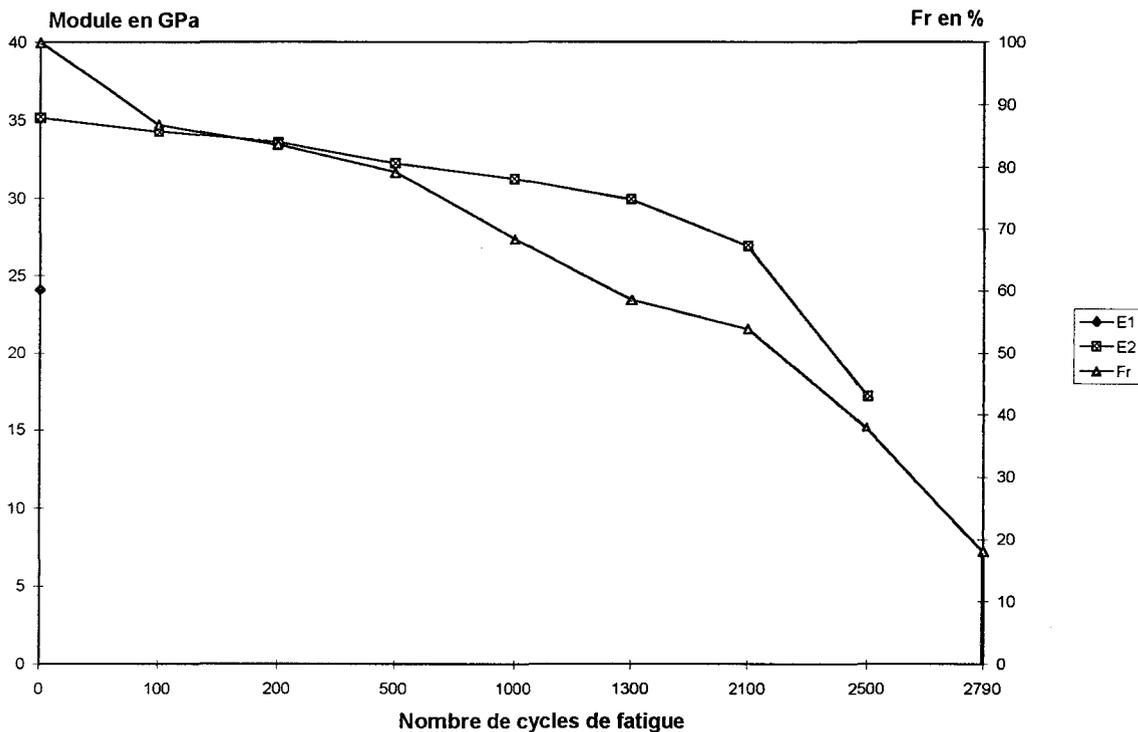


Figure III.3.3.3.1: Comparaison du comportement de Fr et de E en fonction de n pour le Kevlar de type A.

L'allure de la courbe $Fr = f(n)$ du Technora présente une diminution progressive de Fr en fonction de la fatigue, puis une chute de Fr aux alentours de 1500 cycles avant la rupture. Le module diminue de manière linéaire en fonction de la fatigue tout comme Fr .

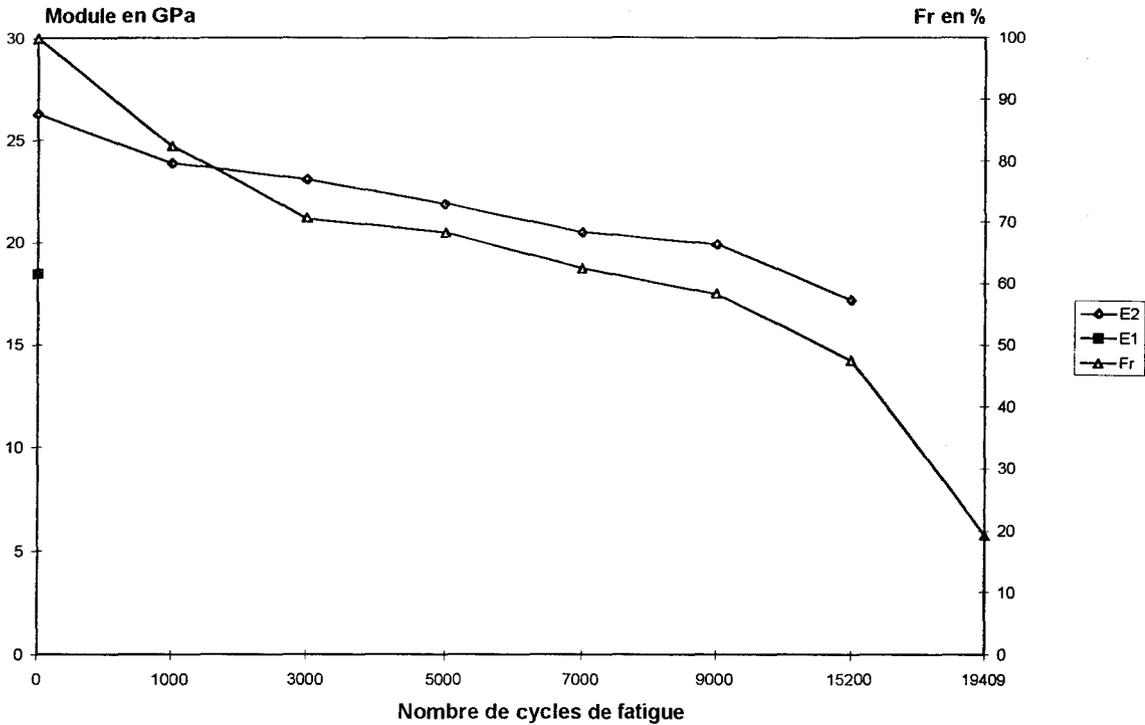


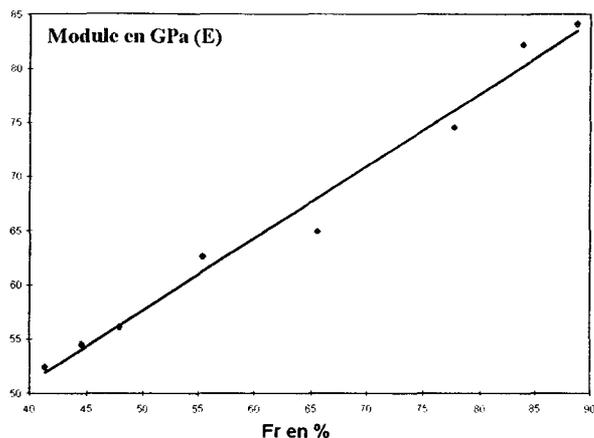
Figure III.3.3.3.2: Comparaison du comportement de Fr et de E en fonction de n pour le Technora de type A.

Remarque: le technora de type A a été fatigué de deux manières différentes: la première série d'essais sous 30 kg et sur des poulies de diamètre 30 mm, et la deuxième sous 40 kg et sur des poulies de diamètre 60 mm, la durée de vie est beaucoup plus importante dans le deuxième cas. Malgré la charge plus élevée, la durée de vie a augmenté, ceci est dû au coefficient d'enroulement plus important dans le second cas, les flexions de fatigue ont alors un rayon de courbure moins important. On peut en déduire que la charge influe moins sur la fatigue du câble que le coefficient d'enroulement.

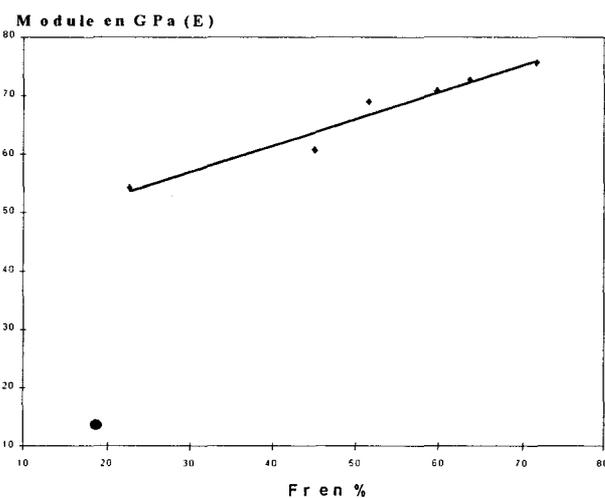
III.4-Relation module, force résiduelle.

En constatant que l'évolution du module et celle de la force résiduelle en fonction de la fatigue sont quasi identiques pour les différents câbles, on envisage de trouver une relation liant Fr et E, cette relation nous permettra par la suite de faire la liaison avec les résultats en contrôle non destructif (Chapitre V).

Pour cela, on représente dans un même graphe le module et la force résiduelle, c'est à dire $E = f(Fr)$ (fig.III.4.1).



Graphe III.4.1: $E=f(Fr)$ pour la tresse sans couverture.



Graphe III.4.2: $E=f(Fr)$ du câble à âme moulinée avec couverture non fusionnée

Pour tous les câbles étudiés, on constate pour la tresse sans couverture que l'on a une droite, il en est de même pour les autres câbles. On peut déterminer la pente de chaque droite, pour chaque câble.

Câbles	Diamètre de poulies	Pente	Coefficient de corrélation (%)
Tresse sans couverture en Technora	30 mm	0,66	95,8
Ame moulinée en Technora avec couverture non fusionnée	30 mm	0,45	99,0
Ame parallèle en Technora avec couverture non fusionnée	30 mm	1,24	97,5
Ame câblée en Technora avec couverture non fusionnée	30 mm	1,25	95,8
Ame tressée en Technora avec couverture non fusionnée	30 mm	1,23	93,0
Technora de type A	30 mm	0,40	91,0
Technora de type A	60 mm	0,20	97,5
Kevlar de type A	60 mm	0,31	91,6

Quelle que soit la construction ou la nature du câble, on a une droite lorsque l'on trace le module en fonction de la force résiduelle. Nous pouvons constater sur le graphe III.4.2 qui est celui du câble à âme moulinée, un point qui ne fait pas partie de la droite. Ce point a été pris près de la rupture, nous pouvons donc dire que ces droites peuvent être utilisées comme moyen de contrôle du câble. Elles ne sont plus respectées lorsque le câble est dans un état critique; une limite pourra donc établir à partir de quelle fatigue l'état critique est atteint: lorsque la proportionnalité E/Fr cesse. Cette valeur déterminée pour un câble donné, le suivi de E ou de Fr peut devenir indifféremment un paramètre de limite de fatigue. (Annexe 5: $E=f(Fr)$ des différentes construction de câbles).

III.5-Comparaison de la fatigue sur trois et cinq poulies:

La comparaison a été faite sur la tresse sans couverture, après 500 cycles de fatigue sous une charge de 30 kg (soit 7,2 % de la force rupture) et sur des poulies en aluminium de diamètre 30 mm (le coefficient d'enroulement Ht est de 12,5 %).

Tableau III.5.1:

	Fatigue de 500 cycles	
	Pour trois poulies soit 6 flexions simples	Pour cinq poulies soit 10 flexions simples
Force à la rupture (N)	3150,9 ± 62,5	2085,2 ± 61,2
Force résiduelle (%)	77,7	51,4
Allongement à la rupture (%)	2,98 ± 0,04	2,80 ± 0,03
Modules (GPa)	E1=70,4 E2=74,5	E=59,5

Comme on s'y attendait la fatigue sur cinq poulies est plus importante, on a une perte d'environ 26% de Fr entre les deux conditions opératoires, pour un même nombre de cycles de fatigue. La force de rupture est 1,5 fois plus faible pour les cinq poulies soit pour un nombre de flexions 1,6 fois plus important.

Si l'on regarde le tableau III.3.1.2.1 (p.89) des valeurs de la tresse fatiguée sur trois poulies, on constate que la valeur $Fr=51,4\%$ est comprise entre 55,4 et 47,9 % correspondant respectivement à 2000 et 3000 cycles. Les modules correspondants sont 62,6 et 56,1 GPa, or le module pour l'essai sur 5 poulies est de 59,5 GPa soit un module compris entre ces dernières valeurs. Ce qui voudrait dire que la fatigue de 500 cycles sur cinq poulies correspond à une fatigue aux environs de 2500 cycles sur trois poulies à module égal.

Si l'on ramène la correspondance du nombre de cycles en un nombre de flexions, on a sur les cinq poulies fait 5000 flexions simples et sur les trois poulies 15 000 flexions simples (2500*6). Avec trois poulies le câble est donc trois fois moins fatigué qu'avec cinq poulies de même diamètre. Il est donc préférable pour le câble d'éviter de disposer les poulies trop proches et en quantité élevée.

III.6-Comparaison des résultats obtenus sur des poulies de nature différente (polyamide et aluminium).

Les comparaisons sont faites sur la tresse sans couverture, tableau III.3.1.2.1 et III.2.1.a, il y a très peu de différence des résultats en ce qui concerne la force à la rupture et le module près de la rupture. Toutefois, les valeurs obtenues avec les poulies en aluminium sont légèrement plus importantes: l'usure est donc moins conséquente avec les poulies en aluminium qu'en polyamide. En observant les poulies en polyamide, on constate une légère abrasion de celles-ci (dépôt de poussière). Ce dépôt constitue ainsi un nouveau système d'abrasion du câble accentuant son usure. De plus les poulies en polyamide étant plus souples, le câble est plus tassé que dans les poulies en aluminium, d'où une usure également plus importante et de ce fait des forces résiduelles plus faibles. Il y a également une dissipation d'énergie avec les poulies en polyamide, celle-ci influe également sur les résultats obtenus.

**CHAPITRE IV : MESURE SUR CORDES FATIGUEES. ESQUISSES
DE CRITERES DE DEPOSE**

CHAPITRE IV- MESURE SUR CORDES FATIGUEES: ESQUISSE DE CRITERES DE DEPOSE.

Plusieurs essais de fatigue par pliage ont été menés par Dupont De Nemours pour aboutir à un critère de dépose (36). Entre autres des mesures de diamètre du câble testé, d'allongement et du nombre de pliages. Les expériences ont porté sur des cordages provenant de fabricants différents et de constructions différentes. Les résultats obtenus ont abouti à la même conclusion: la variation mesurée de ces paramètres en fonction de la longueur de la zone de pliage et de l'entre axe des poulies est tellement faible qu'on ne peut les utiliser actuellement comme critère de dépose. De plus on a une déformation rapide avant la rupture.

Par contre, le polyéthylène haut module subit un allongement important au cours de la fatigue. Jusqu'à présent aucun critère de dépose n'existe mais certains constructeurs de câbles acceptent cette variation de longueur comme moyen de contrôle (37).

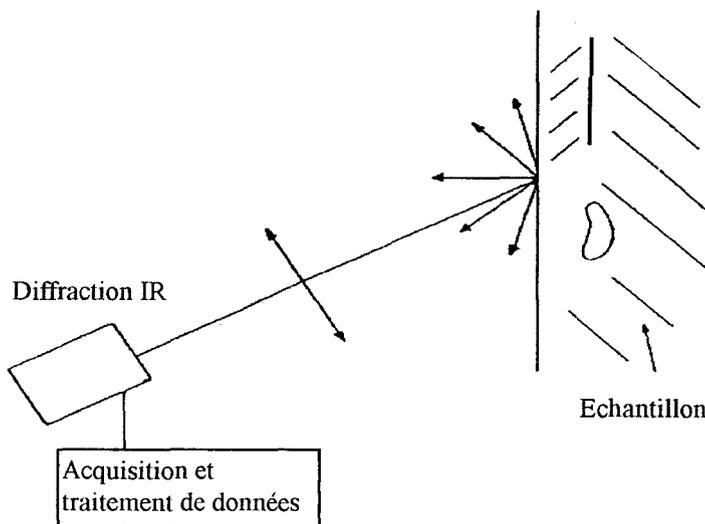
Nous avons donc mené des investigations pratiques à partir d'autres données. Les méthodes indiquées ci-dessous ont été testées.

IV.1- Thermographie Infra-Rouge.

IV.1.1-Description de la méthode.

Un échantillon s'échauffe quand on le met sous tension mécanique. Cet échauffement peut être observé par une caméra infrarouge. D'après certains auteurs (38), si l'échantillon comporte une partie endommagée, cette partie s'échaufferait plus que la partie non endommagée.

Schéma:



On utilise pour cela une caméra AGEMA 880 SW (Short Waves) à l'INSA de Lyon (Laboratoire de Physique de la matière) qui a accepté gracieusement de la mettre à notre disposition. Deux bagues rallonges permettent l'observation à très courte distance.

- Le détecteur est un In Sb refroidi,
- Le logiciel est un PTR 100 d'acquisition d'image
- La soustraction d'image est effectuée par un logiciel créé par Mohamed MERGUI.

IV.1.2-Résultats préliminaires.

Le premier essai est réalisé sur une mèche de Technora intacte. Lorsqu'elle est en équilibre thermique avec la pièce, il n'y a pas de différence de température entre le milieu et l'échantillon, d'où l'uniformité de l'image IV.1.2.1.

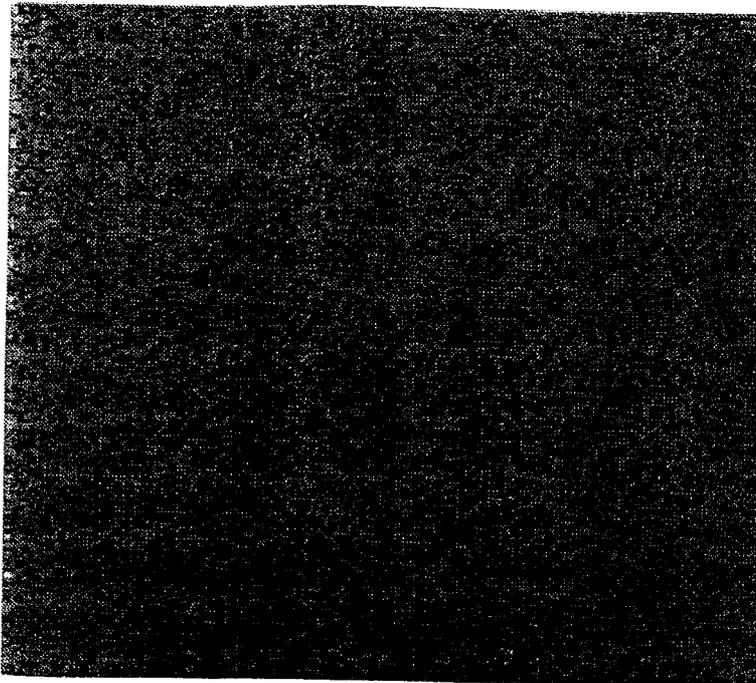


Image IV.1.2.1: Thermographie Infrarouge d'un monofilament intact.

Dans le deuxième essai, on simule une mèche fatiguée, en grattant une partie de celle-ci en surface. Puis, on la soumet à une traction. Lors de l'étirement, on peut observer un changement de couleur (image IV.1.2.2), dû à un échauffement de la mèche, avec un échauffement plus important pour la partie abîmée (au centre de la mèche).

Les différences de couleur sont mieux perçues sur l'image IV.1.2.3, quand on fait la différence entre l'image de la mèche intacte IV.1.2.1 et l'image de la mèche fatiguée IV.1.2.2.

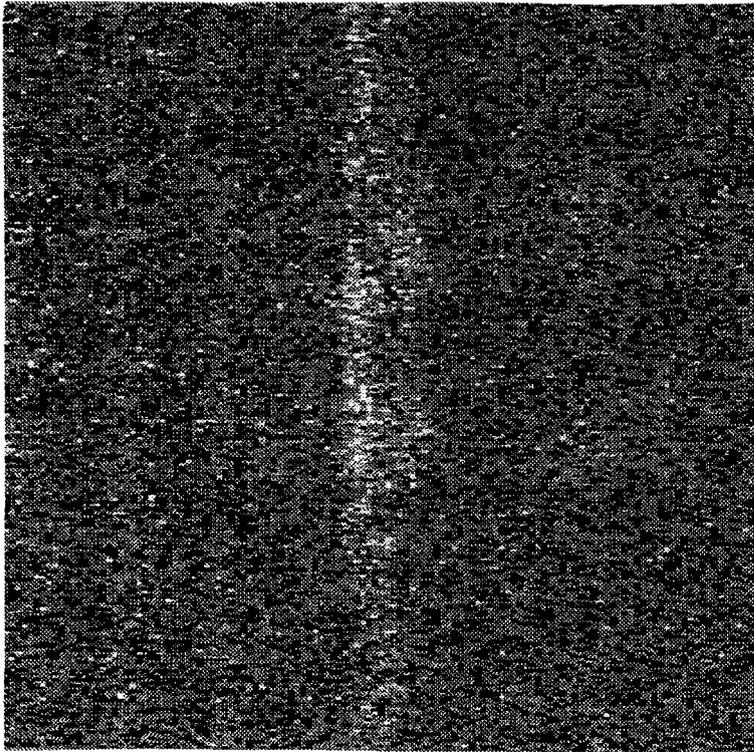


Image IV.1.2.2: Thermographie Infrarouge d'une simulation de monofilament fatigué.

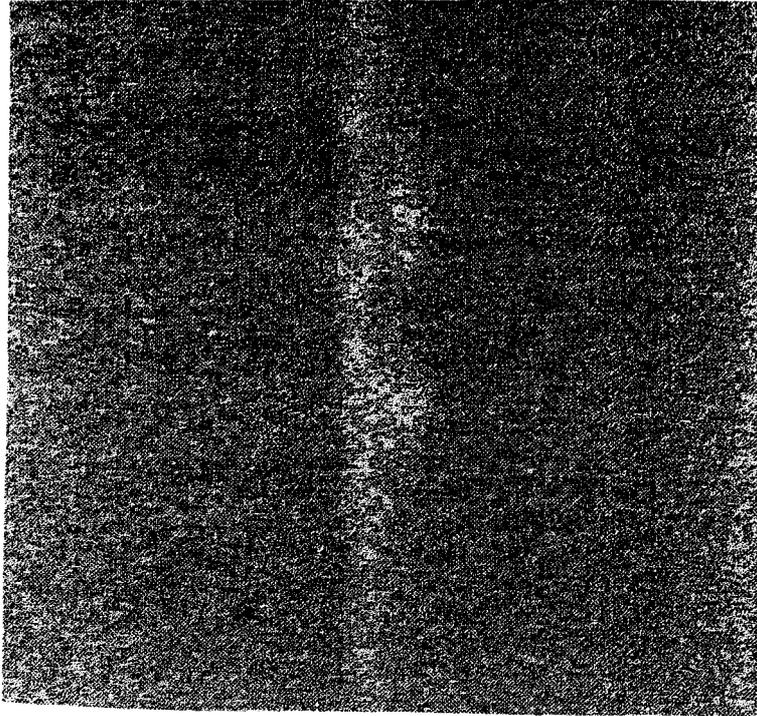


Image IV.1.2.3: Différence entre l'image IV.1.2.1 et IV.1.2 2.

Ces résultats ne sont que qualitatifs, de plus ce procédé est relativement coûteux, il faut envisager une méthode moins onéreuse.

IV.2- Méthodes basées sur la mécanique de la corde vibrante: Réponse à une excitation latérale.

a- Idée directrice:

Lors des mesures mécaniques en fatigue (paragraphe III.2.1), nous avons vu que le module d'élasticité variait avec cette fatigue.

Nous envisageons donc la détermination du module du câble pour saisir le critère de dépose. Pour ce faire, nous tentons d'exploiter les connaissances données en littérature sur l'étude de la corde vibrante, dans ses multiples manifestations.

Les essais sont réalisés sur la tresse en Technora 12 fuseaux sans couverture.

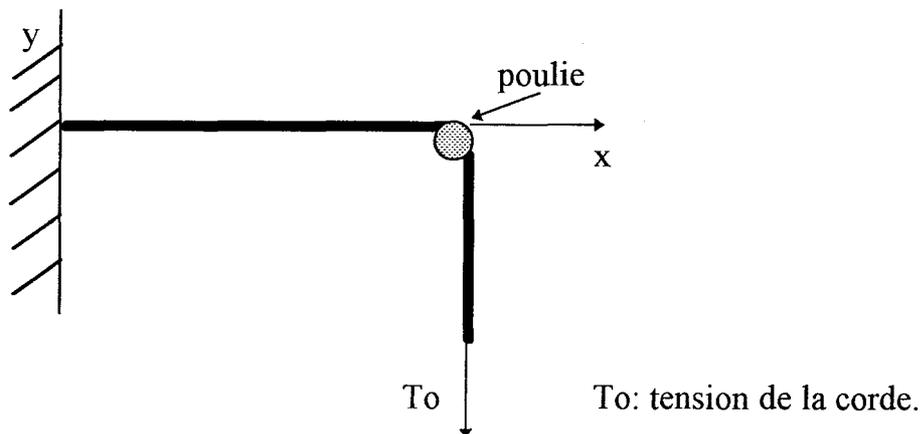
b- Equation de la corde vibrante (39):

On donne le nom d'onde à un phénomène physique, décrit par une fonction dépendant à la fois de l'espace et du temps.

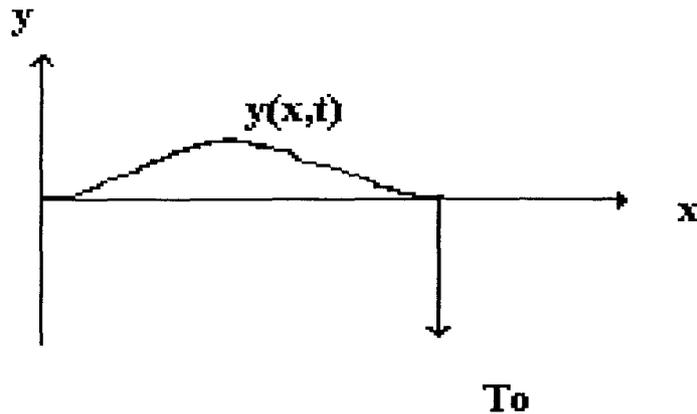
Cette fonction est solution d'une équation aux dérivées partielles dite équation d'onde.

La corde vibrante possède une équation d'onde à une dimension.

Schéma:



Si on provoque un ébranlement, celui-ci est caractérisé par la déformation $y(x,t)$.



Si on néglige la résistance de l'air, ainsi que la raideur du câble,

l'équation d'onde de la corde est la suivante:

$$\boxed{(\delta^2 y / \delta x^2) - (1/V^2) \cdot (\delta^2 y / \delta t^2) = 0}$$

avec $V^2 = T_0 / \mu$

μ : masse linéique de la corde.

V : vitesse d'onde.

Y : déplacement de la corde; fonction de x et de t

T_0 : tension de la corde

Les ondes stationnaires représentent la superposition de deux ondes progressives, qui vibrent en phase; ces ondes stationnaires sont solution de l'équation d'onde et s'écrivent:

$$y(x,t) = y_0 \cdot \sin(kx + \varphi_1) \cdot \sin(\omega t + \varphi_2)$$

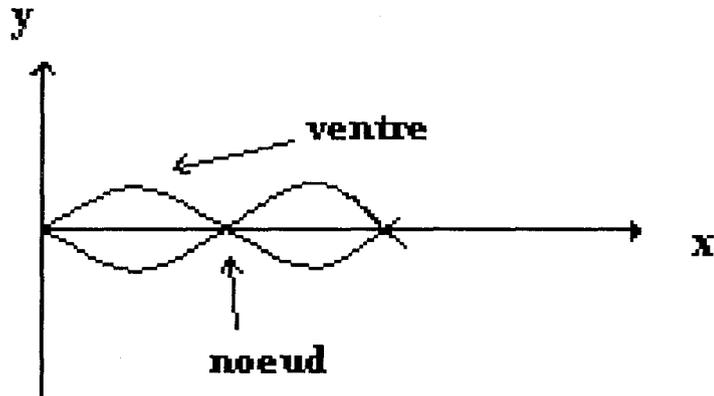
- y_0 amplitude maximum de l'onde

- φ : phase de l'onde par rapport à une origine

- ω : pulsation de l'onde

- k : $\omega/V = 2\pi/\lambda$ nombre du vecteur d'onde

- λ : longueur d'onde



Ainsi si l'on excite la corde par l'intermédiaire d'un solénoïde à la pulsation ω , on aura une onde stationnaire si :

$$l = n(\lambda/2) \quad \begin{array}{l} l: \text{longueur de la corde.} \\ n: \text{nombre entier} \end{array}$$

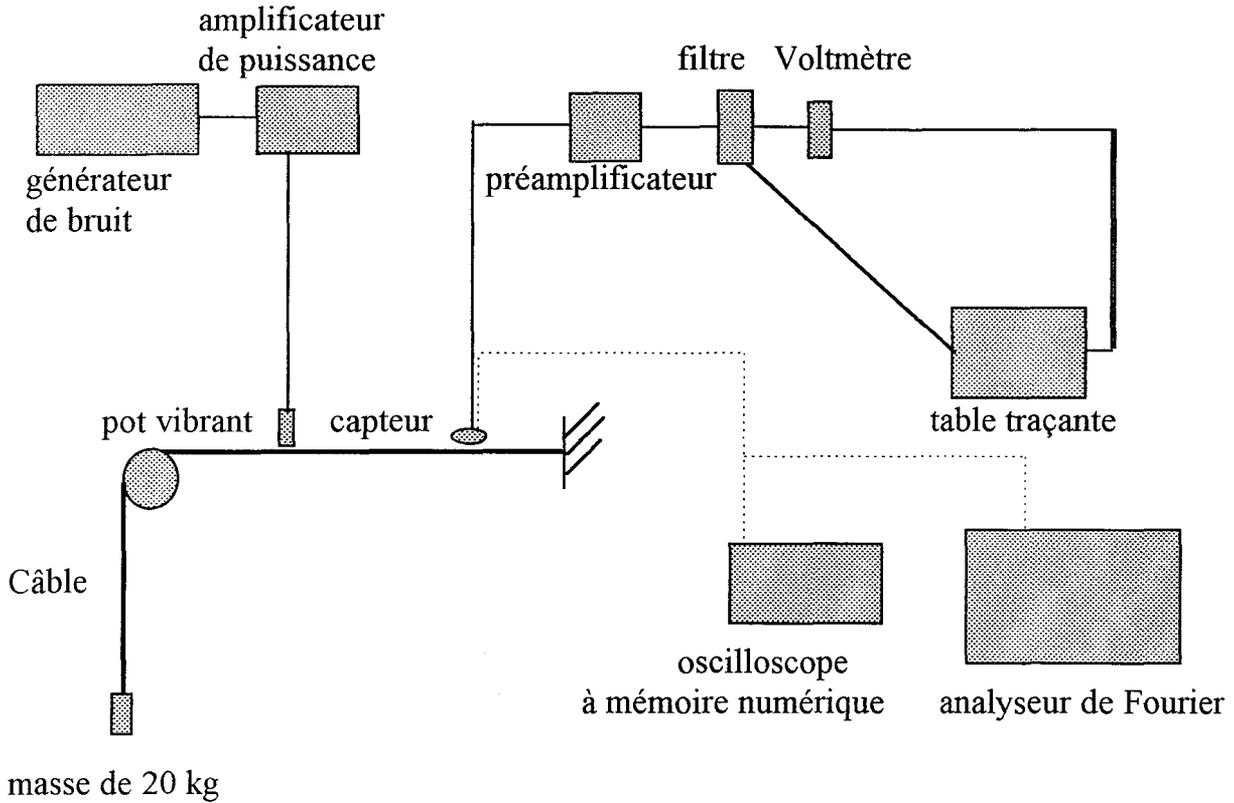
$$\text{et } \omega = k \cdot V = (n \cdot \pi / l) \cdot V = n \cdot \omega_0$$

ω_0 : pulsation fondamentale

Ces pulsations particulières ω sont les pulsations propres de la corde; les pulsations propres sont multiples d'une pulsation fondamentale ω_0 , on dit qu'elles constituent les harmoniques du mode fondamental ω_0 .

IV.2.1- Description de la méthode.

a- Schéma de l'appareillage:



Le câble, qui est une tresse de 12 fuseaux, est maintenu horizontalement, et tendu grâce à une masse de 20 kg.

On excite le câble à l'aide d'un pot vibrant, mais à l'usage il se révèle qu'il amortit les vibrations, car il est en contact avec le câble. On décide alors de provoquer des excitations manuellement ou à l'aide d'un solénoïde.

On relève les signaux grâce à un capteur magnétique, ils peuvent être observés sur oscilloscope ou analyseur de Fourier.

On espérait que les fréquences propres des différents câbles fatigués et intacts, ont une différence importante, or les valeurs obtenues s'avèrent très voisines, aux environs de 200 Hz. Ceci est dû à la faible différence de masse linéique entre les deux câbles (fatigué et intact).

Par contre la littérature (39) nous informe que certaines cordes telles que les cordes de piano ont des harmoniques qui ne sont pas multiples exactes de la fondamentale, cette inharmonicité est due à la raideur de la corde. Nous décidons d'étudier ces inharmoniques dans les câbles de Technora

IV.2.2- L'inharmonicité (39).

Dans l'équation d'onde de la corde vibrante décrite dans le paragraphe précédent, la raideur de celle-ci est négligée. En faisant intervenir la raideur dans l'équation, on introduit un terme supplémentaire:

$$(\delta^2 y / \delta t^2) = V^2 \cdot (\delta^2 y / \delta x^2) - a^2 \cdot (\delta^4 y / \delta x^4)$$

avec

- $a^2 \cdot (\delta^4 y / \delta x^4)$ terme correctif
- $a^2 = (E \cdot I) / \mu$
- $I = (\pi \cdot d^4) / 64$ moment d'inertie
- $V^2 = T / \mu$

- V : vitesse d'onde
- μ : masse linéique de la corde
- T : tension de la corde
- E : module d'élasticité (différent pour le câble fatigué et intact)
- d : diamètre de corde
- l : longueur de corde

La correction est d'autant plus importante, que la corde a un diamètre important et est moins tendue.

A partir de cette équation, on obtient des fréquences F_n qui ne sont plus exactement des multiples de la fondamentale F_0 .

On a
$$F_n = [n / (2 \cdot l)] (T / \mu)^{(1/2)} [1 + B^2]^{(1/2)}$$

Soit
$$F_n = n \cdot F_0 [1 + B^2]^{(1/2)}$$

avec
$$F_0 = [1 / (2 \cdot l)] (T / \mu)^{1/2}$$

$$B = (\pi^3 \cdot E \cdot d^4) / (64 \cdot T \cdot l^2)$$

Remarque: n nombre entier, correspondant au numéro de l'harmonique

Les valeurs de B ont été calculées pour la tresse intacte et fatiguée:

$$\begin{aligned} -B_{\text{intact}} &= 3,4 \cdot 10^{-3} \\ -B_{\text{fatigué}} &= 2,3 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

Si l'on trace les courbes théoriques F_n/n en fonction de n^2 , pour les deux types de tresses (figure IV.2.2.1), on obtient des droites différentes suivant la nature des tresses. Ce qui pourrait être un mode de distinction des tresses fatiguées où non .

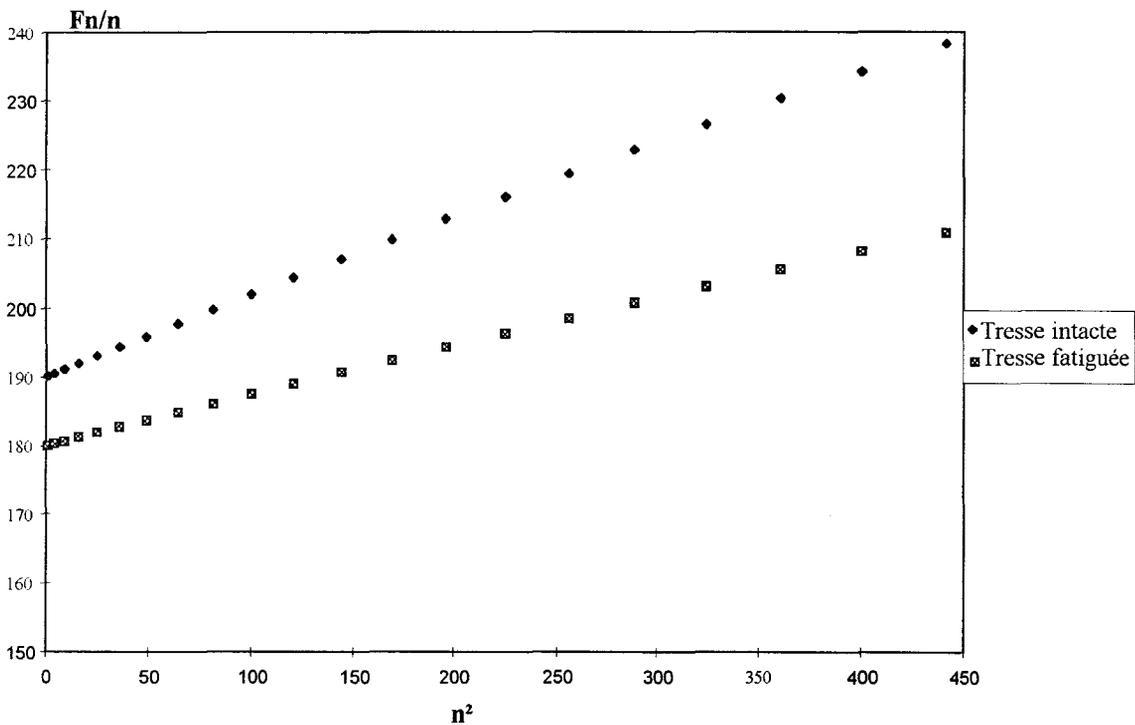


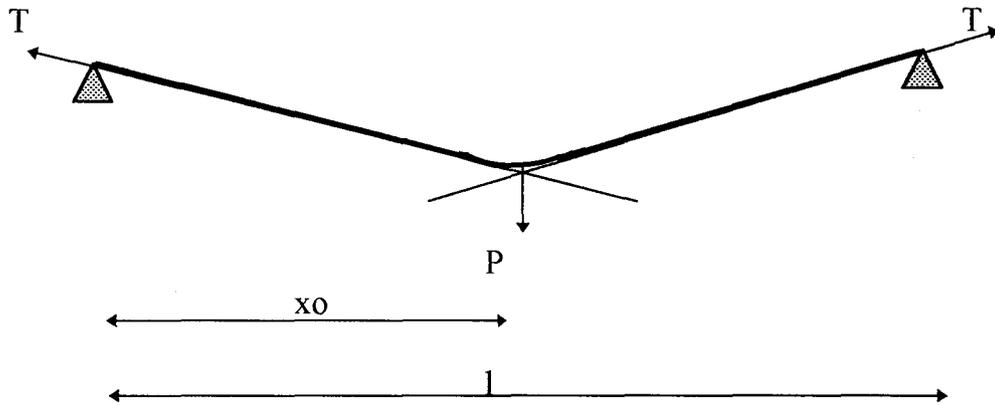
Figure IV.2.2.1: courbe théorique F_n/n en fonction de n^2

Nos essais ont été réalisés sur analyseur de Fourier, les fréquences obtenues sont les harmoniques de la fondamentale donc les valeurs F_n/n restent constantes. Il faudrait envisager de nouveaux essais sur analyseur de fréquences propres, et voir si le nombre d'harmoniques est suffisamment élevé pour que l'inharmonicité puisse différencier les deux câbles.

Une autre méthode fait intervenir la raideur de la corde, donc le module d'élasticité: la méthode de la mesure de la flèche.

IV.2.3-Etude de la flèche.

a- Schéma:



La corde est fixée et tendue sur des appuis simples et soumise à une force ponctuelle P.

- l = longueur de la corde entre les deux appuis.

- T = tension de la corde, supposée constante et indépendante de la longueur.

- P = force extérieure exercée sur la corde.

Le déplacement de la corde lors de cette réaction est exprimé par y:

$$0 < x < x_0 \quad y = [P \cdot (l - x_0) / (T \cdot l)] \cdot x - [P \cdot \sinh(k \cdot (l - x_0))] / [k \cdot T \cdot \sinh(k \cdot l)] \cdot \sinh(k \cdot x)$$

$$x_0 < x < l \quad y = [P \cdot x_0 \cdot (l - x)] / (T \cdot l) - [P \cdot \sinh(k \cdot x_0)] / [k \cdot T \cdot \sinh(k \cdot l)] \cdot \sinh(k \cdot (l - x))$$

avec $-k = T/E \cdot I$

E : module d'élasticité

I : moment d'inertie de la corde

Si $x_0=l/2$, l'équation devient:

$$y = \frac{(P \cdot l)}{4 \cdot T} - \left[\frac{P \cdot (\sinh(k \cdot l/2))^2}{k \cdot T \cdot \sinh(k \cdot l)} \right]$$

b- Dans le cas du câble de diamètre 2 mm dans les conditions du laboratoire:

Données

nous avons:

-d = 2mm

-l = 53 mm

-T = 200N

Si l'on applique une charge $P=10$ N nous obtenons

Pour le câble intact:

dont $E=79$ GPa

$$y_{\text{intact}} = 3,249 \text{ mm}$$

Pour le câble fatigué:

- $E=52$ GPa

$$y_{\text{fatigué}} = 3,25 \text{ mm}$$

La variation de module de rigidité entre un câble intact et fatigué n'est pas décelable par la mesure des flèches, la différence entre les deux cas étant faible.

c- Dans le cas de câble de diamètre 1 cm.

Supposons:

T = 1000 N

l = 2 m

P = 1000N

On aurait:

pour le câble intact: $y_{\text{intact}} = 40,2$ cm

pour le câble fatigué: $y_{\text{fatigué}} = 42$ cm

On pourrait donc différencier deux câbles par cette méthode de contrôle qui paraît acceptable pour des câbles de gros diamètre.

III.2.4- Amortissement.

Pensant que les amortissements sont différents suivant la nature du câble et que l'état de fatigue se traduit par une nature physique différente, nous décidons de mesurer les amortissements d'un câble intact et d'un câble fatigué. Pour cela, on fait vibrer les tresses manuellement et on relève les amortissements des vibrations sur oscilloscope à mémoire numérique. L'allure des deux courbes obtenues est différente (Fig.IV.2.4.1 et 2), mais l'amortissement semble identique dans les deux cas. En effet en supposant une décroissance exponentielle de l'amplitude A de l'enveloppe: $A=A_0 \cdot e^{-kt}$, on trouve $k=3 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ pour les deux enveloppes. La méthode semble donc inadaptée.

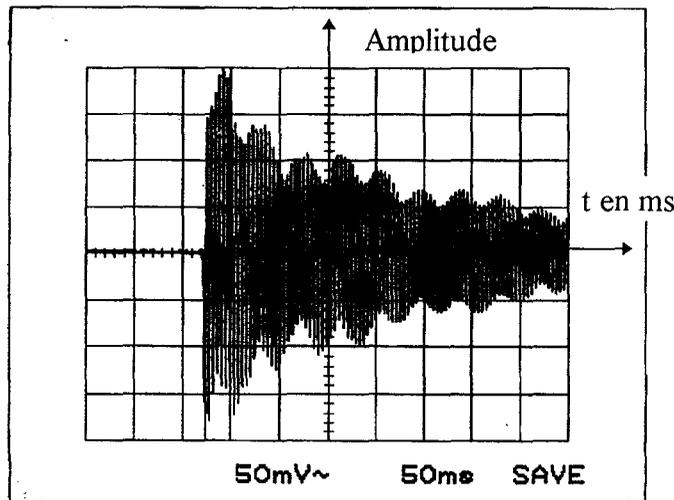


Figure IV.2.4.1 Amortissement des vibrations pour un câble intact:

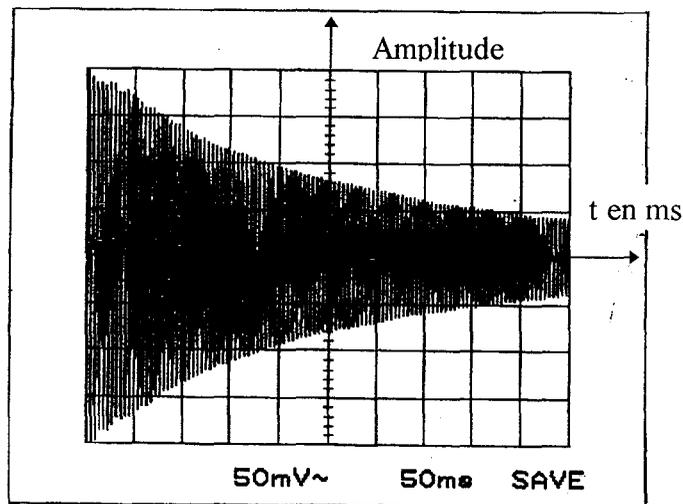


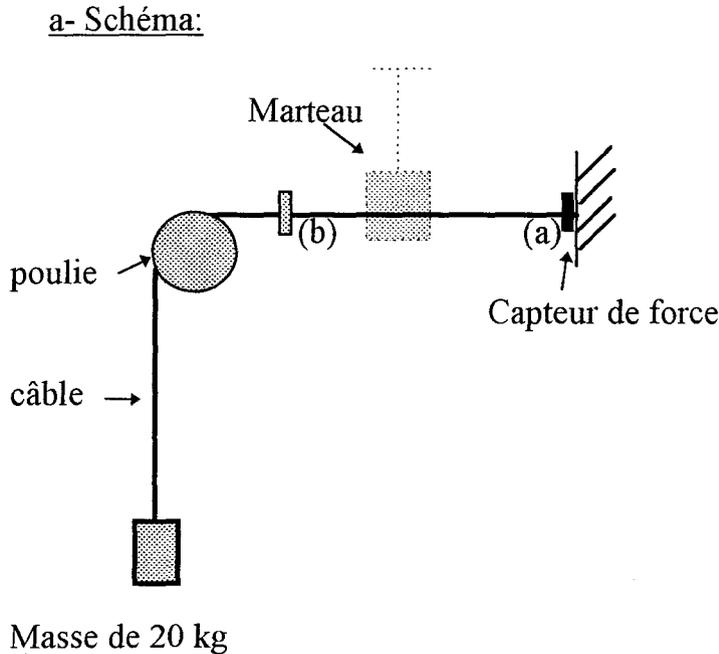
Figure IV.2.4.2 Amortissement des vibrations pour un câble fatigué

IV.3-Réponse en impact latéral.

D'après certains auteurs (24) la vitesse de propagation d'onde longitudinale (V) est liée proportionnellement au module d'élasticité (E) par la relation suivante $V^2=E/\rho$ ou ρ est la masse volumique (Chapitre V). Le module d'élasticité intervenant au premier ordre ici, alors que dans l'étude des déformations transversales (IV.2.2), il n'intervient que dans le terme correctif. Il est donc du plus grand intérêt d'étudier la propagation d'une onde longitudinale.

On effectue donc pour cela un fort impact latéral sur le câble qui provoque une impulsion de tension locale, la tension n'est plus la même sur le câble. Cette impulsion va se propager longitudinalement dans le câble.

IV.3.1-Description de la méthode.



Le câble étudié est une tresse de douze fuseaux sans couverture en Technora T220.

Le câble est maintenu horizontalement, et est tendu par une masse de 20 kg à son extrémité libre. Le capteur de force est monté à l'extrémité fixe du câble (a). En b (Cf. figure) on peut ou non mettre une fixation pour lier ce point au bâti permettant d'isoler la masse du système. Un marteau permet l'impact, celui-ci a lieu entre les deux fixations (a et b).

On réalise quatre types d'essai, pour voir l'influence non seulement des différents points d'attache a, b et extrémité fixée à la masse, mais aussi évidemment l'influence de la nature des câbles:

Sur câble intact:

Premier essai: le câble est fixé en a et b, le marteau vient frapper le câble et on relève sa réponse sur un oscilloscope relié au capteur de force.

Deuxième essai: le câble n'est fixé qu'en a.

Sur câble fatigué:

Troisième essai: le câble est fixé en a et b. Pour simuler un câble fatigué, on extrait trois fuseaux d'un câble intact avant cet essai.

Quatrième essai: le câble est fixé en a et b. Ce câble a subi 12 220 cycles sous une charge de 28 kg. Chaque cycle correspond à 4 flexions simples sur des poulies de diamètre 26 mm.

IV.3.2-Résultats.

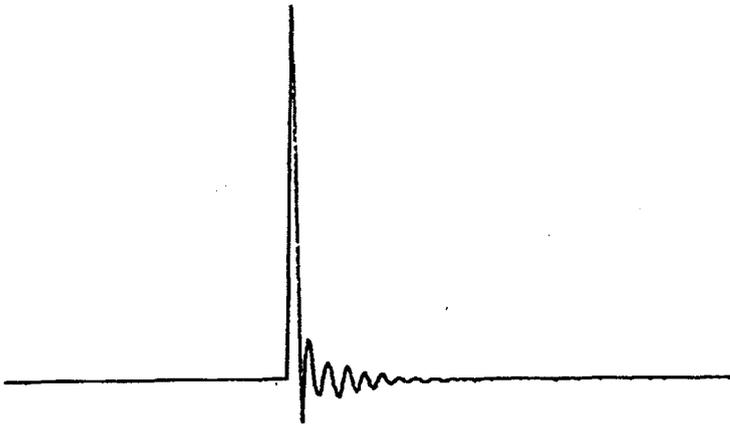


Figure IV.3.2.1: Réponse à l'impulsion sur câble intact fixé en a et b.

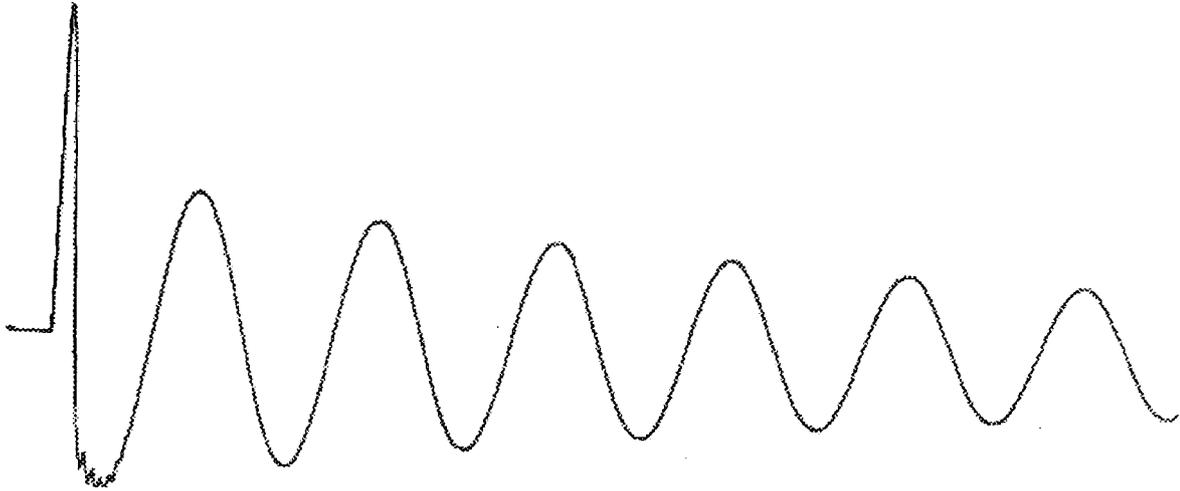


Figure IV.3.2.2: Réponse à l'impulsion sur câble intact fixé en a.

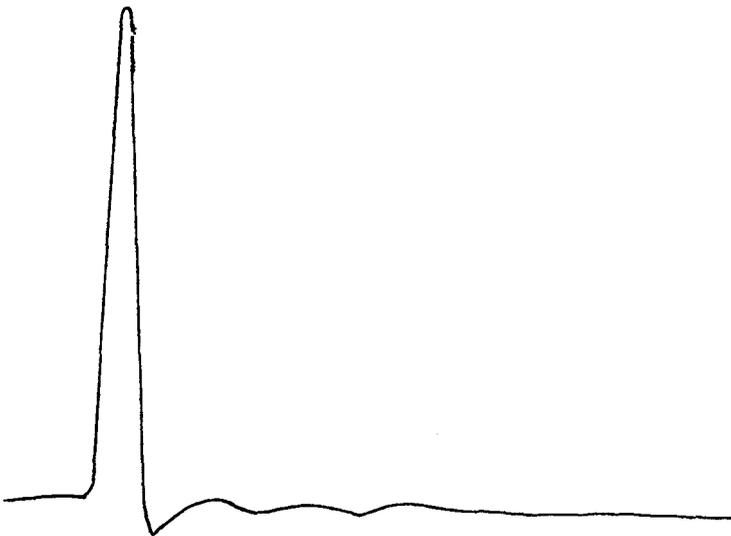


Figure IV.3.2.3: Réponse à l'impulsion pour un câble dont on a simulé une fatigue.

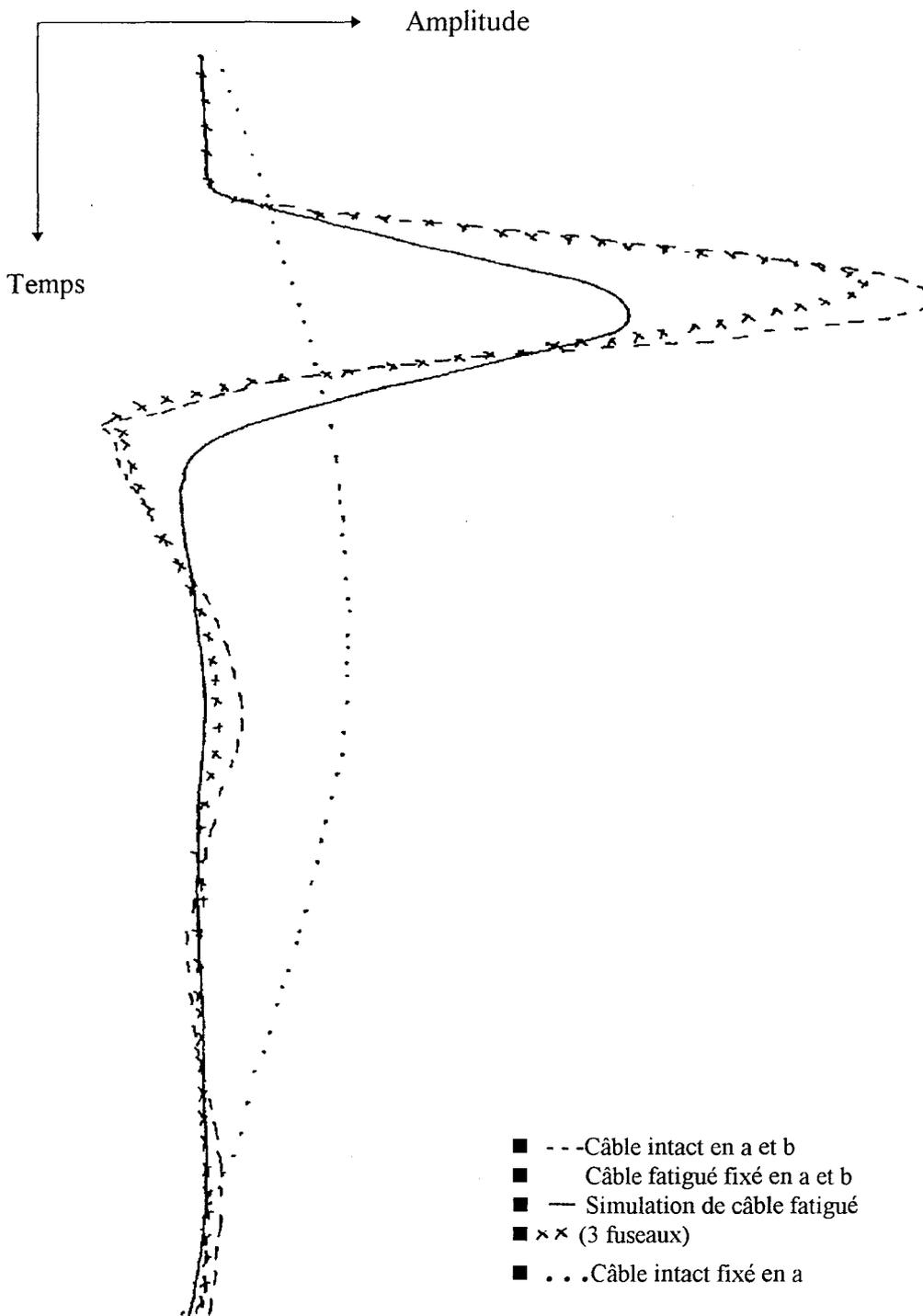


Figure IV.3.2.4: Comparaison des différentes réponses à l'impulsion pour des câbles dans différents états.

IV.3.3-Discussion.

La figure IV.3.2.1 représente le premier type d'essai, le câble est intact et fixe entre a et b. L'allure de la courbe montre l'amortissement du câble après l'impact, on a un pic important correspondant à une force due à l'impact de 54 daN, puis un amortissement sinusoïdal assez rapide.

La figure IV.3.2.2 correspond au deuxième type d'essai le câble est intact et fixé uniquement en a. Le câble n'étant pas fixé en b, on a donc une courbe qui représente l'amortissement de la masse de 20 kg. La force due à l'impact est de 18 daN, plus faible que dans le premier cas. Ceci peut être expliqué du fait que le câble ne conserve pas sa tension, dû au rebondissement de la masse, d'ailleurs l'amortissement est moins rapide (absence de tension).

Ayant la réponse de la masse dans ces conditions, nous fixerons donc le câble en a et b.

La figure IV.3.2.3 représente la réponse du câble n'ayant que 9 fuseaux, on en a retiré 3 pour simuler un câble fatigué, il a donc perdu un quart de sa résistance. On constate que la force due à l'impact est de 32 daN, plus faible que celle obtenue pour le câble intact.

Figure IV.3.2.4, on a la réponse à l'impact du câble fatigué (12 220 cycles), l'allure de la courbe est voisine de celle obtenue pour le câble intact, mais avec une force à l'impact plus faible 48 daN.

Si l'on compare les différents essais entre eux (figure IV.3.2.4), on constate que la force à l'impact diminue légèrement avec la fatigue. On peut donc par cette méthode différencier les câbles suivant leurs états de fatigue.

IV.4-Conclusions

Les différentes méthodes étudiées, et suggérées ont apporté des renseignements intéressants sur le contrôle non destructif des câbles. Nous avons également pensé à l'introduction de groupement chromophore dans la fibre, colorant changeant de couleur lorsque sa structure moléculaire est modifiée (40) On pourrait étudier ces méthodes plus en détail, mais le temps qui nous est attribué est court. Il faut donc faire un choix pour continuer nos études sur les câbles fatigués.

Le module variant avec la fatigue, nous décidons de suivre nos essais à partir de la relation $V^2=E/\rho$. La vitesse de propagation longitudinale sera mesurée par la méthode que nous allons développer dans le chapitre suivant.

**CHAPITRE V: MESURE DE LA VITESSE DE PROPAGATION
LONGITUDINALE PAR PROPAGATION D'ONDES
ACOUSTIQUES**

CHAPITRE V: MESURE DE LA VITESSE DE PROPAGATION LONGITUDINALE PAR PROPAGATION D'ONDES ACOUSTIQUES.

V.1-Rappel Bibliographique:

L'essai ultrasonique ou sonore consiste à propager dans le matériau à étudier, une onde élastique progressive de fréquence ultrasonore ou sonore et à en mesurer la vitesse ainsi que le coefficient d'atténuation. Ces paramètres sont liés aux composantes du tenseur des rigidités.

La propagation d'une onde progressive ultrasonore ou sonore dans un matériau est un moyen privilégié pour étudier la réponse élastique de ce matériau. En effet les déformations et les contraintes induites par l'onde lors de sa propagation sont très faibles, ce qui assure que la sollicitation reste purement élastique. De ce fait, l'essai est non destructif.

Le développement du contrôle non destructif s'est développé pour améliorer la sécurité et la fiabilité. Dans notre domaine, l'étude du contrôle non destructif a tout d'abord été effectuée sur des câbles d'acier puis sur des câbles synthétiques.

Certains auteurs (41-42) ont pensé à la mesure du facteur "SWF" (Stress Wave Factor) par la technique du contrôle non destructif d'acoustique ultrasonore, sur des cordes en Nylon. Ce facteur "SWF" est évalué par le nombre d'oscillations marquant la fin de production de signaux émis par la sonde réceptrice. Ce facteur est lié à la force mécanique du matériau. Si les échantillons sont soumis à une fatigue sous charge cyclique, il a été observé que les valeurs de SWF dépendaient du nombre de cycles: un grand endommagement de l'échantillon produit une importante atténuation du signal, conduisant à une faible valeur du facteur SWF.

D'autres auteurs comme H. KWUN (43), ont cherché un contrôle non destructif des câbles métalliques et synthétiques par évaluation d'ondes de vibration à impulsion transversale. Selon eux la présence de torons rompus et de défauts dans les câbles provoquent une réflexion partielle de l'onde facilement perceptible. La vitesse de propagation de cette onde est conforme à l'équation $(F/M)^{1/2}$ où F est la charge et M la masse linéique du câble. Les résultats indiquent que la méthode de détection par onde de vibration à impulsion transversale est susceptible de constituer un moyen rapide et simple de détection des défauts et de déterminer à la fois le niveau de charge et la masse moyenne par unité de longueur du câble.

Jack C. SMITH (44) a consacré l'une de ses publications à cette théorie de la propagation d'onde par impact transversal le long de câbles textiles.

Des essais ont également été réalisés sur des cordes et des tissus textiles, pour déterminer non plus la vitesse de propagation transversale mais longitudinale. Une comparaison entre ces deux ondes est faite en annexe 4.

Il est commercialisé depuis peu des petits appareillages tels que le Dynamic Modulus Tester PPM-5R de LAWSON-HEMPHILL qui permettent de mesurer les modules de fils et de fibres ainsi que de tissus de faible section. Ces paramètres sont déterminés à partir de la vitesse d'une onde sonique longitudinale. Cet appareil fournit des données sur le module d'élasticité du matériau. D'autres relations obtenues à partir de ces données permettent une mesure quantitative de l'orientation moléculaire dans les fibres ou films, ainsi que l'orientation des fibres dans le tissu et l'angle de torsion des fibres dans les fils. En effet G.BLYTH (45), dont les études ont porté sur les vêtements tissés, a constaté une variation du module suivant la direction prise sur le tissu. D'après A.RYAN (46) il est possible à partir de cette méthode de prédire la configuration d'un tissu et d'un fil.

Le module obtenu à partir de la vitesse de propagation longitudinale, module appelé sonique, est également utilisé pour déterminer la maturité d'une fibre de coton (47), mais également pour différencier des tissus ayant subi des traitements de finition différents (48-49-50).

Comme nous venons de le voir, la nature du matériau a une influence sur le module sonique. De plus lors des mesures mécaniques sur des câbles fatigués, nous avons remarqué une diminution du module d'élasticité des câbles avec la fatigue. Nous avons donc fait l'hypothèse qu'il y a une relation entre le module et la fatigue du câble. On décide donc de baser nos recherches de contrôle non destructif sur le module sonique, qui est lié à la vitesse de propagation d'ondes longitudinales par la formule (Cf.IV.3) :

$$V^2 = E / \rho$$

-E module en N/m^2

- ρ masse volumique en Kg/m^3

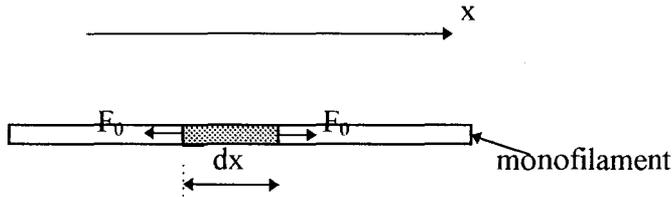
-V vitesse de propagation en m/s

V.1.1-Démonstration de $V^2 = E/\rho$ (51).

On considère une onde longitudinale se propageant dans un monofilament, constituant un matériau homogène, élastique.

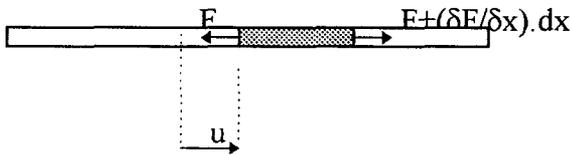
On suppose que le monofilament est initialement soumis à une tension mécanique statique F_0 .

Le monofilament est modélisé de la façon suivante:



soit dx un petit élément du filament

Si une onde longitudinale de déformation unidirectionnelle est propagée dans le monofilament, elle provoque une variation de la tension δF . L'élément dx subit une accélération amenant un déplacement u et une déformation du .



Cette variation de tension est liée à l'élément déplacement u , à partir de la position initiale de x par la loi de Newton:

Force = masse * accélération
 $(F + (\delta F / \delta x) . dx) - F = (\rho . S . dx) * (\delta^2 u / \delta t^2)$

soit $\delta F / \delta x = \rho . S . (\delta^2 u / \delta t^2)$ (1)

- ρ : masse volumique
- S : section du monofilament

Or pour tout matériau obéissant à la loi de l'élasticité linéaire, si tous les effets de contrainte transversale sont négligés, la déformation longitudinale ϵ et la contrainte σ sont liées par la loi de Hooke:

$\sigma = E . \epsilon$ (2)

- E : module d'élasticité.

La déformation est considérée uniforme dans la section de l'élément dx , il peut donc être écrit $F = \sigma . S$ et en remplaçant σ par l'équation (2):

$F = E . \epsilon . S$ (3)

En remplaçant F dans l'équation (1) par la relation (3) on obtient:

$$\delta\varepsilon/\delta x = (\rho/E) \cdot (\delta^2 u/\delta t^2) \quad (4)$$

Or la déformation ε est constituée de deux composantes:

- une composante constante ε_0 due à la déformation de la tension initial F_0
- une composante variable ε' due à l'onde de propagation.

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon' \quad (5)$$

Le déplacement u dépend uniquement de la composante de déformation variable ε' :

$$\varepsilon' = \delta u/\delta x \quad (6)$$

En remplaçant dans l'équation (4) ε par la relation (5) et ε' dans la relation (5) par la relation (6):

$$\delta^2 u/\delta x^2 = (\rho/E) \cdot (\delta^2 u/\delta t^2) \quad (7)$$

L'équation (7) est l'équation de propagation d'une onde plane unidirectionnelle dans un matériau homogène, d'élasticité linéaire (cf. Chapitre IV).

La vitesse de propagation V de l'onde plane unidirectionnelle dans le matériau est:

$$V^2 = E/\rho$$

La solution complète de l'équation différentielle (7) de propagation dépend des conditions aux limites.

V.1.2- Application aux fils.

La démonstration précédente a été faite pour un monofilament, il a été vérifié que celle-ci est également applicable à un fil torsadé, pour cela plusieurs hypothèses ont été envisagées (51):

- Les monofilaments suivent une géométrie en hélice idéale dans le fil torsadé.

- Il n'y a pas de mouvement relatif entre les monofilaments. Les déformations longitudinales des monofilaments sont entièrement définies par la géométrie de torsion et la déformation du fil.
- Le fil peut être considéré comme un ensemble continu, et posséder une déformation continue dans la section.
- La section du fil peut être considérée circulaire
- L'onde de déformation imposée au fil se propage comme une onde plane
- La composante variable de la déformation ϵ' liée à l'onde de propagation est petite.

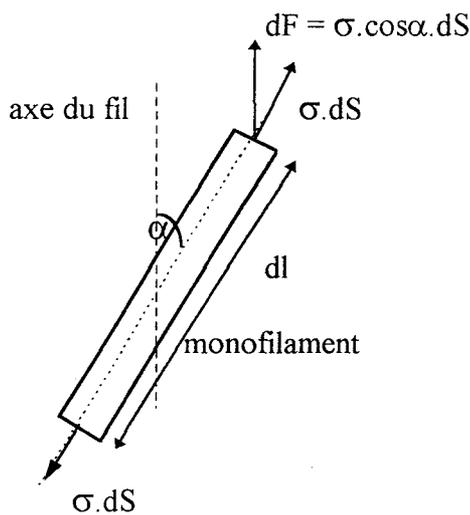
V.1.3- Relation entre le fil et les monofilaments.

Le problème est de lier maintenant la tension F du fil à la distribution de contrainte des monofilaments.

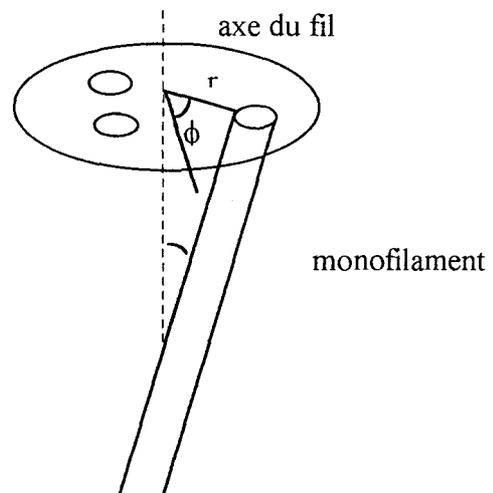
Dû à la géométrie en hélice du fil, l'élément de la force de tension longitudinale au fil dF , résultant des contraintes normales σ des monofilaments est donné par

$$\boxed{dF = \sigma \cdot \cos\alpha \cdot dS} \quad (8)$$

α : angle de torsion



Etude d'un élément dl de monofilament



Position d'un élément dans le fil

Or dS est la projection de l'aire de la section normale à l'axe du fil torsadé.

$$dS = r \cdot dr \cdot \cos\alpha \cdot d\Phi$$

Φ : coordonnée angulaire dans la section transversale du fil.

r : rayon quel que soit le point dans la section du fil. La relation (8) devient alors:

$$dF = \sigma \cdot \cos^2\alpha \cdot r \cdot dr \cdot d\Phi \quad (9)$$

σ est indépendant du diamètre; si la distribution de déformation est symétrique par rapport à l'axe du fil, et en intégrant l'équation (9), puis en la différenciant par rapport à x :

$$\delta F / \delta x = \int_0 \left(\delta \sigma / \delta x \right) \cdot \cos^2\alpha \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr \quad (10)$$

Pour déterminer $\delta F / \delta x$ il est nécessaire de spécifier la forme mathématique de la distribution de déformation, ainsi que le déplacement u .

Initialement, la distribution de déformation du filament est due à la déformation du fil accompagnant la tension statique F_0 . Du fait de la géométrie de torsion en hélice la distribution sera une fonction de la position radiale dans la section. En conséquence, la forme mathématique générale de la distribution de déformation sera donnée par une expression similaire à celle de l'équation (5) modifiée par une fonction de distribution radiale notée $f(r)$.

$$\varepsilon = f(r) \cdot (\varepsilon_0 + \varepsilon') \quad (11)$$

on a donc à partir des équations (2), (6) et (11):

$$(12) \quad \delta \sigma / \delta x = E \cdot f(r) \cdot \delta^2 u / \delta x^2$$

En remplaçant $\delta \sigma / \delta x$ dans l'équation (10) par l'équation (12):

$$\delta F / \delta x = \int_0 E \cdot f(r) \cdot \delta^2 u / \delta x^2 \cdot \cos^2\alpha \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr$$

et en remplaçant $\delta F / \delta x$ par l'équation (1):

$$\int_0 E \cdot f(r) \cdot \delta^2 u / \delta x^2 \cdot \cos^2\alpha \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr = \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \delta^2 u / \delta t^2$$

Il en est déduit le module effectif dynamique E_e du fil torsadé :

$$E_e = 2 \cdot E / R^2 \cdot \int_0^R f(r) \cdot \cos^2 \alpha \cdot r \cdot dr \quad (13)$$

La vitesse de propagation d'une onde longitudinale dans le fil torsadé est donc:

$$V^2 = E_e / \rho$$

Il faut considérer maintenant l'extension statique d'un fil torsadé, de filament continu, sujet à une déformation ε_y , la tension du fil sera donnée par:

$$F = \int dF = 2 \cdot \pi \cdot \int_0^R \sigma \cdot \cos^2 \alpha \cdot r \cdot dr$$

Ceci peut être exprimé en terme de déformation du fil en admettant que les lois applicables au monofilament soient valables pour le fil:

$$F = \sigma_e \cdot \pi \cdot R^2$$

$$\sigma_e = E_e \cdot \varepsilon_y$$

$$E_e \cdot \varepsilon_y = 2 / R^2 \cdot \int_0^R \sigma \cdot \cos^2 \alpha \cdot r \cdot dr$$

Pour le monofilament à comportement élastique linéaire, la contrainte σ peut être écrite comme:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

$$\varepsilon = \varepsilon_y \cdot f(r)$$

$$E_e = 2 \cdot E / R^2 \cdot \int_0^R f(r) \cdot \cos^2 \alpha \cdot r \cdot dr \quad (13)$$

Que la démonstration soit faite à partir du monofilament ou que les lois soient appliquées directement au fil, l'équation pour le module effectif du fil est identique. En conclusion si l'onde de propagation est plane et si le comportement du matériau est élastique linéaire: le module effectif dynamique d'un fil torsadé de filaments continus est lié au module dynamique d'un filament simple. De la même façon le module statique effectif d'un fil torsadé est lié, au module statique d'un fil non torsadé.

De manière générale la relation $V^2 = E/\rho$ est applicable aux fils, aux câbles..., le module E dépend du module des fils ou des câbles à construction parallèle, ainsi que de l'angle de torsion.

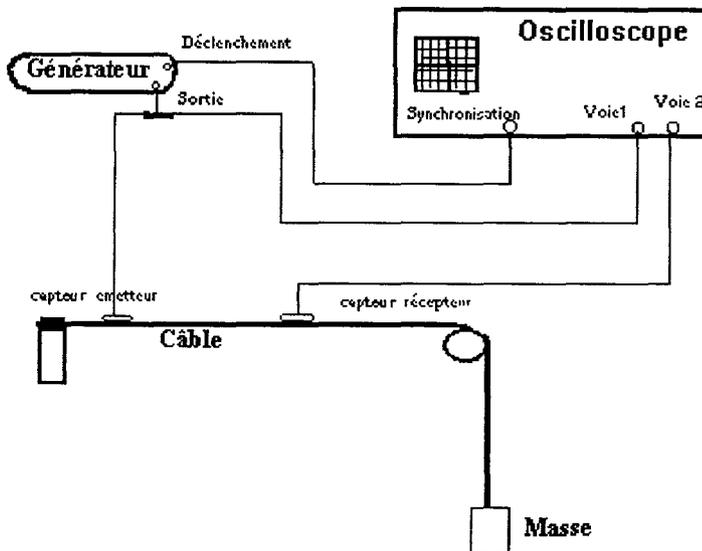
Le but de l'étude est donc maintenant de déterminer cette vitesse de propagation longitudinale par propagation d'ondes acoustiques.

V.2-Principe.

D'après certaines publications et tout particulièrement celle de NORTHOLT (24), il a été possible de déterminer le module dynamique par une méthode basée sur la propagation d'onde acoustique longitudinale. Les expériences de Northolt ont porté sur les fibres de polyaramides; un signal de 100 μ s et de fréquence 100 pulsations par seconde est envoyé dans la fibre à l'aide de cristaux piézo-électriques en contact avec la fibre.

Le temps de parcours de l'onde entre deux cristaux émetteur et récepteur, pour une distance fixée, permet de déterminer la vitesse de propagation et ainsi de calculer le module.

Schéma de l'appareillage:



Sortie du générateur vers : - voie 1 de l'oscilloscope

- Capteur émetteur

Capteur récepteur vers : - Voie 2 de l'oscilloscope

V.3-Appareillages utilisés:

- **Deux capteurs piézo-électriques.** Ce sont des matériaux cristallins qui ont la propriété de se déformer sous l'action d'un champ électrique, et réciproquement. Nous utilisons des capteurs sonores qui permettent d'émettre et / ou de recevoir des ondes sonores. Ils sont principalement constitués par des oscillateurs, que l'on appelle également transducteurs qui constituent l'élément piézo-électrique. Le contrôle non destructif par ondes sonores ne peut se faire avec une source continue, car il faut prendre le temps d'écouter les signaux éventuels provoqués à la suite de l'émission.

Les capteurs utilisés ont:

- une fréquence de résonance de 6,6 KHz
- un niveau acoustique de 90 dB à 30 cm
- un diamètre de 30 mm
- une épaisseur de 4,5 mm
- une fréquence fondamentale $f_0=C/2e$
 - C vitesse du son dans le piézo-électrique
 - e épaisseur de la lame piézo-électrique

- **Générateur d'impulsions TG.105.** Ce générateur est caractérisé par un large choix de fréquence 0-5 MHz et des impulsions de 100 ns à 100 ms. Le mode de déclenchement génère une impulsion de sortie qui débute de façon synchronisée avec l'impulsion de déclenchement d'entrée.

- **Oscilloscope à mémoire numérique.** Cet oscilloscope possède une interface en série permettant la récupération des courbes sur ordinateur. On utilise la sortie de synchronisation du générateur qui engendre une impulsion d'amplitude 5 V et d'une durée de 100 ns. L'oscilloscope se prépare à recevoir les données 20 ns avant le pulse à l'origine de la déformation.

V.4-Description de la méthode:

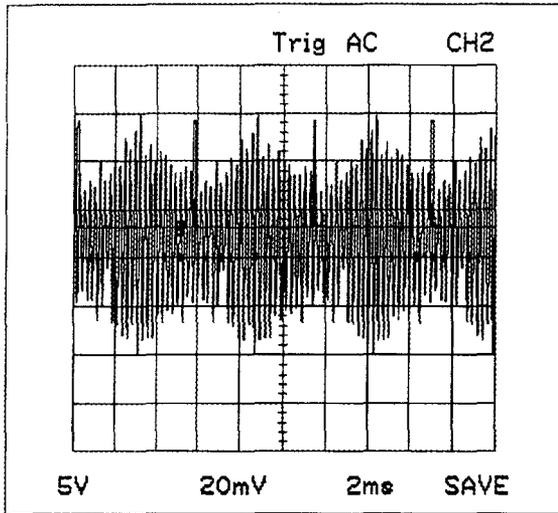
Les essais sont tout d'abord effectués sur des câbles tressés (huit fuseaux) de Kevlar 29 et Kevlar 149 sans couverture, ces câbles possèdent des modules très différents l'un de l'autre. Si existe une différence notable entre les temps de propagation dans ces deux câbles, on aura donc une différence entre les modules soniques. Si cette différence existe, on pourra donc envisager des études plus approfondies sur les différents états de fatigue du Technora.

Les modules des différents matériaux ont été aussi déterminés à partir des courbes de traction.

On applique un signal carré de période 60 ms donnant des pulsations de largeur de 100 μ s. Car après différents essais, on constate que les piézo-électriques ont la capacité de déformer le pulse. Une durée de 100 μ s limite ces déformations.

La période est choisie à 60 ms, car une période de pulse trop courte conduit à un chevauchement des réponses: le premier pulse n'est pas encore assez atténué quand le second est envoyé (figure V.4.1).

Période signal 6 ms



Période signal 60 ms

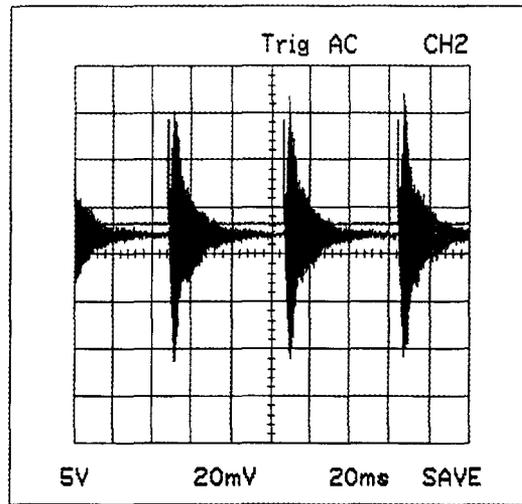


Figure V.4.1: Réponse piézo-électrique à un pulse de faible période 6 ms et à un pulse de période 60 ms.

V.5-Résultats expérimentaux.

Après mise en place du système, on a vérifié que si on émettait un signal en absence du câble avec le capteur émetteur, on relevait une réponse grâce au capteur récepteur: le signal obtenu dans l'air est sinusoïdal (figure V.5.1).

Si on place, maintenant le câble, on constate une déformation du signal à la suite du pulse, ce signal est différent de celui dans l'air (figure V.5.1). Nous pouvons donc dire que la corde est bien à l'origine de la déformation du signal.

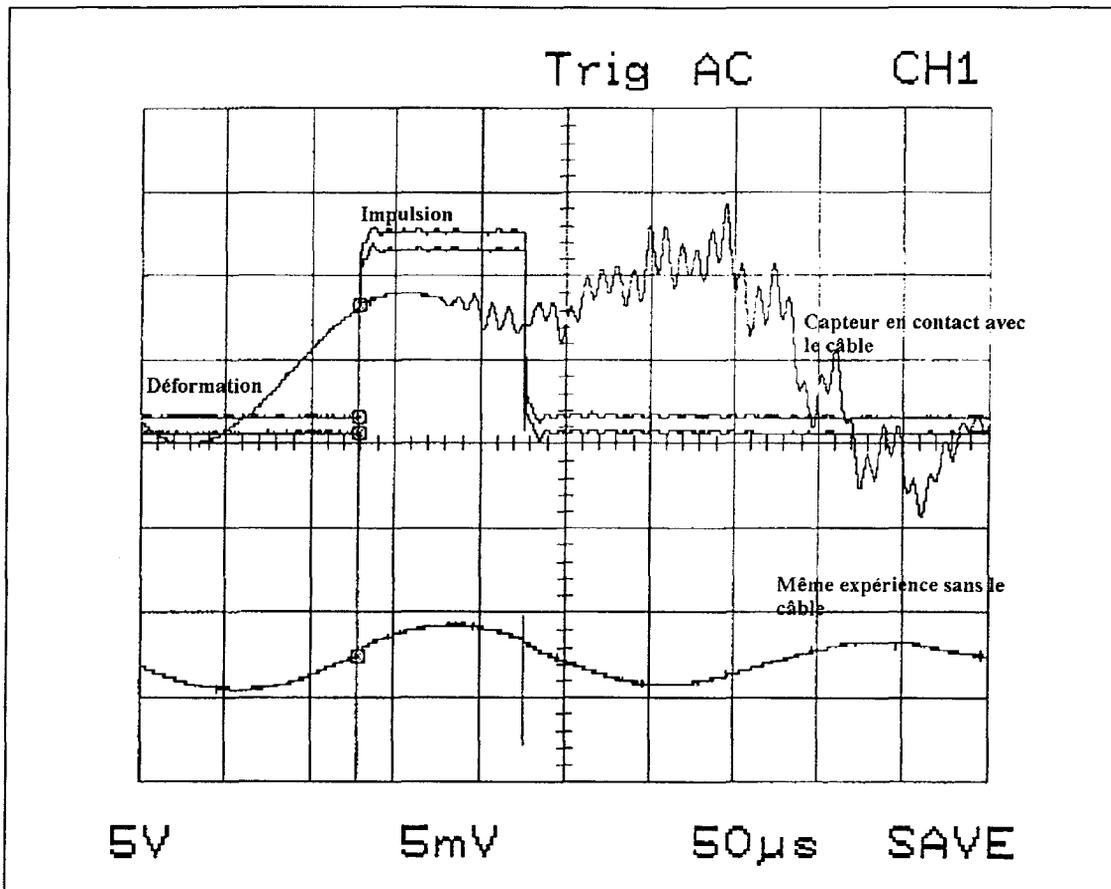
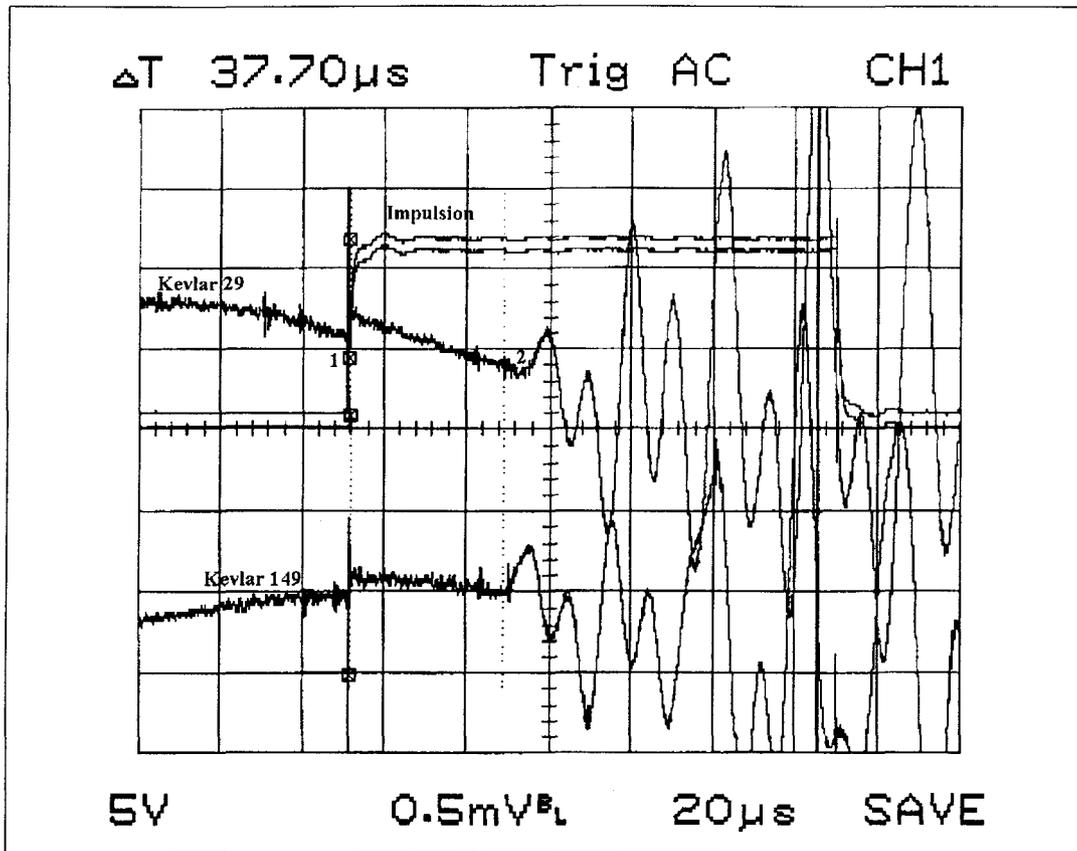


Figure V.5.1: Réponses à l'impulsion du capteur récepteur dans l'air et pour un câble.

On relève les signaux du Kevlar 29 et du Kevlar 149 sur le même graphe (Graphe V.5.2).



Graphe V.5.2: Réponses à l'impulsion du capteur récepteur pour le kevlar 29 et Kevlar 149.

On remarque que les temps de propagation sont différents, ceux du Kevlar 149 sont plus faibles (valeurs résumées tableau V.5.2.1).

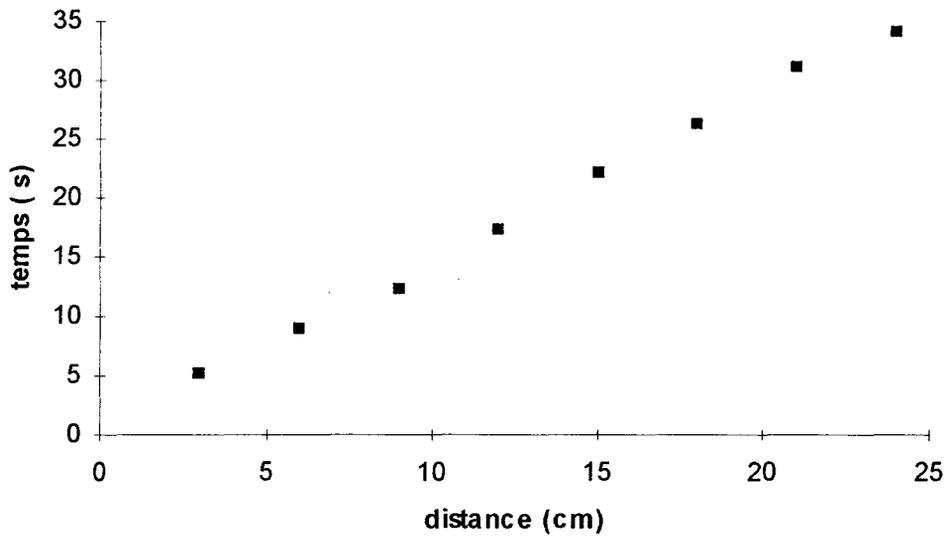
V.5.1-Technique de mesure du temps de parcours:

Pour mesurer ce temps il faut nécessairement deux repères:

Premier repère: montée du pulse d'entrée [(1) graphe ci-dessus].

Deuxième repère: Déformation du signal du capteur récepteur (2). Celle-ci n'étant pas très nette, il faut vérifier que le premier pic noté est bien le premier pic de réponse à l'impulsion. On mesure donc le temps de parcours pour différents pics observés à différentes distances entre les capteurs piézo-électriques.

On trace le temps de parcours en fonction de la distance entre les capteurs:



Courbe V.5.1.1.: Temps de parcours en fonction de la distance entre les capteurs.

Par extrapolation, on constate que pour une distance nulle le temps est quasi nul, il s'agit donc de la première réponse à l'impulsion.

V.5.2-Mesures.

On effectue les mesures des temps de parcours dans les câbles en Kevlar 29, et 149 (tresse huit fuseaux) ainsi que dans une tresse douze fuseaux en Technora. La distance entre les capteurs est de 24 cm (en vérifiant que la lecture est bien celle de la première déformation).

On calcule ensuite la vitesse de propagation, puis le module à partir de l'équation $V^2 = E / \rho$. On effectue pour chaque câble dix essais. On détermine également les modules à partir des courbes de traction obtenues à l'aide de la machine ZWICK 1456, ces modules sont déterminés pour une force de 196 N correspondant à la charge appliquée au câble lors des essais de propagation (trois essais sont réalisés par câble).

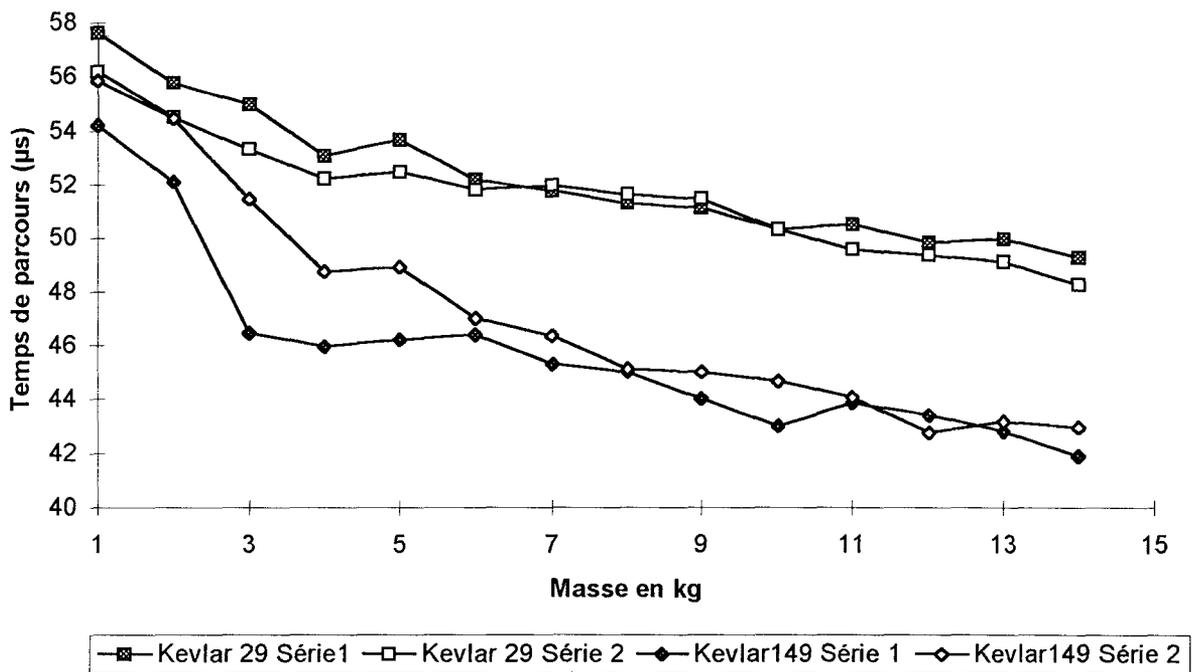
Tableau V.5.2.1:

	KEVLAR 29	KEVLAR 149	TECHNORA
Masse volumique en g/cm ³	1,44	1,47	1,39
Module obtenu à la traction (GPa)	33,2 ± 2,5	77,5 ± 2,5	59,4 ± 2,5
Temps en µs	42,25 ± 0,4	36,78 ± 0,27	36,6 ± 0,3
Module calculé en (GPa)	46,4 ± 0,8	62,6 ± 0,9	59,8 ± 0,8
Vitesse de propagation m/s	5 680 ± 77	6 525 ± 75	6 557 ± 80

On remarque que le module sonique pour le Kevlar 29 est plus élevé que le module obtenu en traction, tandis que pour le Kevlar 149 on a l'inverse. Malgré la différence entre les modules soniques et ceux obtenus en traction, on trouve la valeur du module sonique du Kevlar 29 plus faible que celle du Kevlar 149, et la différence entre ces deux valeurs reste considérable. On peut donc faire une distinction entre les deux câbles en Kevlar 29 et 149. En ce qui concerne le Technora les modules obtenus par les deux méthodes sont quasiment identiques, on envisage donc des essais sur des câbles fatigués. Mais avant cela vérifions si la tension appliquée au câble a une influence sur les mesures.

V.5.3- Influence de la tension des câbles.

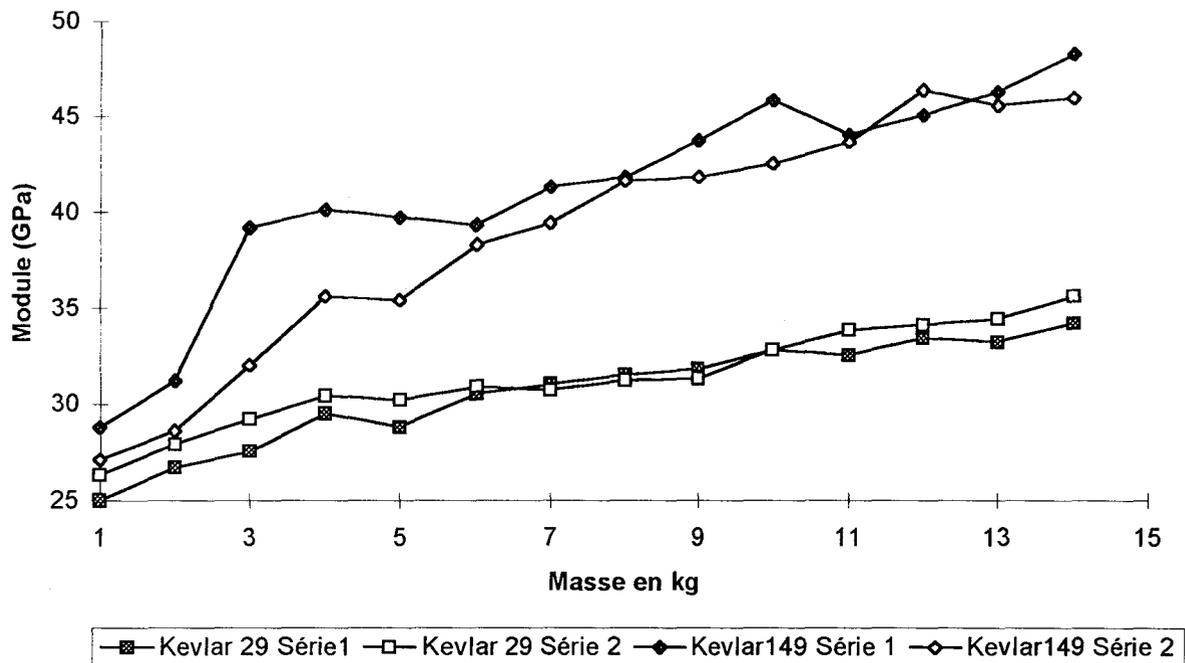
On effectue deux séries de mesures de temps à différentes tensions appliquées aux câbles de Kevlar 29 et Kevlar149, les résultats sont représentés par le graphe V.5.3.1.



Graphe V.5.3.1: Temps de parcours en fonction de la tension appliquée.

On constate que pour une tension faible, les temps mesurés sont proches pour le Kevlar 29 et 149, par contre pour des tensions plus importantes on peut distinguer les deux Kevlar, on constate également que le temps tend vers une valeur limite.

A partir de cette courbe nous traçons le module de chaque Kevlar en fonction de la tension appliquée (graphe V.5.3.2).



Graphe V.5.3.2: Module en fonction de la tension appliquée aux câbles de Kevlar.

On remarque que le module augmente avec la tension appliquée au câble, plus celle-ci est importante et mieux on distingue les deux Kevlar. D'où l'intérêt de conserver la tension précédemment appliquée soit 20 kg.

V.5.4- Capteur sans couverture.

Pour corriger le temps de réponse du capteur, on place les lames piézo-électriques directement en contact sur le câble, on retire la coque plastique de protection. On mesure pour le Kevlar 29 sous une tension de 20 kg, un temps d'environ 34 μ s, pour une distance entre les capteurs de 24 cm. On a donc une différence de 6 μ s par rapport aux capteurs avec couverture plastique.

Sur chaque capteur la couverture de protection de celui-ci implique une distance d'environ 1 mm entre la corde et les lames piézo-électriques.

Or 6 μ s à la vitesse de 340 m/s (vitesse dans l'air) correspondent à environ 2mm. Il semblerait que l'on puisse corriger l'erreur due à la couverture de protection des capteurs par cette méthode.

Nous avons vérifié si cette technique de mesure de module était adaptée à nos câbles. Nous en sommes satisfaits, nous avons donc envisagé d'approfondir nos essais sur des câbles de construction et de nature différentes. Nous comparerons les modules obtenus en traction avec ceux obtenus à partir de la vitesse de propagation, et ceci à différents états de fatigue des câbles.

V.6- Mesure du module sonique sur des câbles de construction et de nature différentes.

V.6.1- Essais

Tous les câbles ont été fatigués sur des poulies en aluminium (cf.Chapitre III).

Les essais ont été réalisés:

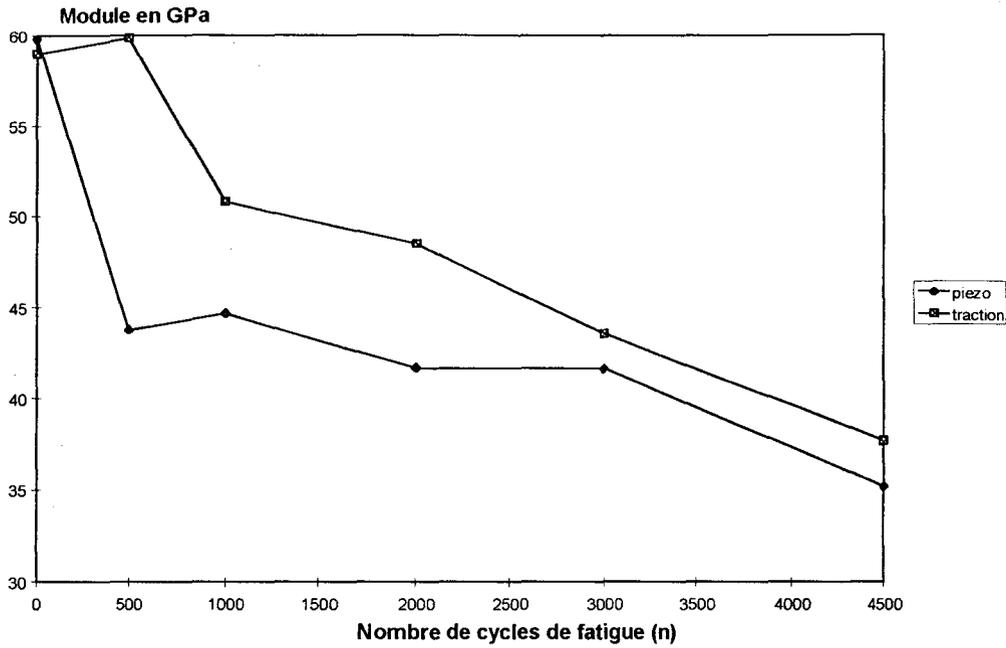
- sur la tresse en Technora sans couverture fatiguée sous une charge de 30 kg, sur trois poulies de diamètre 30 mm (6 flexions simples par cycle),
- sur le câble en Technora de type A fatigué sous une charge de 30 kg, sur trois poulies de diamètre 30 mm,
- sur le câble de Kevlar 49 de type A fatigué sous charge de 25 kg, sur trois poulies de diamètre 60 mm (cf.Chapitre III).

Les câbles sont maintenus tendus sous une charge de 20 kg, on relève le temps de propagation entre les deux capteurs, en faisant varier la distance entre ces derniers.

V.6.2-Résultats et discussion.

Pour la tresse sans couverture:

Si l'on compare l'allure des courbes des modules obtenus à partir de la courbe de traction pour une charge de 20 kg, et ceux obtenus à l'aide des capteurs piézo-électriques en fonction du nombre de cycles de fatigue (n): mis à part la valeur obtenue pour 500 cycles l'allure des courbes est très proche. Les modules en traction sont légèrement plus importants.

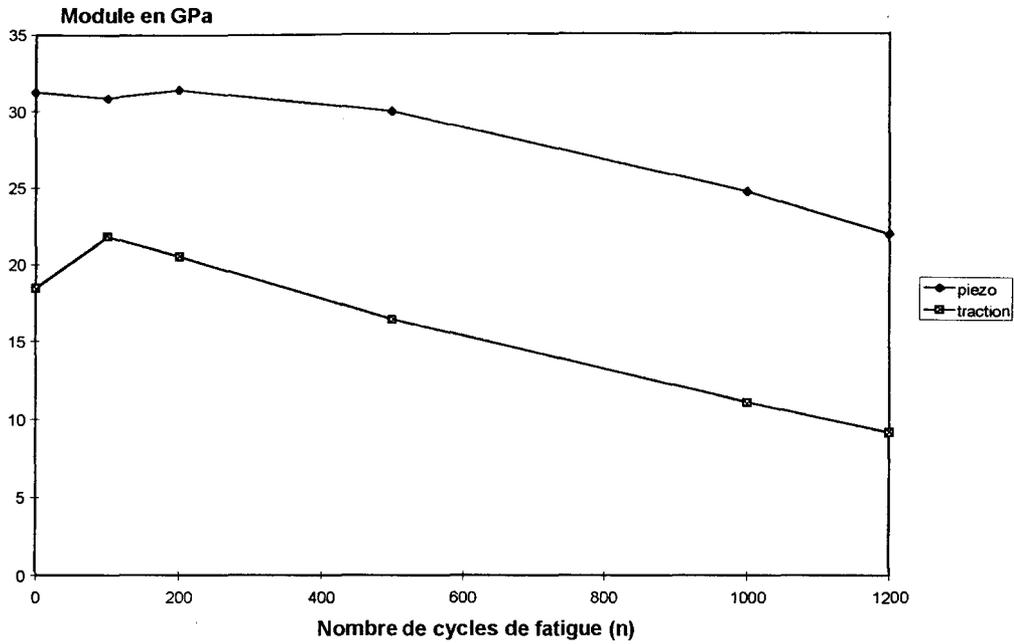


Grphe V.6.2.1: Comparaison des modules en traction et ceux obtenus à l'aide des capteurs piézo-électriques pour la tresse sans couverture.

Nous pouvons donc dire que le comportement en fatigue des deux modules de la tresse est quasi identique.

Pour le câble de Technora de type A:

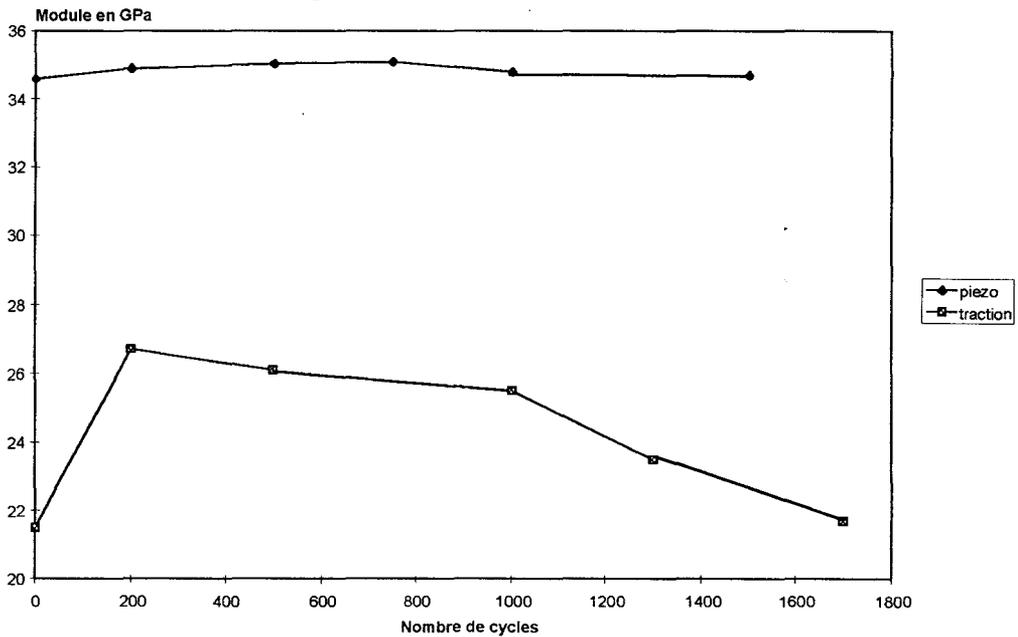
On a une même allure des courbes des modules obtenus en traction et ceux obtenus par l'intermédiaire des capteurs en fonction de la fatigue, mis à part les valeurs à $n=100$ cycles. Contrairement à la remarque faite pour la tresse, les valeurs des modules en traction sont plus faibles que ceux obtenus à partir des capteurs, cette différence est sans doute due à la construction des câbles.



Graphe V.6.2.2: Comparaison des modules en traction et ceux obtenus à l'aide des capteurs piézo-électriques pour le câble de type A en Technora.

Pour le câble en Kevlar 49 de type A:

Les allures des courbes sont très différentes. Pour les modules obtenus à partir de la traction, on a une décroissance progressive avec la fatigue après 200 cycles. En ce qui concerne les modules obtenus à l'aide des piézo-électriques, on a une très faible variation des modules. Les modules soniques sont supérieurs aux modules obtenus en traction.



Graphe V.6.2.3: Comparaison des modules en traction et ceux obtenus grâce aux capteurs piézo-électriques pour le câble de type A en Kevlar 49.

Nous pouvons dire que quelles que soient la construction et la nature des câbles, le module obtenu en traction commence par augmenter, puis par diminuer avec la fatigue (cf. Chapitre III p.81).

Pour les câbles en Technora (tressé et de type A), on constate une diminution immédiate du module sonique avec la fatigue, tandis que pour le câble en Kevlar 49 de type A, on a tout d'abord une légère augmentation. En ce qui concerne l'influence de la construction, on constate que l'on a des modules en traction supérieurs aux modules soniques pour la tresse, contrairement aux câbles de construction de type A.

V.7-Conclusions.

On remarque que les valeurs de module obtenues sur machine de traction pour le Kevlar 29 et 149 et sur le banc sont du même ordre de grandeur. Les essais sur le Technora sont plus convainquants, les valeurs obtenues sont très proches (tableau V.5.2.1).

En ce qui concerne la comparaison du comportement du module sonique et celui obtenu en traction, en fonction de la fatigue: on constate une influence de la nature et de la construction des câbles. En effet lorsque les câbles sont en Technora, le module sonique diminue avec la fatigue, tandis que pour le câble en Kevlar, il augmente légèrement avec celle-ci. En ce qui concerne la construction, lorsque celle-ci est tressée les modules soniques sont inférieurs à ceux obtenus en traction, contrairement aux constructions de type A.

Le comportement en fatigue, des modules soniques et celui des modules obtenus en traction, est voisin pour les câbles en Technora. Nous pouvons donc envisager un contrôle non destructif des câbles en Technora, par la technique de mesure de la vitesse de propagation longitudinale. Pour les câbles en Kevlar, il faut envisager un autre mode de mesure plus adéquat.

Des mesures ont également été faites sur des câbles en Technora avec une couverture. Le temps de parcours moyen pour une distance de 24 cm entre les capteurs, est de 56 μ s. Ce temps est très important et conduit à un module faible de 25,5 GPa par rapport à celui obtenu à partir de la courbe de traction qui est de 58 GPa (pour une même tension 20 kg).

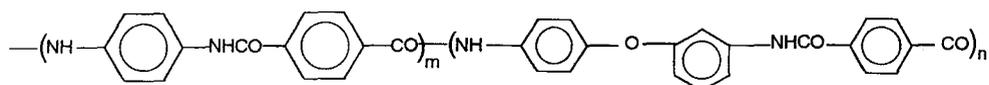
On peut faire l'hypothèse que la couverture influe sur les résultats obtenus, les capteurs étant en contact avec celle-ci. Il faudrait envisager des ondes susceptibles de traverser la couverture du câble.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

La fibre de Technora utilisée dans ce travail est encore très peu étudiée dans la littérature. Les études effectuées dans le chapitre I, ont permis de consolider notre connaissance sur la fibre d'un point de vue structure, comportement thermique et morphologie.

L'étude en Résonance Magnétique Nucléaire du Carbone 13 (RMN) de la fibre de Technora, a permis de déterminer le rapport des pourcentages des deux molécules de bases, soit $m/n \approx 2,1$ avec $n=32\%$ ($m+n=100$).



L'analyse morphologique a été complétée par une étude aux rayons X, qui a permis de mettre en évidence, un moyen de détermination de la température de transition vitreuse du Technora. En traçant la largeur à mi-hauteur des pics obtenus en fonction de la température, on obtient une droite qui est respectée jusqu'à la température de 320 °C, température que nous attribuons à la transition vitreuse. La température de décomposition du Technora soit 508°C, a été déterminée par microcalorimétrie différentielle à balayage.

L'étude en DMTA, a montré que la fibre de Technora conserve ses qualités à des températures élevées, grâce à sa température de transition vitreuse élevée.

Les analyses morphologiques de la fibre au MEB et AFM, ont mis en évidence la présence de fibrilles parallèles entre elles et d'orientation identique à celle de la fibre, ces fibrilles ont un diamètre de 120 nm. Cette structure fibrillaire peut être expliquée par le fait que les fibres de Technora ont subi un étirage important, ce qui développe une grande orientation de la structure.

Deux types de rupture en traction ont été observés, une en fuseau et l'autre très fibrillée, cette différence vient de l'état de la fibre dû soit à une imperfection en surface, soit à une faible cohésion transversale des fibrilles.

Propriétés mécaniques:

En Traction: On a constaté que le module d'élasticité augmentait lors des essais de traction pour le Technora ainsi que pour le Kevlar 29, dû à un alignement des chaînes, des cristallites et des feuilletts plissés. La courbe de traction du technora et du kevlar 29 résulte de deux phénomènes, un réversible et l'autre non. L'irréversibilité est également montrée en faisant des cycles de chargement en traction, on constate que le module augmente après le premier cycle et ne revient pas à sa position initiale.

Influence de la vitesse de déformation en traction: celle-ci influe peu sur le monofilament lorsqu'elle est faible. Quand elle est plus importante, on a tout comme pour les câbles une augmentation de la force et de l'allongement à la rupture.

La loi de Weibull est vérifiée pour les monofilaments de Technora et de Kevlar.

Fluage: Le Technora et le Kevlar suivent une loi logarithmique en fonction du temps. Il a été mis en évidence que le Kevlar flue plus que le Technora, bien que celui-ci possède un groupement éther qui apporte de la souplesse à la fibre. Dans le Kevlar c'est la rotation avec glissement des cristallites qui est le facteur prédominant dans le fluage. Dans le cas du Technora, c'est plutôt l'alignement des zones interfibrillaires qui intervient d'où une variation moindre, du fait des interactions latérales dues aux liaisons hydrogène, plus importantes pour le Technora que pour le Kevlar.

Relaxation: Les monofilaments de Technora et de Kevlar 29 suivent une équation de relaxation du même type $F(t) = a + b \cdot \exp(-t^c)$.

Fatigue monofilamentaire: Les essais de fatigue sur monofilaments ont permis de différencier le comportement du Kevlar 29 et du Technora. En augmentant les cycles de fatigue, on constate que les modules à l'origine et près de la rupture pour le Technora évoluent très peu. Tandis que pour le Kevlar, on a l'apparition d'un troisième module.

Fatigue par flexion:

Influence de la fatigue sur les modules des câbles de Technora: lors des essais de traction, on a détecté deux modules, un à l'origine et l'autre près de la rupture. Avec la fatigue le module près de l'origine augmente, tandis que celui près de la rupture diminue. Nous retrouvons lors des essais de fatigue le même phénomène qu'en traction, c'est-à-dire un alignement des cristallites, conduisant à une rigidité du câble: ceci est traduit par l'augmentation du module à l'origine. Après un certain nombre de cycles de fatigue, les deux modules se rejoignent pour ne faire plus qu'un, puis celui-ci diminue et finit par se stabiliser avec la fatigue, avant la rupture.

Influence de la couverture du câble: La couverture a peu d'influence sur le module en traction, par contre la force résiduelle et l'allongement diminuent. Cette diminution est d'autant plus importante que la couverture est fusionnée. L'abrasion s'effectue entre les brins et entre la couverture et l'âme. La couverture fusionnée étant très rigide celle-ci provoque plus de dommages, d'où une fatigue plus importante et une chute de la force résiduelle. Le câble sans couverture est moins détérioré.

Influence de la construction: Après 700 cycles de fatigue, on a l'ordre suivant pour la perte en résistance des câbles suivant leur construction:

Parallèle > Câblée ≥ Tressée > Moulinée

Le câble à âme moulinée ne présente pas d'abrasion interne, contrairement aux autres constructions. Ceci est dû à son faible angle de torsion par rapport à l'âme tressée et

câblée, en ce qui concerne la résistance de l'âme parallèle qui est la plus faible ceci est due à sa faible cohésion entre les monofilaments.

La perte en module se comporte de la même façon que celle en résistance:
Parallèle > Câblée ≥ Tressée > moulinée

En ce qui concerne l'allure des courbes représentant la force résiduelle (F_r) en fonction de la fatigue, celle du câble à âme moulinée se distingue de celle des autres. La diminution de la force résiduelle en fonction de la fatigue est moins importante que celle des autres constructions, sa durée de vie étant la plus importante, elle est suivie de celle du câble à âme tressée et câblée, celle du câble à âme parallèle étant la plus faible.

La force résiduelle (F_r) et le module (E) en traction se comportent de la même façon avec la fatigue. On aboutit même à une relation entre ces deux paramètres, quelle que soit la construction du câble. On a une droite $E=f(F_r)$ dans le domaine d'utilisation du câble. On pourrait utiliser ces droites comme contrôle des câbles, puisque celles-ci ne sont plus respectées quand le câble est dans un état critique.

Les essais de fatigue sur plusieurs poulies, ont montré qu'il était peu recommandé de placer une quantité excessive de poulies les unes à la suite des autres. Il est souhaitable d'espacer celles-ci, pour éviter une perte en résistance trop rapide.

Suite à différentes idées possibles, en ce qui concerne le critère de dépose des câbles textiles, une seule est retenue. Constatant que le module variait avec l'usure, on a donc décidé de se pencher sur cette donnée. On a donc recherché une relation mesurable faisant intervenir le module.

La vitesse de propagation longitudinale d'une onde est liée au module par la relation $V^2=E/\rho$ où E est le module et ρ la masse volumique. Nous avons donc mesuré ce module dit sonique, pour trois câbles différents en construction, et en nature (Technora et Kevlar). Nous avons comparé les modules soniques avec ceux obtenus en traction. Le comportement de ces deux modules avec la fatigue étant voisin pour le Technora, un contrôle non destructif de ce type peut être appliqué aux câbles de Technora.

ANNEXES

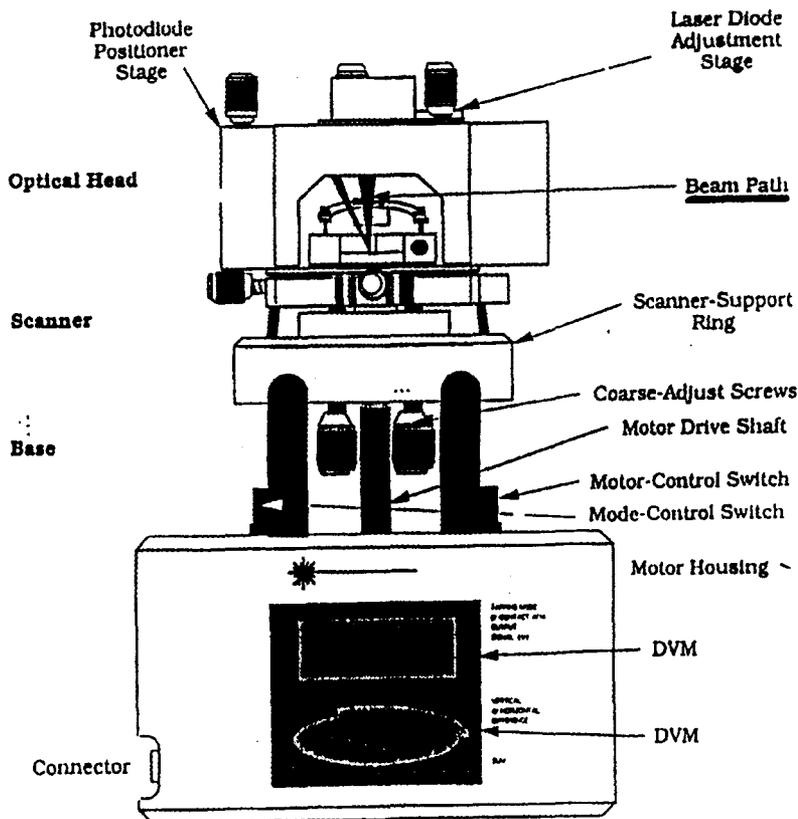
ANNEXE 1.

MICROSCOPE A FORCE ATOMIQUE

Le microscope à force atomique (figure 1), est un microscope à sonde locale inventé en 1986 par G.BINNIG, C.F.QUATE et Ch.GERBER, il est le dérivé du microscope à Effet Tunnel (1982) qui est basé sur la transition électronique à travers des fines barrières de potentiel. Le microscope à force atomique contrairement à ce dernier ne nécessite pas de préparation de l'échantillon (pas de métallisation par exemple), il n'a pas besoin d'être conducteur.

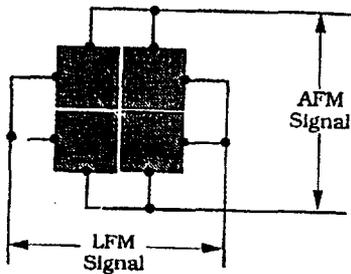
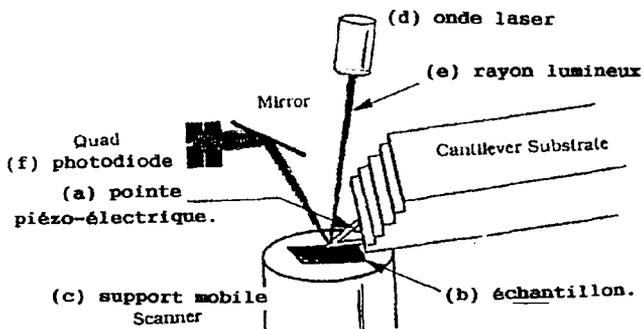
La microscopie à force atomique est basée sur les forces inter atomiques, elle permet de réaliser des images topographiques de matériaux très variés. Les observations peuvent être faites dans des environnements variés (ultravide, air, huile, eau).

Figure 1: Microscope à force atomique.



PRINCIPE (figure 2) :

Le microscope est constitué d'une pointe en céramique piézo-électrique (a), celle-ci repose sur l'échantillon (b) qui est placé sur un support mobile (c), cette pointe possède une faible sensibilité de déplacement, une onde laser (d) projette un rayon lumineux (e) sur la pointe piézo-électrique, le rayon est réfléchi et envoyé sur une photodiode (f), le centre de celle-ci correspond à l'origine du déplacement. Si l'échantillon possède une bosse en surface, la pointe piézo-électrique va donc être déviée vers le haut, et dévier le rayon lumineux dans la partie supérieure de la photodiode, celle-ci va commander le déplacement de l'échantillon vers le bas de telle sorte à replacer le rayon lumineux en son centre. Et inversement si le cas opposé se présente. Le déplacement de l'échantillon va donner l'allure de sa surface. Le microscope à force atomique fonctionne comme dans le cas d'un rugosimètre.

**Arrangement des photodétecteurs****Figure 2: Chemin du laser de la diode à la photodiode.**

Le microscope à force atomique peut être utilisé suivant trois modes:

- le mode contact (le plus utilisé)
- le mode non contact (mesure des variations des forces de Van Der Waals).
- le mode résonnant (la pointe vibre et vient toucher par à-coups l'échantillon)

ANNEXE 2.

ANALYSE ENTHALPIQUE DIFFERENTIELLE.

I- Généralités.

Née dans la première moitié du siècle, l'analyse thermique ou plutôt les analyses thermiques ont connu depuis des développements importants. Elles ont pour objet la caractérisation des produits ou des matériaux par étude de changement d'état ou de propriétés en fonction de la température. Tout matériau solide ou liquide subit des transformations lorsqu'il est soumis à un programme thermique. La transformation est perceptible sur diverses propriétés.

II- But

Tout matériau soumis à un programme thermique, subit des transformations qui absorbent ou libèrent de l'énergie. Autrement dit, toute transformation est liée à une variation d'enthalpie que l'on peut mesurer par calorimétrie.

Par cette méthode, on peut ainsi déterminer l'enthalpie, la température de fusion et les températures de transition vitreuse de l'échantillon.

III- Principe

On dispose d'un appareil à compensation de puissance. L'appareil est étalonné à l'aide de produits connus. Il possède deux plateaux, l'un pour l'échantillon et l'autre pour la référence. Les plateaux sont maintenus à la même température T_p . Au cours de l'échauffement, on mesure à chaque instant la puissance électrique fournie à l'un ou l'autre des plateaux pour réaliser cette identité de température.

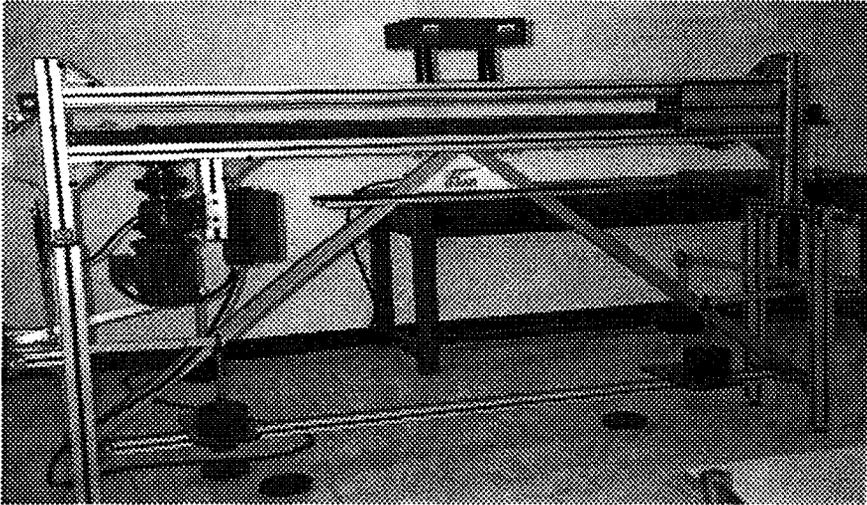
On enregistre une courbe du type:

$$dq/dt = f(t)$$

dq/dt étant la différence des quantités de chaleur apportées à chaque cellule.

ANNEXE 3.

MACHINE DE FATIGUE

I. Machine.II-Paramètres.-Nombre de câble par essai:

de 1 à 4

-Tension par câble:

Masse additionnelle de 1 kg	0	1	2	3	4	5	6	7
Tension massique en kg	5	10	15	20	25	30	35	40
Force en N	49,05	98,1	141,1	196,2	245,2	294,3	343,3	392,4

- Les masses additionnelles sont celles posées sur les plateaux, elles peuvent être fractionnées si nécessaire en se procurant des disques de 0,5kg.

- La tension ou la force est celle appliquée au câble.
- Sans masse additionnelle, la tension a été tarée afin que l'incrémentation soit constante.

- Longueur de sollicitation de l'éprouvette: . 1 200 mm

remarque: - si le nombre de poulies est faible, cette longueur augmente légèrement (cf .schéma chariot).

- cette longueur est celle garantie par la construction.

- Allongement permis de l'éprouvette : sans limite.

- Vitesse de l'essai:

Les valeurs sont celles obtenues pour quatre câbles par expérience. Ces vitesses ont été déterminées aux charges maximales et minimales afin de vérifier la stabilité des vitesses de la machine.

***Vitesse de déplacement du chariot en mm/s:**

	Masse additionnelle en kg		Vitesse moyenne
	0	7	
Pour 3 poulies	60,4	60,4	60,4
Pour 5 poulies	60,4	59,75	60,2

***Vitesse de cyclage en s/cycle:**

Cette vitesse correspond au temps de déplacement du chariot de l'une des extrémités à l'autre. ($\alpha=1$ cf.IV)

	Masse additionnelle en kg		Vitesse moyenne
	0	7	
Pour 3 poulies	4,2	4,2	4,2
Pour 5 poulies	4,2	4,3	4,25

La vitesse d'essai avec trois ou cinq poulies est inchangée. La vitesse est constante quel que soit le mode d'essai et la charge appliquée (erreur inférieure à ± 1 %).

remarque:

Il n'existe pas de relation simple entre ces deux vitesses du fait de l'accélération et de la décélération du chariot à chaque extrémité.

III- Enregistrement:

4 enregistrements indépendants.

- Détection de rupture d'un câble:

En cas de rupture d'un câble l'arrêt immédiat de la machine se produit. Chacun des 4 capteurs totalise le nombre de cycles entiers déjà effectués pour chacun des câbles. Après changement du câble rompu et remise à zéro de son compteur l'essai peut être relancé.

- Arrêt sur programmation:

Affichage sur le compteur du nombre de cycles souhaité, cette valeur atteinte, la machine s'arrête. Après changement du câble et remise à zéro de son compteur l'essai peut être relancé.

remarque: la fonction de programmation inclut bien sûr la détection de rupture même si le nombre de cycles n'est pas atteint.

IV- Définition d'un cycle.- un cycle correspond à une longueur de déplacement du chariot,

Le nombre de cycle maximum programmable est 9 999 cycles.

- augmentation de la capacité du compteur:

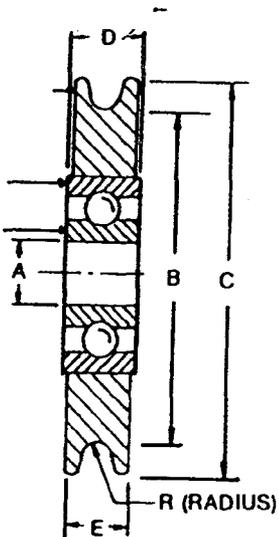
Un coefficient de conversion α peut être affecté au compteur. Sa valeur peut être choisie entre 0,0001 et 1,0000. Un cycle (soit une incrémentation du compteur) est alors égal à $\alpha' = 1/\alpha$ passages de chariot.

Exemple: si $\alpha=0,1$ on aura une incrémentation du compteur après 10 passages de chariot.

remarque: une casse est alors moins bien définie, elle aura une précision de $\pm \alpha'/2$ du nombre de passages du chariot. Sur l'exemple précédant si l'on a une rupture à 4 732 cycles, avec $\alpha'=10$ on aura donc une précision sur le nombre de passages de: $(4\ 732 * \alpha')+(\alpha'/2)=47\ 325 \pm 5$.

V.2-Poulies disponibles.

Poulies en aluminium avec roulement à billes industriel:



$$A = 8,00 \pm 0,01 \text{ mm}$$

$$B = 27,0 + 0,38 \text{ mm}$$

$$C = 32,0 + 0,38 \text{ mm}$$

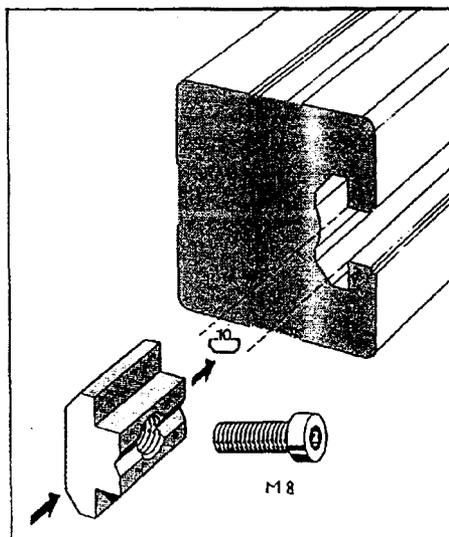
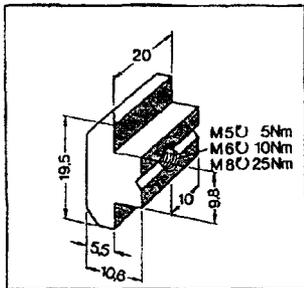
$$D = 6,4 + 0,25 \text{ mm}$$

$$E = 5,6 \pm 0,13 \text{ mm}$$

$$R = 0,9 \text{ mm}$$

V.3-Axe de montage.

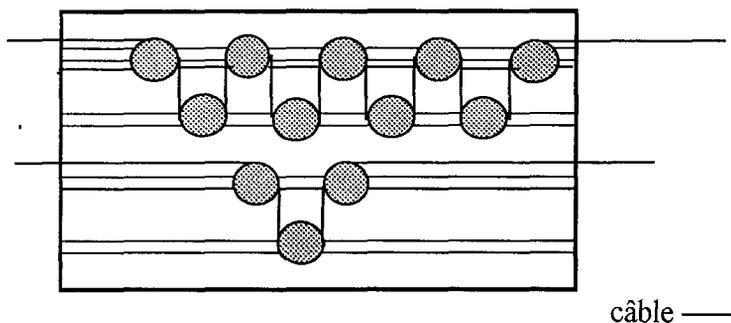
Les poulies sont fixées à l'aide du dispositif suivant:



V.4-Exemple d'utilisation possible du chariot.

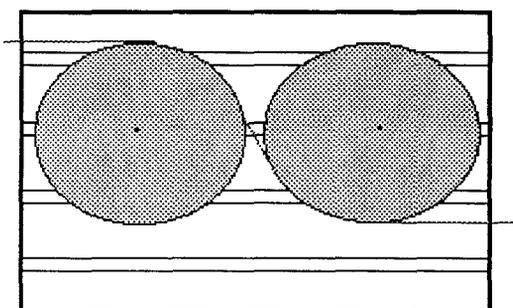
Le chariot est muni de quatre rainures pour positionner les poulies.

On peut disposer au minimum 3 et au maximum 9 poulies de diamètre d'enroulement 29 mm.

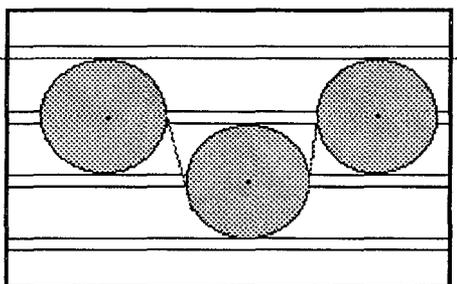


On peut déplacer les poulies, de façon à diminuer ou à augmenter l'angle d'enroulement.

Si l'on effectue une entrée et une sortie de câble à des hauteurs différentes, on peut disposer deux poulies de diamètre maximum 140 mm. Les positions des poulies sont limitées par le cache de protection du chariot.



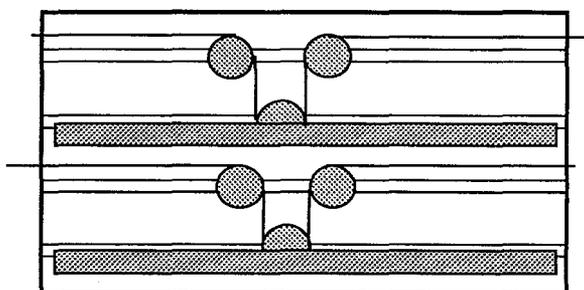
Sans modifier les hauteurs de sortie et d'entrée des câbles, on peut placer trois poulies de diamètre maximum 100 mm.



Plus le diamètre des poulies est petit, plus on dispose de place pour augmenter le nombre de poulies.

VI-Modification possible: essai en présence d'un liquide.

On fixe un petit bac rempli d'eau ou d'un autre liquide, au niveau de la poulie, de telle sorte que le câble soit immergé.



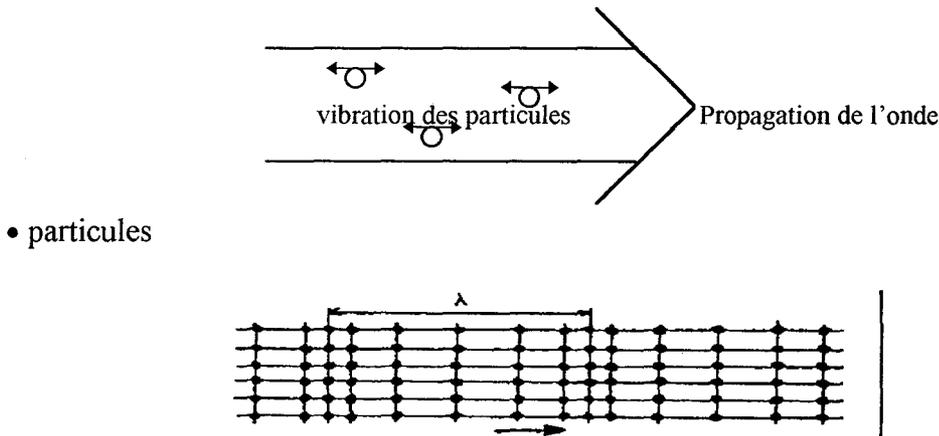
 bac à eau

ANNEXE 4.

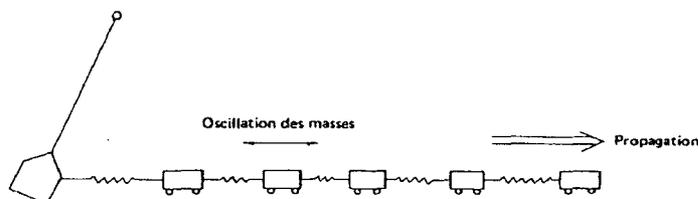
**COMPARAISON ENTRE UNE ONDE LONGITUDINALE ET
TRANSVERSALE (52, 53)**

I-Qu'est ce qu'une onde longitudinale et transversale?I.1-Ondes longitudinales:

Une onde est dite **longitudinale** ou de **compression** lorsque la direction de vibration des particules est parallèle à la direction de propagation de l'onde (fig.I.1.1).

Figure I.1.1: Onde longitudinale

L'émission et la propagation d'une onde longitudinale peuvent être schématisées par l'ensemble constitué par un pendule et des masses reliés entre eux par des ressorts (fig.I.1.2)

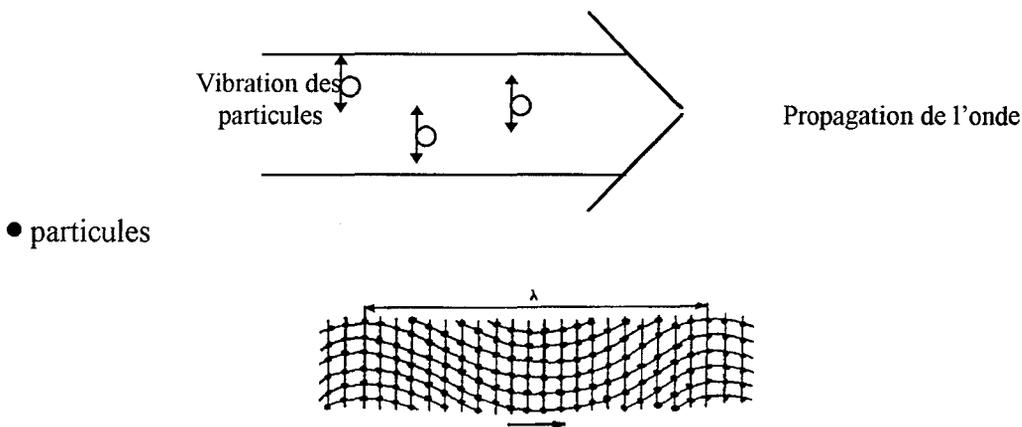
Figure I.1.2: Schématisation d'une onde longitudinale

I.2-Ondes transversales:

Une onde est dite **transversale** ou de **cisaillement** lorsque la direction de vibration des particules est perpendiculaire à la direction de propagation de l'onde (fig.I.2.1).

La propagation d'une onde transversale peut être schématisée par un ensemble de pendules de torsion reliés entre eux.

Figure I.2.1: Onde transversale



Les vibrations des particules se font perpendiculairement à la direction de propagation, c'est à dire dans un plan perpendiculaire à cette direction. Si ces vibrations se font indifféremment dans toutes les directions contenues dans ce plan, l'onde transversale est dite non polarisée (fig.I.2.2).

Par contre, si ces vibrations se font suivant une direction particulière contenue dans ce plan, l'onde transversale est dite polarisée (fig.I.2.3). Généralement en contrôle non destructif, les ondes transversales sont toujours polarisées à cause du procédé utilisé pour les générer.

Figure I.2.2: Schématisation d'une onde transversale

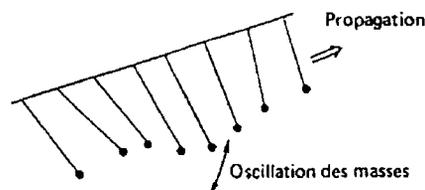
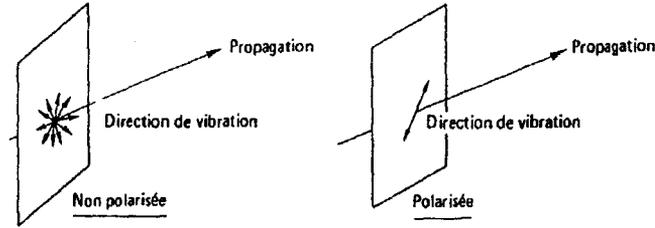


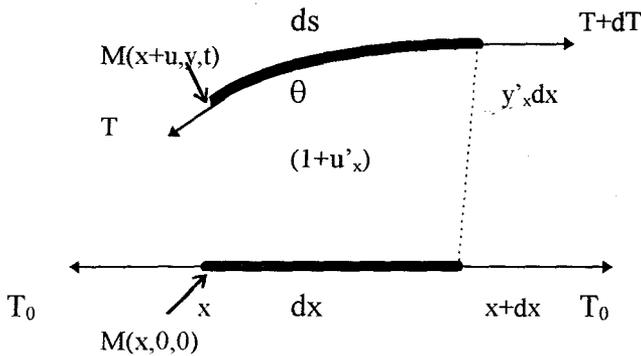
Figure I.2.3: Polarisation d'une onde transversale

II-Vitesses de propagation des ondes.

Les vitesses de propagation des ondes dépendent du mode de vibration des particules.

II.1-Variation de la tension d'une corde due à une déformation.

La détermination des vitesses de propagation se fera à l'aide d'un brin de corde (fig.II.1.1), nous supposons la corde excitée à la fois transversalement et longitudinalement. Etude de mouvements polarisés dans le plan (xOy) , il n'y a pas de mouvement selon Oz .

Figure II.1.1: Segment de corde au repos, et le même à l'instant t 

A chaque point de la corde en mouvement à l'instant t , initialement au repos en x sur ox , correspond:

- un déplacement transversal $y(x,t)$
- un déplacement longitudinal $u(x,t)$
- une abscisse curviligne $s(x,t)$
- une valeur de tension $T(x,t)$.

Ces valeurs sont fonction de x et de t . Les dérivées seront notées :

$$\begin{aligned} \delta y(x,t) / \delta x &= y'_x & \delta y(x,t) / \delta t &= y \\ \delta u(x,t) / \delta x &= u'_x & \delta u(x,t) / \delta t &= u \end{aligned}$$

Afin de décrire le mouvement transversal et longitudinal, il faut appliquer la loi fondamentale de la dynamique au brin de longueur ds , soumis aux deux forces tangentielles T et $T+dT$ faisant un angle θ avec l'axe Ox .

La longueur de l'élément ds s'exprime par la relation:

$$ds = dx [(1+u'_x)^2 + y'^2_x]^{1/2} \quad (1)$$

Au point initialement en x et à l'instant t , la tension est tangentielle à la corde; la tangente fait avec Ox un angle θ tel que:

$$\cos\theta = [1+u'_x] / [\delta s(x,t) / \delta x] \approx (1+u'_x) (1-u'_x - (1/2)y'^2_x) \quad (2)$$

$$\sin\theta = [y'_x] / [\delta s(x,t) / \delta x] \approx y'_x (1-u'_x - (1/2)y'^2_x) \quad (3)$$

Pour de petits déplacements et à un instant donné, la relation devient:

$$\delta s(x,t) / \delta x \approx 1+u'_x + (1/2)y'^2_x \quad (4)$$

Un petit morceau de corde de longueur ds est maintenant considéré. La variation relative de sa longueur, c'est à dire son allongement relatif, s'écrit:

$$(ds-dx)/dx \approx u'_x + (1/2) y'^2_x \quad (5)$$

Cet allongement introduit une variation de tension:

$$(\delta T(x,t)/\delta x) dx \approx E [\delta(u'_x + (1/2) y'^2_x)/\delta x] dx \quad (6)$$

Cette relation montre que la tension est proportionnelle à la variation relative de la longueur, le coefficient de proportionnalité étant E (module d'élasticité de la corde).

La tension de la corde s'écrit alors:

$$(7) \quad \boxed{T(x,t) \approx T_0 + E (u'_x + (1/2)y'^2_x)}$$

II.2-Détermination de la vitesse de l'onde transversale et longitudinale.

Pour cela le calcul de la force résultante sur le morceau de corde est nécessaire. La pente est croissante; à gauche la force est dirigée vers le bas; à droite elle est dirigée vers le haut, et elle a varié à la fois en intensité et en direction. La **composante transversale** de la force résultante (sens des y croissants) est donc à l'abscisse x et au temps t:

$$F_y(x,t) = -T\sin\theta + [T\sin\theta + [\delta(T\sin\theta)/\delta x]dx] = [\delta(T\sin\theta)/\delta x]dx \quad (8)$$

La **composante longitudinale** a pour expression:

$$F_x(x,t) = -T\cos\theta + [T\cos\theta + [\delta(T\cos\theta)/\delta x]dx] = [\delta(T\cos\theta)/\delta x]dx \quad (9)$$

Les angles θ sont considérés infiniment petits du premier ordre d'où:

$$F_y(x,t) \approx [[\delta\{T_0 y'_x + E y'_x(u'_x + (1/2)y'^2_x)\}]/\delta x]dx$$

$$F_x(x,t) \approx [[\delta\{T_0 + E(u'_x + (1/2)y'^2_x)\}]/\delta x]dx$$

Remarque: l'élasticité de la corde crée une force de rappel non linéaire.

La masse linéique de la corde ρ_L est introduite, et la seconde loi de Newton est appliquée:

$$\text{Force} = \text{Masse} * \text{Accélération}$$

$$\rho_L y \, dx \approx [\delta\{T_0 y'_x + E y'_x(u'_x + (1/2)y'^2_x)\}]/\delta x]dx$$

$$\rho_L u \, dx \approx [\delta\{T_0 + E(u'_x + (1/2)y'^2_x)\}]/\delta x]dx$$

-u: accélération longitudinale

-y: accélération transversale

Les équations obtenues sont non linéaires couplées. Nous allons voir quelles sont les conditions qui ramènent le système à un système linéaire. Les mouvements longitudinaux et transversaux excités sont supposés petits, tels que u'_x et y'_x soient des infiniment petits du premier ordre, et que $E u'_x$ reste petit devant la tension statique T_0 :

$$\rho_L y \, dx \approx [\delta(T_0 y'_x)/\delta x]dx$$

$$\rho_L u \, dx \approx [\delta(T_0 + E u'_x)/\delta x]dx$$

Par passage aux limites, les équations du mouvement deviennent:

$$y = C_t^2 y_x'' \text{ pour l'onde transversale}$$

$$u = C_l^2 u_x'' \text{ pour l'onde longitudinale}$$

avec les vitesses suivantes:

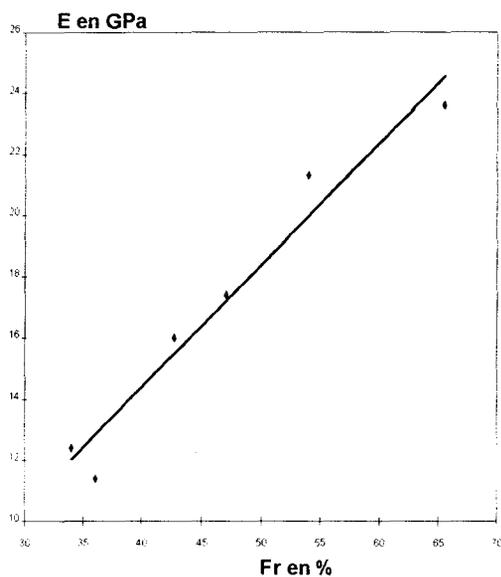
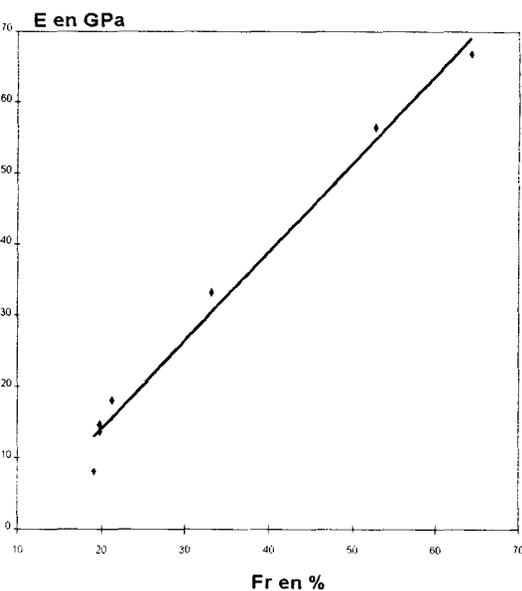
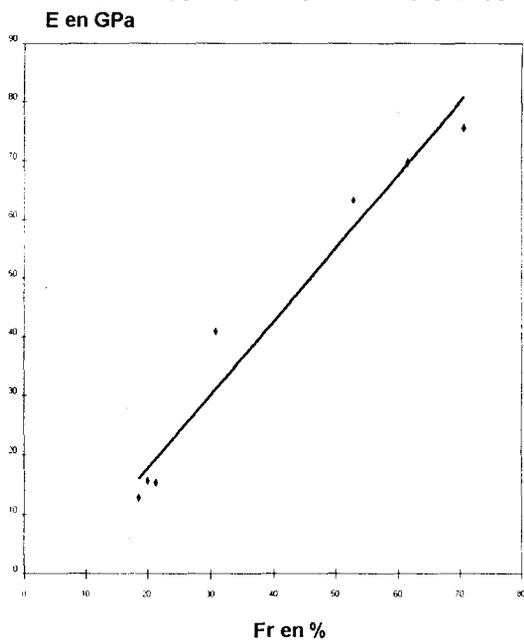
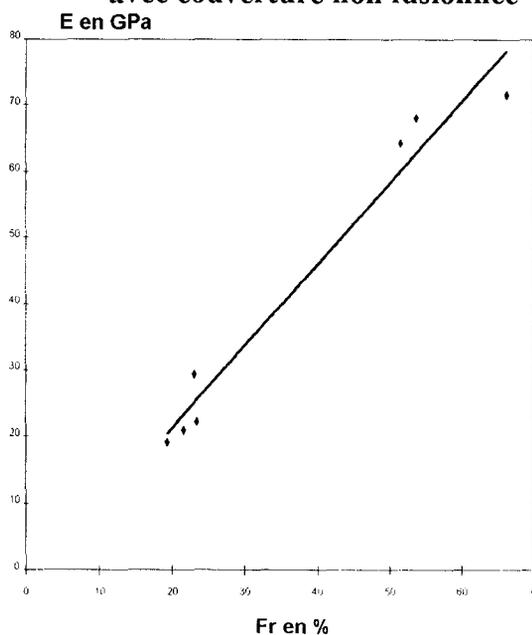
- C_t : vitesse de l'onde transversale
- C_l : vitesse de l'onde longitudinale

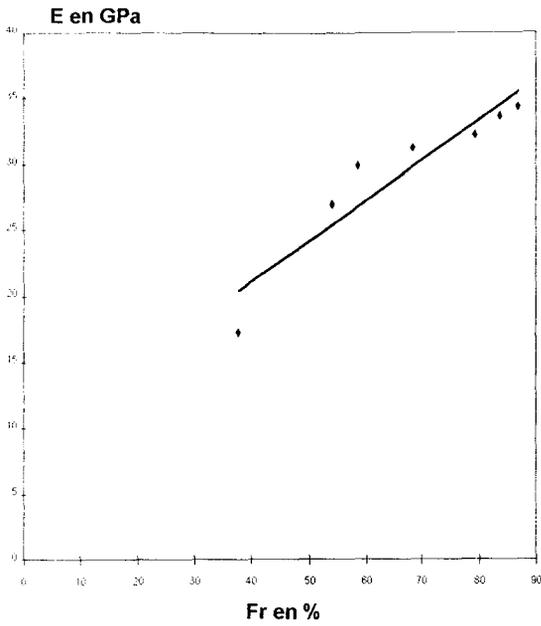
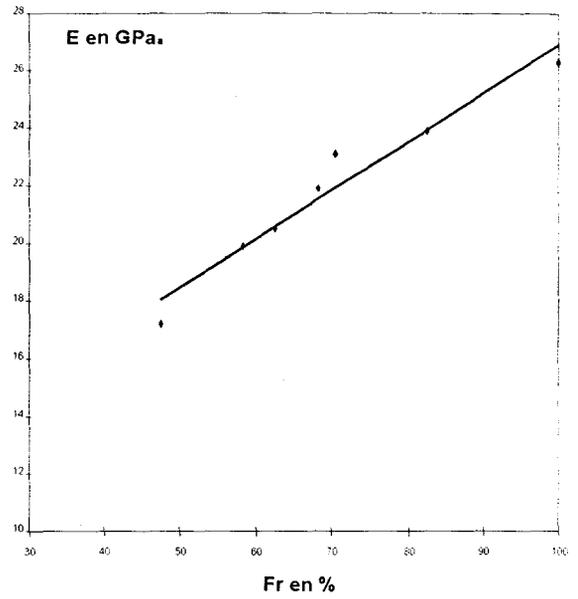
$$C_t^2 = T_0/\rho_L$$
$$C_l^2 = E/\rho_L$$

- T_0 : tension initiale de la corde.
- E : module d'élasticité.

Ces équations ont chacune pour solution une classe d'onde, appelés respectivement onde de cisaillement et onde de compression. Les équations sont indépendantes, les classes d'ondes sont découplés. Elles possèdent chacune leur vitesse de propagation C_t et C_l ; dans la pratique C_l est 25 à 30 fois supérieure à C_t .

ANNEXES 5.

E=f(Fr) POUR LES DIFFERENTES CONSTRUCTION DE CABLES**E=f(Fr) du câble en Technora de type A (diamètre de poulies 30 mm)****E=f(Fr) du câble à âme parallèle avec couverture non fusionnée****E=f(Fr) du câble à âme câblée avec couverture non fusionnée****E=f(Fr) du câble à âme tressée avec couverture non fusionnée**

**E=f(Fr) du câble en Kevlar 49 de
type A (diamètre de poulies 60 mm)****E=f(Fr) du câble en Technora de
type A (diamètre de poulies 60 mm)**

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

**REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES**

1. High Tenacity Aramid Fibre Technora, Technical Information TIE 05/89-11 TEIJIN LIMITED
2. **H.H YANG** : Aromatic High Strength. WILEY Interscience, 226-289 (1989).
3. **S. OZAWA** : A New Approach to High Modulus, High Tenacity Fibers. Polymer Journal, 19, n°1, 119-125 (1987).
4. **H. IMURO**. Proc. Int. Man-Made Fibers Conference, 24-28 (Sept. 1986).
5. **S. FRENKEL** : Structure and Properties of Highly Oriented Polymer Fibers. Journal of Polymer Science, Polymer Symposium, 58, 195-223 (1977).
6. **M. ARPIN, C. STRAZIELLE** : Characterisation and Conformation of Aromatic Polyamides in Sulfuric Acid. Polymer, 18, 591 (1977).
7. **PANAR, P. AVAKIAN** : Morphology of Poly(p-phenylene terephthalamide) Fibers. Journal of Polymer Science, Polymer Physics Edition, 21, 1955-1969 (1983).
8. **H.W. HILL, S.L. KWOLEK, and P.W. MORGAN**, U.S.Pat.3,006, 899 (1961)
9. **S.L. KWOLEK, P.W. MORGAN and W.R. SORENSON**, U.S.Pat.3, 966 (1962).
10. **H.S.MORGAN**, U.S.Pat.3,414, 645 (1968).
11. **N. MINEMURA, F. TAKABAYASHI and S. YAMADA**: U.S. Pat.4, 431, 066 (1986).
12. **Q.T. PHAM** CNRS SCA SOLAIZE. Communication personnelle.
13. **B.J. JUNGnickel** : Method for the Quantitative Characterization of the Supermolecular Structure of Highly Oriented Polymers. Journal of Polymer Science: Polymer Symposium, 58, 275-281 (1977).
14. **S.N. MAGONOV, K. QVARNSTROM, V. ELINGS, and H.J. CANTOW**: Atomic Force Microscopy on Polymers and Polymer Related Compounds. Polymer Bulletin, 25, 689-694 (1991).
15. **Hélène LAFITTE** : Caractérisation de la Fibre Aramide Kevlar 29, Etude du Comportement et des Propriétés Mécaniques en Tension et en Torsion. Thèse présentée à l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris (1981).
16. **L.KONOPASEK and J.W.S.HEARLE** : The Tensile Fatigue Behavior of para-oriented Aramid Fibers and their Fracture Morphology. Journal Applied Polymer Science, 21, 267 (1977).

17. **S.J. BAI** : Axial X-Ray Scattering on High-Performance Polymeric Fibers. *Journal of Polymer Science, Part.B, Polymer Physics*, 32, 2575-2583 (1994).
18. **K. TASHIRO, M. KOBAYASW, H. TADOKORO** : Elastic Moduli and Molecular Structures of Several Cristalline Polymers, Including Aromatic Polyamide. *Macromolecules*, 10, 413 (1977).
19. **M.G. NORTHOLT, J.J. VAN AARSTEN** : Chaine Orientation Distribution and Elastic Properties of Poly (p-phenylene terephthalamide) a Rigid Rod Polymer. *Journal Polymer Science Polymer Symposium*, 58, 283 (1977).
20. **Qiuchen ZHANG, Ying LIANG** : Partial Carbonization of Aramid Fibers. *Journal of Polymer Science. Part.B*, 32, 2207-2220 (1994).
21. **Roger J. MORGAN, Cesar O. PRUNEDA** : The Relationship Between the Physical Structure and the Microscopic Deformation and Failure Processes of Poly(p-phenylene terephthalamide) fibers. *Journal of Polymer Science, Polymer Physics Edition*, 21, 1757-1783 (1983).
22. **M.G. DOBB, D.J. JOHNSON, and B.P. SAVILLE** : Supramolecular Structure of High-Modulus Polyaromatic Fiber (Kevlar 49). *Journal of Polymer Science, Polymer Physics Edition*, 15, 2201-2211 (1977).
23. **R.H. ERICKSEN** : Creep of Aromatic Polyamide Fibres. *Polymer*, 26, 733-746 (1985).
24. **M.G. NORTHOLT** : Tensile Deformation of Poly(p-phenylene terephthalamide) Fibres, an experimental and theoritical analysis. *Polymer*, 21, 1199-1204 (1980).
25. **S.R. ALLEN and E.J. ROCHE** : Deformation Behaviour of Kevlar Aramid Fibres. *Polymer*, 30, 996-1003 (1989).
26. **Carla AHLSTROM**: Interface Fibre de Verre/Matrice polyepoxy. Introduction d'une interphase à propriétés contrôlées. Thèse présentée à l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (1991).
27. **J.W.S. HEARLE and M. KONOPASEK**: On Unified Approaches to Twisted Yarn Mechanics. *Applied Polymer Symposium*, 27, 253-273 (1975).
28. **JAMES L. WHITE, C.C. CHENG and Joseph E. SPRUIELL**: Some Aspects of the Mechanics of Continuous Filament Twisted Yarns and the Deformation of Fibers. *Applied Polymer Symposium*, 27, 275-294 (1975).
29. **Salah KACI** : Câble Composite pour la Précontrainte, Etude de la Relaxation. Thèse présentée à l'Université de Bordeaux I (1989).
30. **J.B. CONNAY** : Numerical Methods for Creep and Rupture Analysis, Cordon and Breach, New York (1967).
31. **M.G. NORTHOLT** : X Ray Diffraction Studies of Poly(p-phenylene terephthalamide) Fibres. *European Polymer Journal*, 10, 799 (1974).
32. **W.J. LYONS**: Fatigue in Textile Fibres: Part III. Fatiguing by Biaxial Rotation. *Textile Research Journal*, 32, 750-755 (1962)

33. **J.W.S. HEARLE, E.A. VAUGHN**: Fatigue Studies of Drawn and Undrawn Fibre Materials. *Rheo. Acta*, 9, 76 (1970).
34. **J.W.S. HEARLE**: Fatigue in Fibres and Plastics. *Journal of Materials Science*, 2, 474, (1967).
35. **P. MERCIER**: Fatigue par Flexion des Câbles Métalliques, Essais réalisés par CETIM. CETIM Informations n°88 (Dec. 1984).
36. **DUPONT** Genève : Fatigue par Traction-Traction. Procès verbal d'essai 1-07-87 (documentation Cousin Frères).
37. **M.J.N JACOBS** : Discarding Dyneema Ropes, Lay off Criterium Based on Ropes Elongation, *D.S.M High Performance Fibers*, 50-54.
38. **J.L. BEAUDOIN, E. MERIENNE** : A New Method for the Non-Invasive Characterisation of Thermally Thin and Layered Materials. *Quantitative Photothermal Imaging*, 11-18.
39. **C. VALETTE et C. CUESTA** : Mécanique de la Corde Vibrante. HERMES Traité des Nouvelles Technologies (série mécanique) (1993).
40. **B.D COLEMAN**. *Journal Polymer Science*, 20, 447 (1956).
41. **L.M Henrique DOS REIS and D. Michael McFARLAND** : On the Acousto-Ultrasonic Non-Destructif Evolution of Wire Rope Using the Stress Wave Factor. *British Journal of N.D.T*, 155-156 (May 1986).
42. **H. Williams JAMES, John HAINSWORTH, S.Lee SAMSON** : Acoustic-Ultrasonic Non-Destructive Evolution of Double-Braided Nylon Ropes Using the Stress Wave Factor. *Fibre Science and Technology*, 21, 169-180 (1984).
43. **H.KWUM and G.L. BURKHARDT**: Feasibility of Non Destructif Evaluation of Synthetic or Wire Ropes Using a Transverse-Impulse Vibrational Wave. *N.D.T International*, 21, 341 (5 oct. 1988).
44. **Jack C. SMITH, F.L. McCrackin, and H.F. Schiefer**: Stress-Strain Relationships in Yarns Subjected to Rapid Impact Loading. *Textile Research Journal*, 288-302 (April 1958).
45. **G.BLYTH and R. POSTLE**: Measurement and Interpretation of Fabrics Dynamic Modulus. *Textile Research Journal*, 601-608 (Oct.1979).
46. **A.RYAN and R. POSTLE**: Application of Sonic Wave Theory to the Measurement of the Dynamic Elastic Moduli of Woven and Knitted. *Textile Research Journal*, 732-740 (Nov.1981).
47. **J.L. WOO and POSTLE**: Maturity and Dynamic Elastic Modulus of Cotton Fibers. *Textile Research Journal*, 68-72 (Feb.1978).
48. **Marie-Alice ROUELLE and Mary L. NELSON**: Sonic Pulse Velocity in Fabrics: Is It Related to Abrasion Resistance? *Textile Research Institute*, 211-217, (April 1980).



49. **G.F.S HUSSAIN, R.R. KRISHNA IYER, and N.B. PATIL:** Sonic Modulus of Cotton Yarn and Its Relationship With Recovery Parameters. Textile Research Journal, 761-765 (Nov.1984).
50. **WALTER J. HAMBURGER:** Sonic Modulus of Cotton Yarn and Relationship With Recovery Parametres. Textile Research journal, 18, n°12, 705-743 (1948).
51. **C.F. ZOROWSKI and T. MURAYAMA:** Wave Propagation and Dynamic Modulus in Continuous Filament Twisted Yarns. Textile Research Journal, 852-860, (Fev. 1967).
52. **Jean PERDIJON:** Le Contrôle Non Destructif par Ultrasons. Traité des Nouvelles Technologies, Série Matériaux, Collection HERMES (1993).
53. Ultrasons: Propagation des Ondes Ultrasonores. Niveau 2 (3^e édition revue et corrigée). Cahiers de Formation CETIM (1993).