

50376  
1997  
13

N° d'ordre : 1938

# THESE

présentée à

**L'Université des Sciences et Technologies de Lille**

pour l'obtention du grade de

**Docteur**

Spécialité : Science des Matériaux

par

**Bernard VERMEULEN**  
Ingénieur ENSAIT

**Etude des fibres et tissus, enduits ou non,  
de Polyéthylène haute performance  
Caractérisation - Mise en oeuvre - Propriétés.**

Soutenance le 14 Janvier 1997 devant la commission d'examen

Professeur	ESCAIG B.	Président
Professeur	LAM Thanh M.	Directeur de thèse
Professeur	SAUTEREAU H.	Rapporteur
Professeur	VIALIER RAYNARD P.	Rapporteur
Professeur	VASSEUR C.	Examineur
Docteur	JACOBS. M.J.N.	Examineur





50376  
1997  
13

Cette étude a été réalisée sous la direction de Monsieur LAM Thanh My, Professeur des Universités, responsable du Groupe Matériaux Textiles et Composites du Laboratoire de GENIE et Matériaux TEXTILES (GEMTEX), créé en 1991 à l'Ecole Nationale Supérieure des Arts & Industries Textiles de Roubaix (E.N.S.A.I.T).

Je remercie Monsieur T.M.LAM et lui exprime ma profonde reconnaissance pour l'enthousiasme permanent et le dévouement sans relâche avec lesquels il a suivi et dirigé ce travail.

J'exprime ma profonde gratitude à Monsieur C. VASSEUR, Directeur de l'ENSAIT pour m'avoir encouragé à prendre cette voie, ainsi qu'à Monsieur A. KIRSCHNER pour m'avoir encadré dans la préparation de mon D.E.A.

Mes remerciements s'adressent également à Messieurs B. ESCAIG et C. CAZE, respectivement Directeurs des Laboratoires de Structure et Propriétés de l'Etat Solide - URA CNRS n° 234 et du GEMTEX, pour la confiance qu'ils m'ont accordée et avoir accepté mon inscription en thèse, dans la formation doctorale "Science des Matériaux".

Je tiens à remercier le Docteur M.J.N JACOBS de la Société DSM High Performance Fibers pour l'aide matérielle apportée et les conseils prodigués.

Les tests de résistance aux chocs ont été effectués au Laboratoire des Matériaux Macromoléculaires de l'I.N.S.A de Lyon. J'en remercie particulièrement Madame G. REFFO. Pour les Rayons X, c'est au Laboratoire du Solide de Lille: Merci à Monsieur MORE et Mademoiselle GORS.

J'exprime ma reconnaissance à Messieurs H. SAUTEREAU et P. VIALIER RAYNARD qui ont bien voulu me faire l'honneur de juger ce mémoire.

Que tous les étudiants qui m'ont aidé d'une manière ou d'une autre à réaliser ces travaux, trouvent en ces lignes l'expression de ma profonde sympathie et de mon amitié sincère.

Enfin, je pense souvent à la patience et à la compréhension de mon épouse Chantal, et de mon fils Kevin.

## SOMMAIRE

INTRODUCTION .....	7
--------------------	---

## CHAPITRE 1

### ETUDE DE LA FIBRE DE POLYETHYLENE HAUTE PERFORMANCE

1 / Différentes techniques de fabrication .....	13
1 / 1 / Aspect historique.....	13
1 / 2 / Le " Gel Spinning Process " .....	14
2 / Caractérisation mécanique.....	16
2 / 1 / Etude de la finesse.....	16
2 / 2 / Propriétés mécaniques en statique.....	23
Comportement en traction uniaxiale.....	23
Loi de Weibull.....	25
2 / 3 / Caractérisation par propagation d'ondes longitudinales.....	30
Détermination du module sonique.....	34
3 / Analyse morphologique de la fibre .....	36
3 / 1 / Microscopies .....	36
3 / 1 / 1 / Microscopie optique.....	36
3 / 1 / 2 / Microscopie à Balayage Electronique .....	37
3 / 1 / 3 / Microscopie à Force Atomique .....	38
Influence de la traction .....	40
3 / 2 / Diffraction X.....	40
Influence de la température.....	43
4 / Analyse par microcalorimétrie différentielle à balayage (DSC) .....	44
5 / Conclusion - Résumé .....	48

## CHAPITRE 2

### REALISATION DES TISSUS

1 / Choix des armures et du matériel.....	52
1 / 1 / Test préalable à la mise en oeuvre - Voluminosimétrie .....	56
1 / 2 / Le métier à tisser à lance FATEX .....	57
2 / Plan de fabrication.....	59
2 / 1 / Quantité de matière nécessaire .....	59
2 / 2 / Mise en oeuvre.....	62
2 / 3 / Différentes opérations.....	66
2 / 3 / 1 / Ourdissage .....	66
2 / 3 / 2 / Rentrage.....	68
2 / 3 / 3 / Peigne .....	68
2 / 3 / 4 / Cartes de perçage.....	69
2 / 4 / Réalisation pratique .....	69
3 / Tissus commerciaux utilisés.....	70
4 / Conclusion - Résumé .....	72

## CHAPITRE 3

### ETUDE DES FORMULATIONS D'ENDUCTION ET REALISATION DES COMPOSITES SOUPLES ET RIGIDES

1 / Les Matrices ou Prépolymères .....	75
1 / 1 / Polyester insaturé .....	75
1 / 2 / Prépolymère époxyde .....	75
2 / Formulations.....	77



3 / Mise en oeuvre - Application .....	78
3 / 1 / Technique par Foulardage - Taux d'exprimage .....	78
3 / 2 / Traitement de surface .....	79
3 / 2 / Moulage des plaques.....	80
4 / Découpe des éprouvettes.....	81
5 / Caractérisation - DSC.....	82
6 / Conclusion - Résumé .....	84

## CHAPITRE 4

### CARACTERISATION MECANIQUE DES TISSUS ET MATERIAUX COMPOSITES

1 / Essais de résistance à la traction uniaxiale sur matériaux souples monocouches	
1 / 1 / Descriptif machine.....	88
1 / 2 / Echantillons non traités : Influence de l'armure .....	88
1 / 3 / Echantillons imprégnés : Influence de l'enduction.....	92
Influence de la nature de la fibre .....	96
1 / 4 / Discussion.....	97
2 / Essais de résistance à l'impact - Dart-Test .....	100
2 / 1 / Descriptif machine.....	102
2 / 2 / Résultats bruts sur échantillons monocouches.....	104
2 / 2 / 1 / Tests réalisés sur éprouvettes tissées par nos soins .....	105
2 / 2 / 2 / Tests réalisés sur éprouvettes commerciales.....	109
2 / 3 / Résultats bruts sur échantillons multicouches .....	113
Comparaison avec Verre & Kevlar .....	115
2 / 4 / Discussion.....	116
3 / Mesures de vitesses de propagation d'ondes acoustiques longitudinales.....	119
3 / 1 / Présentation de l'essai.....	119

3 / 2 / Résultats bruts .....	123
3 / 3 / Discussion.....	123
5 / Calcul de simulation numérique de la pénétration d'échantillons composites par projectiles (programme AUTODYN).....	124
6 / Conclusion - Résumé .....	126

## **CHAPITRE 5**

### **DISCUSSION GENERALE - CONFRONTATION DES RESULTATS OBTENUS PAR DIFFERENTES METHODES**

<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>131</b>
<b>Listes des figures .....</b>	<b>133</b>
<b>Listes des tableaux.....</b>	<b>138</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>140</b>
<b>ANNEXES.....</b>	<b>147</b>

## INTRODUCTION

A sa naissance, due aux travaux pionniers de Pennings, la fibre de Polyéthylène Haute Performance est perçue comme une curiosité de laboratoire.

Aujourd'hui, c'est un produit industriel qui pénètre dans de nombreux secteurs d'application, grâce à sa grande ténacité et sa légèreté, ce qui lui confère la meilleure ténacité spécifique (par unité de masse) de toutes les fibres textiles qui existent sur le marché.

Fibres Techniques	Masse Volumique	Ténacité ou RKM
	g/cm <sup>3</sup>	cN/Tex
PEHP	0.97	300
Aramide -Composite	1.45	205
Aramide - Balistique	1.44	235
Carbone HM	1.85	120
Verre E	2.6	135
Polyamide HT	1.14	80
Polyester HT	1.38	80
Polypropylène	0.9	60

Figure 1 - Fibres techniques / Caractéristiques.

Effectivement, les domaines dans lesquels on rencontre déjà ce type de matériau concernent entre autres:

- le Sport / voile, drisses, coques de bateaux, skis,...
- les filets de pêche,...
- le Vêtement de protection / gants, combinaison d'escrime,...
- le Blindage / casques, gilets pare-balles, véhicules blindés...

L'application la plus spectaculaire du PEHP est certainement la protection balistique. Elle protège l'homme contre les éclats de projectiles ou les balles. Les performances des gilets pare-balles à base de PEHP tendent à détrôner ceux à base de fibres du type aramide. Conjointement, l'optimisation de la *construction* des surfaces textiles, c'est à dire leur architecture ou encore même leur contexture, a également conforté ces performances.

Le travail présenté dans le cadre de cette thèse prend comme point de départ quelques questions élémentaires :

- Pourquoi ce matériau, dont la formule de base est la même que celle du sac de supermarché, est-il doué de propriétés si étonnantes qu'il est de-



venu une sorte de matériau de rêve ? En particulier, d'où tire-t-il sa haute résistance à l'impact ? Sur quoi sa structure morphologique intervient-elle ?

- Comment peut-on optimiser encore ces propriétés grâce à la mise en oeuvre, soit par l'armure ou la contexture des structures tissées, soit par l'apport d'une enduction ou d'une matrice ?

Le travail se divise en quatre parties.

La première partie est essentiellement consacrée à la caractérisation du polyéthylène Haute Performance, sous forme de structure linéaire : fibre élémentaire, monofilament, et fil multifilamentaire. L'étude morphologique s'appuie sur plusieurs techniques : différentes techniques de microscopie et diffraction de rayons X.

La seconde partie concerne la réalisation du produit à l'état de matériau souple : surface textile tissée. Elle a donc pour objet la mise en oeuvre des articles tissés destinés à subir par la suite les enductions et les tests ultérieurs, notamment de résistances à l'impact. L'effort nécessaire à la pénétration d'un percuteur dans un matériau dépend directement de la finesse de ce dernier, de la solidité de sa texture et surtout du type d'armure. Ainsi, sur un même métier à tisser, différents échantillons ont été confectionnés à partir d'une même chaîne, et avec une réduction identique. Nous discuterons de l'influence des propriétés de la fibre sur les conditions de cette mise en oeuvre sur métier à tisser.

Dans une troisième partie, interviennent la formulation des enductions, destinées à être déposées sur les tissus obtenus, et la réalisation des matériaux composites rigides et souples. L'association fibre-matrice permet l'obtention d'un produit nouveau, dont les caractéristiques spécifiques sont élevées, et pour lequel suivant l'usage désiré, il est possible de jouer sur :

- la nature des composants,
- les proportions des composants,
- l'orientation des fibres.

La quatrième partie a pour objet les caractérisations thermomécaniques réalisées sur les différents échantillons obtenus et la discussion sur les questions évoquées plus haut.. L'accent sera mis sur l'étude de la résistance à l'impact, à cause de la résistance exceptionnelle de la fibre et des tissus utilisés. Il sera procédé aussi à la comparaison avec des matériaux réalisés avec d'autres fibres.

La cinquième et dernière partie rassemble tous les résultats d'essais et conduit à une confrontation des différentes méthodes d'analyse utilisées, avant d'en arriver aux conclusions générales.

## **CHAPITRE 1**

# **Etude de la fibre de Polyéthylène Haute Performance**

## SOMMAIRE

### 1 / Différentes techniques de fabrication

1 / 1 / Aspect historique

1 / 2 / Le " Gel Spinning Process "

### 2 / Caractérisation thermo-mécanique

2 / 1 / Etude de la finesse

2 / 2 / Propriétés mécaniques en statique

Comportement en traction uniaxiale

Loi de Weibull

2 / 3 / Caractérisation par propagation d'ondes longitudinales

Détermination du module sonique

### 3 / Analyse morphologique de la fibre

3 / 1 / Microscopies

3 / 1 / 1 Principe optique

3 / 1 / 2 Principe à balayage électronique

3 / 1 / 3 Principe à Force atomique

Influence de la traction

3 / 2 / Diffraction de Rayons X

Influence de la température

### 4 / Analyse par calorimétrie différentielle à balayage (DSC)

### 5 / Conclusion - Résumé



Pour des raisons de disponibilité de produits, nous avons surtout utilisé et étudié les fibres PEHP dénommées Dyneema, fabriquées par la firme DSM\* High Performances Fibers, située à Heerlen (Pays Bas).

## 1 / Technique de fabrication du PEHP

### 1 / 1 / Aspect historique

Depuis plus de 50 ans, les chercheurs s'évertuent à essayer d'apporter sans cesse des améliorations aux caractéristiques des matières plastiques et des fibres textiles. DYNEEMA® est entre autre le résultat de ces recherches<sup>1</sup>.

#### *Ne la qualifie-t-on pas de "fibre la plus résistante du monde"<sup>2</sup>?*

En 1940, Carothers affirme que les propriétés d'un polymère sont liées à la longueur de ses chaînes macromoléculaires, de la linéarité de ces dernières et de leur orientation.

Dans les années 50, Ziegler trouve un catalyseur permettant d'obtenir un polyéthylène linéaire à basse pression.

En 1957, Keller<sup>3</sup> explique le phénomène de cristallisation. Il démontre que l'étirage des chaînes repliées oriente la cristallinité dans le sens même de la fibre.

Vers les années 60, le Docteur Pennings<sup>4</sup> de DSM Research découvre les structures en "Shish Kebab" (cf. Fig. 1) hautement cristallines. Il trouve également un procédé pour obtenir des filaments de haute ténacité, mais malheureusement trop lent au niveau industriel. Le professeur Ward<sup>5</sup> de l'Université de Leeds (Grande Bretagne) parvient à fabriquer des fibres de haut module en équilibrant ce procédé, mais du fait de trop faibles masses moléculaires, les liaisons Van der Waals sont trop faibles pour obtenir des filaments solides.

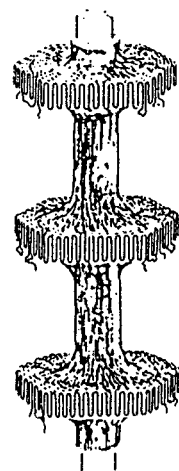


Figure 2 - Structure en "Shish Kebab".

Dans les années 70, Smith et Lemstra<sup>6,7</sup> de **DSM Research** fabriquent une solution diluée de polyéthylène à haut poids moléculaire, ( $M_w = 10^6$  g/mole) dans lesquelles les longues molécules ne sont pas enchevêtrées. Les solutions sont en fait des gels. Le filage du polyéthylène à partir de ces gels leur a permis d'obtenir des fibres de haut module et haute ténacité débouchant sur des possibilités d'usages commerciaux.

Au début des années 80, beaucoup de discussions ont lieu quant à la rentabilité et l'acquisition de brevets pour la fibre et son procédé de fabrication.

En 1986, **DSM** fonde une association avec **Toyobo** (Japon). Une usine pilote est construite au Japon et produit 200 tonnes de **DYNEEMA®** par an.

Enfin en 1990, **DSM High Performance Fibers** lance la production de **DYNEEMA®** en Europe, à Heerlen (Pays Bas). Sous licence DSM, une autre fibre est fabriquée par **Allied-Signal** aux Etats Unis sous le nom commercial de **SPECTRA®**. La commercialisation des fibres PEHP est donc relativement récente et en plein développement.

### 1 / 2 / Le Procédé de Filage à l'Etat de Gel

Les clés de la fabrication de la fibre de PEHP sont :

- Alignement des chaînes,
- Perfection structurale atteinte en utilisant de longues molécules avec peu ou pas de groupements latéraux.

Le principe du filage à l'état de gel consiste en l'exploitation des propriétés d'ultra-étirage de gels contenant du polyéthylène de très grande masse molaire (PEHD-UHMW) qui est constitué au départ à l'état solide de cristallites lamellaires à chaînes repliées. L'ultra-étirage de ces gels a permis l'obtention de fibres de haut module et de haute ténacité<sup>8</sup>.

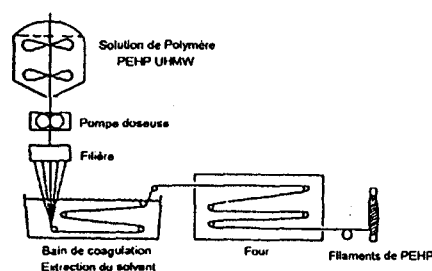


Figure 3 - Diagramme schématisé du procédé de filage à l'état de gel.

D'après la figure 3, les points principaux du processus de fabrication sont dans l'ordre chronologique :

- Extrusion continue de la solution de Polyéthylène à haut poids moléculaire: Filage de la solution
- Gélification/Cristallisation du PE à haut poids moléculaire. Ceci peut se réaliser par refroidissement et/ou par évaporation du solvant.
- Extraction du solvant<sup>8,9</sup> (decaline),
- Ultra-étirage et évacuation des restes du solvant.

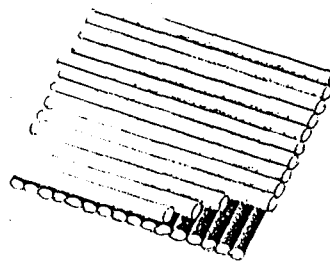
Bien que toutes les étapes soient essentielles pour garantir les caractéristiques du produit, l'ultra-étirage fait figure de coeur du procédé. Il est à noter que les propriétés de la fibre obtenue dépendent fortement d'une part du solvant utilisé, et d'autre part du degré de polymérisation du PEHD.

Au niveau commercial<sup>10</sup>, il est possible de se procurer les fils continus à base de Dyneema<sup>®</sup> selon les différents grades suivants:

- . **SK 60** : le plus utilisé, notamment pour les cordes tressées ou retordues, les vêtements de protection, et sous forme de renfort de composites résistant au choc.
- . **SK 65** : possède ténacité et module supérieurs à ceux du précédent. Type de fibre destinée aux applications requérant la plus haute performance et une économie de poids maximum.
- . **SK 66** : spécialement conçue pour la protection balistique, cette fibre offre une très haute absorption d'énergie.

La Dyneema<sup>®</sup> est également disponible sous forme de non-tissé spécial du nom de . **UD 66**, dont la construction consiste en des fils positionnés par couche parallèlement les uns aux autres.

Figure 4 - Non-Tissé unidirectionnel (0-90)



\* European Office  
DSM High Performance Fibers B. V.  
Eisterweg 3,  
6422 PN Heerlen  
The Netherlands.  
Tel. (31) 45 436767  
Fax (31) 45 426538  
Telex 56239 hpf nl

## 2 / Caractérisation mécanique

### 2 / 1 / Etude de la finesse - Régularité - Théorie<sup>11</sup> de Martindale

La finesse d'une structure linéaire textile (fibre élémentaire, monofilament, ruban de fibres discontinues, mèche, filé de fibres, fil multifilamentaire,...) est exprimée par l'intermédiaire de son titre, qui représente sa masse par unité de longueur. Par référence aux normes<sup>12</sup>, c'est le titre en Tex que l'on se doit d'utiliser. Celui-ci correspond à la masse en grammes par kilomètre de matière. Il est à noter la possibilité d'utiliser des multiples ou sous-multiples du système considéré (Titre en Décitex, en Kilotex, etc...).

DSM propose sur le marché une gamme de produits<sup>10</sup> qui s'étale de 165 à 1760 dTex, et adaptée au grade désiré en fonction de l'utilisation.

Eu égard au type de tests réalisés dans le cadre de cette thèse, c'est le grade SK 66 que nous avons surtout travaillé. Au niveau commercial, il se présente sous forme standard avec un titre de **440 dTex**, composé de 390 monofilaments. Un monofilament a donc pour titre moyen : 1,13 dTex. Exprimé en microns, si l'on considère la fibre avec une section circulaire et une masse spécifique  $\delta$  égale à 0.97 g/cm<sup>3</sup>, le diamètre de la fibre vaut :

$$d \text{ en } \mu = k \times \sqrt{\text{Tex} / \delta}$$

k est une constante liée au système de titrage utilisé.

Ici, k = 35.69

soit **12,16  $\mu$**

Cette première caractéristique sera confirmée au travers de l'analyse microscopique, au chapitre 1 / § 3 / 1.

Au niveau du laboratoire de métrologie, il est également possible d'obtenir ce paramètre grâce à un test réalisé sur appareil du type Vibroskop (Zweigle), dont le principe est basé en application des phénomènes vibratoires. L'essai, qui a un caractère individuel, consiste en fait à mettre la

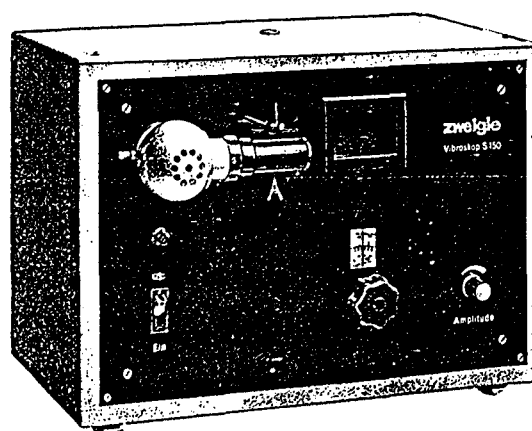
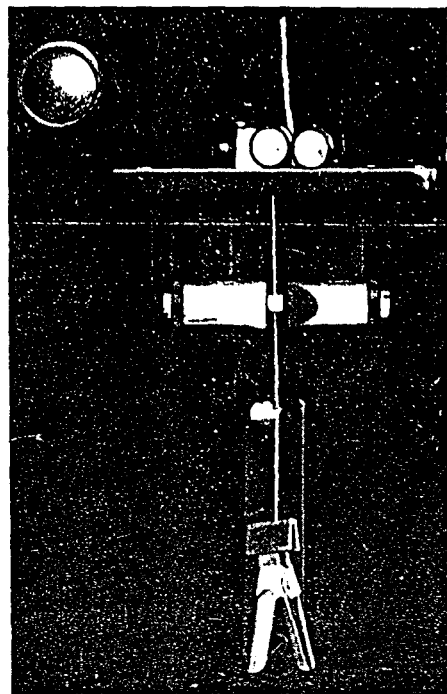


Figure 5 - Appareil Vibroskop (Zweigle)



fibre en vibration et essayer d'atteindre le phénomène de résonance. L'éprouvette est suspendue dans l'appareil comme indiqué ci-contre. Elle est chargée d'un poids fixé au niveau inférieur, qui conditionne la gamme de mesures (100 mg pour gamme 0.8 à 8 dTex, et 500 mg pour gamme 4 à 40 dTex). On lui soumet ainsi des pulsations électriques d'une fréquence constante, pour la mettre en vibration. Il est possible de faire varier la longueur de vibration pour aboutir à l'amplitude maximale (résonance).

Figure 6 - Appareil Vibroskop (Zweigle)  
 Détail de la tête de travail : éprouvette sous tension



Lorsque ce point est atteint, le résultat se lit sur l'échelle graduée correspondant au contrepoids utilisé. Le relevé de mesures doit être assez conséquent pour atteindre une précision  $< 2 \%$ . A noter que l'appareil est spécifiquement réservé aux fibres très régulières en finesse, soit surtout les fibres d'origine chimique. (Relevé de 55 mesures). Titre moyen : 1.19 dTex - CV = 3.78 % - Précision : 1.01 %.

Les éprouvettes n'étant aucunement endommagées par le titrage au vibroskop, on peut par la suite, les tester en traction et trouver la ténacité de chaque fibre individuelle sur la base de la charge de rupture par rapport au titre. D'un point de vue purement textile, cette notion porte pour nom la « RKM » et représente la longueur de rupture exprimée en Km, sous laquelle l'échantillon se rompt sous son propre poids. Ce paramètre sera étudié au Chapitre 1 § 2 / 2.

Dans le cas du multifilament, cette première caractéristique (masse linéique) s'obtient par le biais d'un dévidoir (cf. fig. 7), accouplé à une balance. Cet appareil permet le contrôle du titrage des filés, en réalisant plusieurs échevettes simultanément de la longueur souhaitée sous une

tension standard du fil. La longueur normalisée<sup>13</sup> de l'éprouvette est de 500 m, sous la forme de 5 échevettes de 100 m chacune, ceci afin d'éviter un accroissement du périmètre généré par le tourniquet.

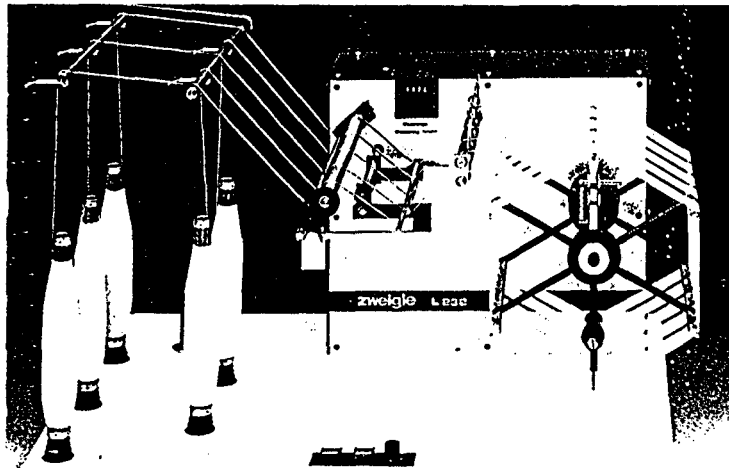


Figure 7 - Dévidoir pour fil. (Zweigle)

La régularité de titrage, quant à elle, peut être décelée sur un appareil du type Régularimètre (Zellweger Uster), dont la tête de travail dotée d'un capteur du type capacitif mesure les variations de masse. Le matériau défile en continu entre deux plaques de condensateur, dont les variations de tension traduisent ces mêmes variations de masse.

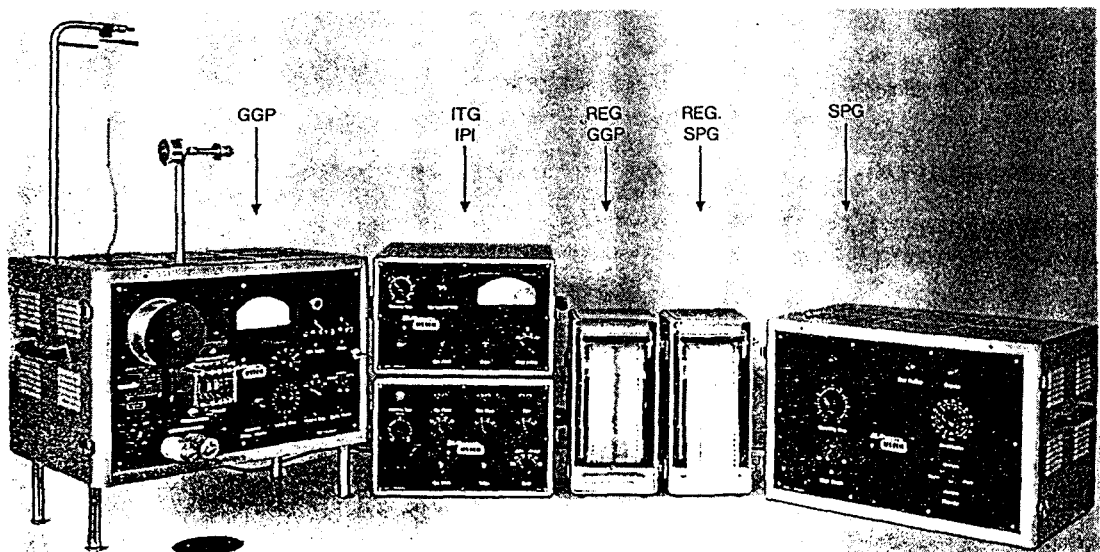


Figure 8 - Banc d'essai de régularimétrie. (Zellweger Uster)

Abréviations utilisées pour les différents éléments de l'unité :

GGP	- Régularimètre
ITG	- Intégrateur automatique
IPI	- Indicateur d'imperfections
Reg. GGP	- Enregistreur du régularimètre (Diagramme)
Reg. SPG	- Enregistreur du spectrographe (Spectrogramme)
SPG	- Spectrographe

Les résultats s'expriment par l'intermédiaire de l'irrégularité moyenne linéaire U% (écart linéaire moyen E, et en valeur absolue, exprimé en % de la moyenne), ou un coefficient de variation CV% ( $CV\% = 1.253 \times U\%$ ). La côte obtenue est alors comparable soit avec des valeurs étalons (qui ne sauraient tarder à apparaître sur le marché, pour les fibres techniques), soit avec des valeurs données par l'expérience. Cette côte est fournie dans le cas de filés de fibres par l'indice d'irrégularité I, représentant le rapport entre l'irrégularité effective enregistrée par l'appareil, et une certaine irrégularité limite à laquelle pourrait prétendre la matière dans le cas le plus idéal. C'est la théorie<sup>11,14</sup> de Martindale, bien connue des filateurs.

$$CV\%_{lim} = \frac{100}{\sqrt{n}} \times \sqrt{1 + 0.0004 \cdot CV_d^2}$$

où n représente le nombre de fibres moyen dans la section du fil.

Le  $CV_d$  est généralement admis égal à une valeur comprise entre 0 et 10 % dans le cas des fibres synthétiques. Son estimation peut devenir en fait beaucoup plus rigoureuse, suite à une étude réalisée sur vibroskop. Ainsi la formule précédente s'écrit de la façon suivante :

$$CV\%_{lim} = \frac{k}{\sqrt{n}} \text{ avec } 100 < k < 102$$

Dans notre cas, le matériau pourrait acquérir sa régularité extrême à une valeur de CV avoisinant les 5.11 % (pour  $k = 101$ ,  $CV_d = 5\%$ ).

Effectivement,  $n = \text{Titre Fil} / \text{Titre monofilament}$

$$\text{Soit : } n = 440 / 1.13 = 390$$

L'essai réalisé laisse apparaître un résultat équivalent à : 2 % dans les conditions opératoires suivantes : Fente : N° 6 Vitesse : 8 m/mn Sensibilité : 12,5 %

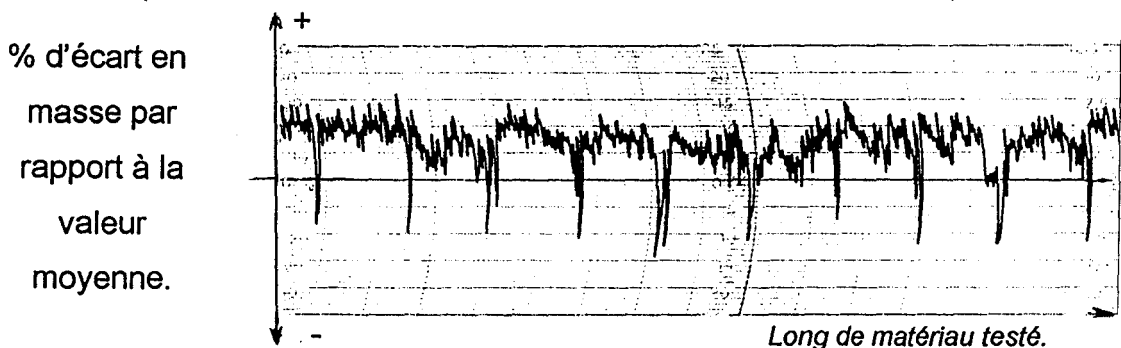


Figure 9 - Diagramme des variations de masse

Le régularimètre Uster permet l'obtention d'un *diagramme* de variations de masse exprimées en % de la valeur moyenne, en fonction de la longueur de matériau testé, ainsi qu'un *spectrogramme* pour l'identification de défauts périodique

### CONCLUSIONS :

L'indice de régularité vaut :  $I = U_{\text{eff}} / U_{\text{lim}} = 2/5.11 = 0.39$ . Avec une telle valeur ( $I < 1$ , qui suivant la théorie de Martindale est impossible !!), la matière paraît être très régulière en finesse. Aucun défaut périodique n'est d'ailleurs détecté au travers de l'analyse spectrale du régularigramme de masse du produit.

*La théorie de Martindale ne s'applique visiblement qu'aux filés de fibres !!*

Quoi qu'il en soit, ce type de test réalisé sur de tels matériaux permettrait à une entreprise d'établir ses propres valeurs limites en terme qualitatif, et d'arriver à des points de comparaisons possibles dans le cas de matières de natures différentes. Cette démarche existe dans le cas des filés de fibres traditionnels par l'intermédiaire de standards<sup>15</sup>, mais pas encore pour le multifilament continu. A titre d'exemple, il a été réalisé des essais à une vitesse constante de 8 m/mn sur les différents produits suivants :

Echantillon	Fente N°	Sensibilité	Ueff en %
1 - Film étalon	4	100	14.5
2 - Dyneema SK 66 440-390	6	25	2
3 - Kevlar 49* 1420 deniers	5	25	2
4 - Technora* 1500 de 1000 fil	6	50	5.4
5 - Vectran* HT 1500/300 _ T 116	6	50	8.1

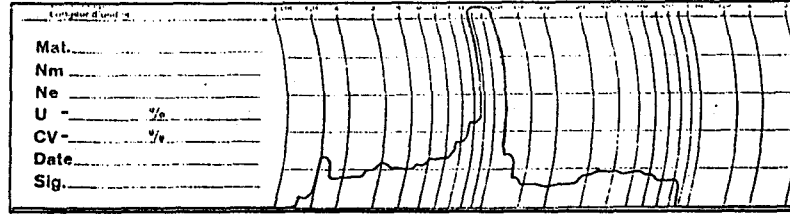
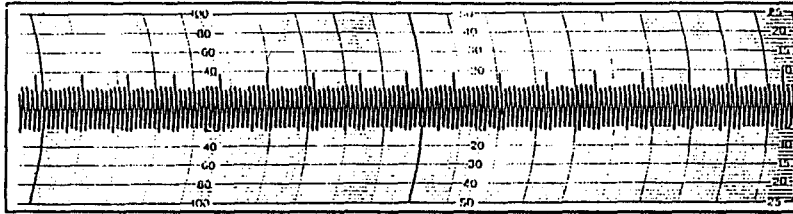
Tableau 1 - Réglages de base

Le film étalon, auquel il est fait référence dans le tableau, est un ruban de matière plastique. Dans sa longueur ,il a été volontairement créé des trous, en nombre constant et à distance régulière pour simuler des défauts périodiques sur un échantillon qualifié de standard. Les deux extrémités de celui-ci ont été collées l'une sur l'autre, de telle sorte qu'on puisse le tester en continu dans la tête de travail du régularimètre. Le raccord génère obligatoirement un défaut périodique, illustré sur le premier spectrogramme au travers de la « *cheminée* » situé à la longueur d'ondes de 10 cm.

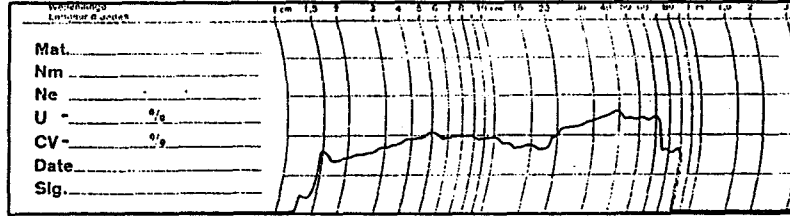
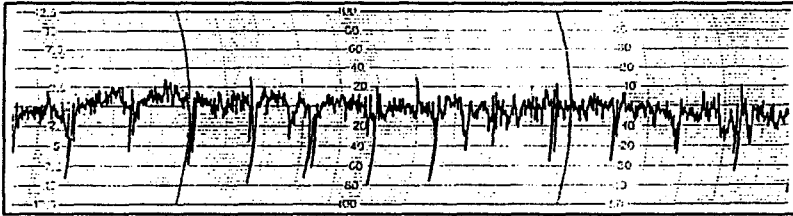
\* Kevlar et Technora sont des fibres à base de polyamide, respectivement fabriquées et commercialisées par Du Pont de Nemours et Teijin Ltd. Vectran est une fibre en copolymère polyester-polyacrylate, commercialisée par Hoechst.

Diagrammes

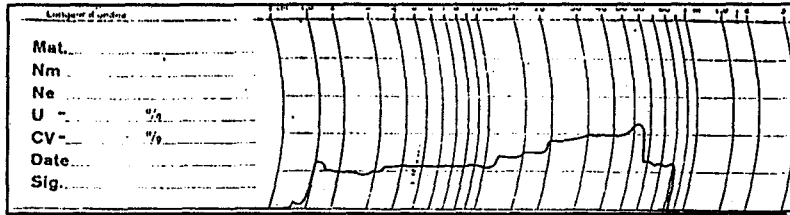
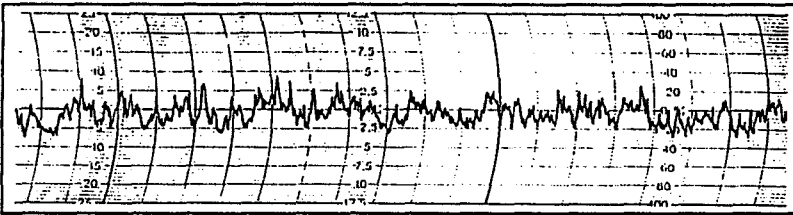
Spectrogrammes



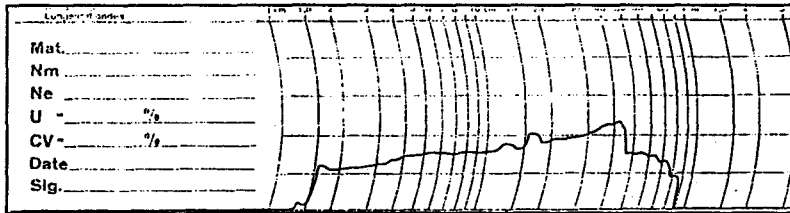
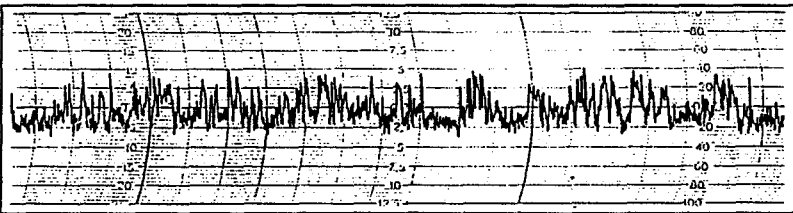
Film Etalon - Sensibilité 100 % - Fente N° 4 - Ueff : 14.5 %



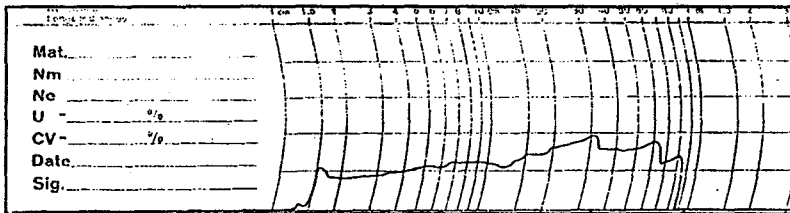
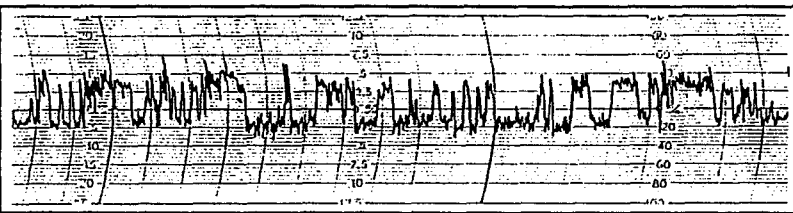
Dyneema SK 66 - 440 dTex /390 - Sensibilité 25 % - Fente N° 6 - Ueff : 2 %



Kevlar 49 - 1420 Deniers - Sensibilité 25 % - Fente N° 6 - Ueff : 2 %



Technora - 1500 de 1000 fil - Sensibilité 50 % - Fente N° 6 - Ueff : 5.4 %



Vectran HT 1500/300 - T 116 - Sensibilité 50 % - Fente N° 6 - Ueff : 8.1 %

## INTERPRETATION DES RESULTATS :

Les chiffres parlent d'eux-mêmes, et font apparaître des valeurs comparables et très honorables pour la Dyneema et le Kevlar. L'allure des diagrammes est néanmoins distincte et traduit pour le PEHP des points fins avec une périodicité à longueur d'ondes relativement faible (1.5 cm à la vue du spectrogramme). A cet effet, il faut mentionner que sous forme de fil multifilamentaire, le PEHP présente morphologiquement un problème lié à un collage occasionnel de filaments entre eux. Industriellement, ce phénomène porte le nom de "mariage de fibres. La mesure de régularité de masse par l'intermédiaire du Régularimètre Uster devrait permettre être à même de quantifier cette notion, pour ainsi réagir d'une production sur l'autre, et mieux contrôler ce phénomène.

Le profil du spectre occasionné par le Kevlar montre, sur le diagramme 3 de la page précédente, lui aussi une amorce de "cheminée", mais pour une longueur d'ondes à 0.60 m environ, et a priori dans le domaine des points qualifiés de "gros", dans le jargon textilien. L'appareil peut faire une distinction entre les points "fins", les points "gros" et les "neps" (boutons ou agglomérat de fibres sur elles-mêmes). La tendance est donc inverse au cas précédent.

Pour les fibres de Technora et de Vectran, il faut prendre la précaution de voir une échelle supérieure de 50 % par rapport aux résultats précédents, au niveau des diagrammes. Ceci traduit dans le même rapport la différence des valeurs d'irrégularité moyennes linéaires  $U_{eff}$ . A remarquer pour le Vectran un profil de réponse en "créneaux", qui lui également tend à refléter la formation de "cheminées" au sein du spectrogramme. Les défauts, grosseurs ou finesses, ne sont donc plus ponctuels, mais étalés sur une longueur plus ou moins importante.

Le développement récent des textiles à usages techniques aura pour conséquence auprès des constructeurs de matériels de contrôles de laboratoire, de créer au plus vite des **standards**<sup>15</sup> spécifiques pour évaluer qualitativement tous ces nouveaux matériaux. Lors de l'ITMA 95 à Milan, l'un d'entre eux proposait un nouveau principe de la mesure de la régularité par l'intermédiaire d'un capteur du type optique. Il s'agit de la Société SUPERBA,

d'origine alsacienne, dont la renommée n'est plus à faire via le YarnTester. Ce nouveau principe devrait trouver une complémentarité au précédent.

## 2 / 2 / Propriétés mécaniques en statique

### Comportement en traction uniaxiale

La machine de traction Zwick 1456 utilisée est un dynamomètre du type "à vitesse constante d'allongement". Cette dernière est réglable, tout comme la longueur d'éprouve d'ailleurs. Chacune des pinces, destinées à tenir la fibre pendant l'essai, est constituée de deux mâchoires dont les faces de serrage sont plates, en métal dur et dotées d'un système de serrage à pression constante. La fibre est mise en place sous une force de tension préalable équivalente à 0.5 cN/TeX, eu égard à la norme<sup>16</sup> NF G 07-008. La connexion de l'appareil avec l'outil informatique permet de récupérer les diagrammes  $F(\text{cN}) = f(L \text{ en } \%)$ . Avant le test de traction, l'éprouvette est titrée par le biais du Vibroskop, comme prévu page 17, afin de déduire ultérieurement les notions de RKM.

Conditions opératoires : La vitesse d'essai des tests de traction réalisés sur la machine Zwick (cf. Fig. 10) équipée d'un capteur de sensibilité de 10 N est de 2 mm/mn. La longueur d'éprouve est de 20 mm, dans un premier temps, puis de 40 pour une seconde série de tests dans le souci de vérifier la loi de Weibull.

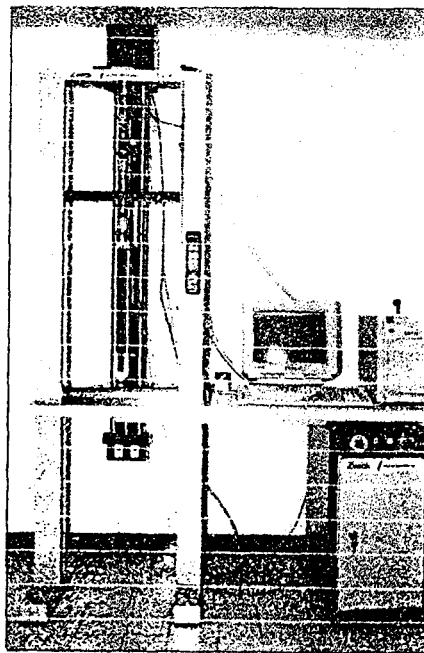


Figure 10 - Banc de traction Zwick

## Détermination expérimentale de la résistance des fibres de polyéthylène

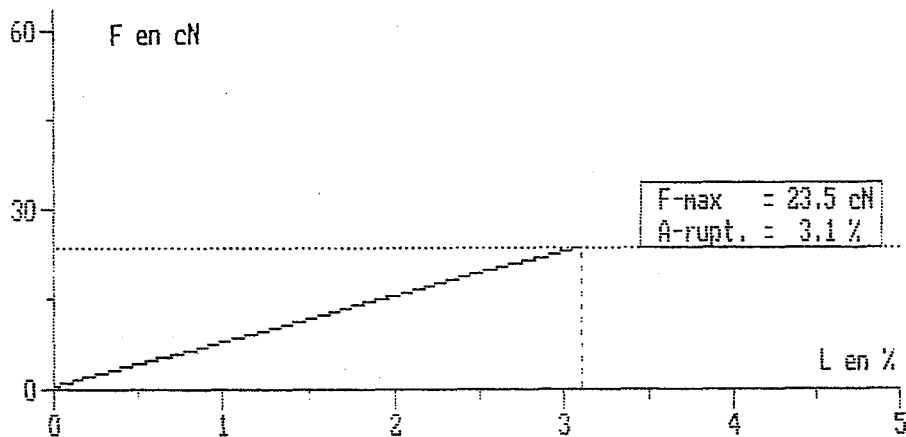
Machine de traction Zwick

Tests dynamométriques sur Dyneema SK 1760 DTex Masse Volumique : 0,97 g/cm<sup>3</sup>

Echantillon N°	Force en cN	Titre en déciTex	Ténacité en cN/TeX	% d'allongement	Contrainte à la rupt. en GPa.	Module d'élasticité	Finesse en μ	Nombre de filaments II
1	91.30	4.00	228.25	3.50	2.21	63.26	22.92	2
2	23.50	1.20	195.83	3.10	1.90	61.28	12.55	1
3	66.90	2.70	247.78	2.80	2.40	85.84	18.83	1 ou 2
4	46.60	2.60	179.23	3.10	1.74	56.08	18.48	1 ou 2
5	74.90	3.15	237.78	3.30	2.31	69.89	20.34	2
6	48.70	2.15	226.51	3.10	2.20	70.88	16.80	1 ou 2
7	49.70	2.25	220.89	3.20	2.14	66.96	17.19	1 ou 2
8	16.60	1.22	136.07	2.00	1.32	65.99	12.66	1
9	24.10	1.40	172.14	2.80	1.67	59.64	13.56	1
10	96.00	5.20	184.62	3.20	1.79	55.96	26.13	2
11	112.60	4.45	253.03	3.60	2.45	68.18	24.17	2
12	23.30	1.10	211.82	3.10	2.05	66.28	12.02	1
13	28.60	1.22	234.43	3.50	2.27	64.97	12.66	1
Moyenne :	54.06	2.51	209.87	3.10	2.04	65.78	17.56	Z1.xls

La difficulté de manoeuvre pour ce type de test réside dans la préparation de l'éprouvette. Elle est traduite dans la dernière colonne, qui laisse apparaître un doute quant à la quantité de filaments effectivement testés.

Le comportement en traction du monofilament Dyneema s'illustre selon le profil de courbe représenté par la figure 3, correspondant à l'échantillon N° 2.



Valeurs annoncées par le fabricant :

Dyneema type	Module en GPa	Contrainte à la rupture en GPa	Allongement à la rupture en %
SK 60	89	2.7	3.5
SK 65	95	3	3.6
SK 66	99	3.2	3.7



### Loi de Weibull

Pour déterminer la résistance d'un filament de n'importe quelle longueur, la méthode employée est généralement développée à partir d'une statistique de Weibull. Cette dernière repose sur la théorie dite du chaînon le plus faible.

Soit une fibre de longueur  $l$  donnée. En supposant cette fibre constituée de  $n$  chaînons, elle cassera au niveau du chaînon le plus faible. La résistance de chaque chaînon dépend du nombre de défauts présents, ainsi que de leur sévérité. Ainsi, pour une contrainte d'intensité  $\sigma$  donnée, appliquée sur la fibre en traction, la probabilité pour que cette fibre ne se rompe pas est égale à la probabilité qu'aucun chaînon ne casse, soit :

$$1 - P(\sigma) = [1 - F(\sigma)]^n \quad (1)$$

Dans cette expression,  $P(\sigma)$  est la fonction cumulative de la probabilité de rupture de la fibre à une contrainte inférieure ou égale à  $\sigma$ .  $F(\sigma)$  est la fonction cumulative qui caractérise la probabilité de rupture de chacun des  $n$  chaînons. La solution la plus simple satisfaisant l'équation précédente (1) est proposée par Weibull :

$$P(\sigma) = 1 - \exp[-((\sigma - \sigma_u) / \sigma_0)^m] \quad (2)$$

où  $m$ ,  $\sigma_u$  et  $\sigma_0$  sont respectivement des paramètres de forme, d'échelle et de valeur limite de contrainte au dessous de laquelle la probabilité de rupture est nulle. La combinaison des équations (1) et (2) donne :

$$P(\sigma) = 1 - \exp[-n((\sigma - \sigma_u) / \sigma_0)^m] \quad (3) \quad \text{qui conduit à :}$$

$$\text{Ln}[\text{Ln}(1/(1-P(\sigma)))] = m \cdot \text{Ln}(\sigma - \sigma_u) + (\text{Ln} - n \cdot \text{Ln} \sigma_0) \quad (4)$$

Dans le cas des matériaux fragiles, il est admis de négliger  $\sigma_u$  (contrainte de rupture minimale). Ainsi, l'équation (4) devient alors :

$$\text{Ln}[\text{Ln}(1/(1-P(\sigma)))] = m \cdot \text{Ln}(\sigma) + (\text{Ln} - n \cdot \text{Ln} \sigma_0) \quad (5)$$

Si l'on pose :  $Y = \text{Ln}[\text{Ln}(1/(1-P(\sigma)))]$

$$X = \text{Ln}(\sigma)$$

$$\text{et } B = \text{Ln}-n.\text{Ln}\sigma_0$$

l'équation (5) peut dès lors se mettre sous la forme  $Y = m.X + B$  qui correspond à l'équation d'une droite. Donc, si les données satisfont à une statistique de Weibull, on doit obtenir une droite lorsqu'on trace la courbe représentative de  $\text{Ln}[\text{Ln}(1/(1-P(\sigma)))]$  en fonction de  $\text{Ln}(\sigma)$ . Le paramètre  $m$  est alors utilisé pour déterminer la contrainte à la rupture moyenne d'une fibre de n'importe quelle longueur. De plus  $m$  permet de caractériser la répartition des défauts : plus il est grand, plus la distribution des défauts est étroite, et plus la répartition est régulière.

D'une manière générale, la résistance moyenne d'une fibre de longueur quelconque est déterminée par l'intégration du produit de la résistance par la fonction de probabilité  $p(\sigma)$  où  $p(\sigma) = P(\sigma)/d\sigma$ .

$$\sigma_f = \int_0^{\infty} \sigma.p(\sigma)d\sigma \quad (6)$$

et, par un réarrangement mathématique approprié (cf Annexe ..), on obtient :

$$\sigma_f = \sigma_0 / (n^{1/m}) \Gamma((m+1)/m) \quad (7)$$

où  $\Gamma$  est la fonction Gamma de  $a = (m+1)/m$  telle que :

$$\Gamma(a) = \int_0^{\infty} x^{a-1}.e^{-x}dx \quad (8)$$

Si l'on suppose que  $m$  et  $\sigma_0$  sont constants quelle que soit la longueur de la fibre considérée, le rapport des résistances d'une fibre de longueur  $l_1$  et d'une autre fibre de longueur  $l_2$  est tel que :

$$\sigma_1 / \sigma_2 = (n_2/n_1)^{1/m} \quad (9)$$

Le nombre de chaînons étant proportionnel à la longueur de la fibre, on a donc :

$$n_2 / n_1 = l_2 / l_1$$

$$\text{D'où : } \sigma_1 / \sigma_2 = (l_2/l_1)^{1/m} \quad \text{Soit : } \sigma_{12} = \sigma_{11} . (l_1/l_2)^{1/m}$$

Ainsi, la connaissance de la résistance à la rupture d'une fibre à une certaine longueur de jauge permet d'obtenir la résistance à la rupture de cette même fibre à une autre longueur.

### INTERPRETATIONS DES RESULTATS :

Pour pouvoir appliquer la théorie de Weibull, il faut un nombre d'essais relativement important. En règle générale, on en effectue une cinquantaine avant de considérer l'effectif suffisant pour que le relevé de mesures soit représentatif de l'échantillon. La démarche suivante est ensuite entamée.

1 / A chaque essai, on détermine la contrainte de rupture de la fibre pour la longueur initiale donnée ( $l_0 = 20 \text{ mm}$ )

2 / Ces valeurs, rassemblées par classes conduisent à l'élaboration d'un histogramme.

3 / Les paramètres suivants sont alors déterminés :

\*  $p_i = (i - 0.5) / N$  formule dans laquelle  $p_i$  représente la probabilité de rupture pour la  $i$ ème résistance. Elle est déterminée par l'estimateur le plus objectif, avec  $i =$  fréquence cumulée, et  $N =$  nombre d'essais.

\*  $\ln[\ln(1/(1 - p_i))]$

\*  $\ln(\sigma_i)$  où  $\sigma_i$  représente le centre de classe.

4 / Et enfin, on trace le nuage de points représentatif de  $\ln[\ln(1/(1 - p_i))]$ . en fonction de  $\ln(\sigma_i)$ . Généralement cette courbe a une forme linéaire. Il est alors possible de déterminer les paramètres de Weibull, et en particulier le coefficient directeur  $m$ , qui représente la pente de la droite obtenue. La connaissance de ce paramètre permet enfin de déterminer la contrainte à la rupture de la fibre à une autre longueur. (AN :  $l = 40 \text{ mm}$ ). Notre étude s'est limitée à un relevé de 13 mesures pour cause de glissement des fibres dans les mors. Ce phénomène rend la manipulation très fastidieuse, et, de ce fait, les valeurs trop peu nombreuses ne permettent pas d'atteindre statistiquement parlant une bonne précision. Elles ne traduisent pas une bonne homogénéité du lot en terme de caractéristique dynamométrique. Par contre, l'étude relative à la loi de Weibull conduit à l'obtention d'un coefficient de régression linéaire convenable.

Mise en application de la loi de Weibull aux  
 Tests dynamométriques sur monofilament de Dyneema SK 65 1760 dTex  
 Longueur d'épreuve : 20 mm / Vitesse : 2 mm/mn

Contrainte à la rupture	Int. de Classes	Xi	Ni	ei	Ni.ei	Ni.ei^2	Xi	X	i	pi	1-pi	Y
1.32	1.25 1.35	1.30	1	-7	-7	49	1.30	0.11	1	0.04	0.96	-1.77
1.67	1.35 1.45	1.40	0	-6	0	0	1.40	0.15	2	0.12	0.88	-1.27
1.74	1.45 1.55	1.50	0	-5	0	0	1.50	0.18	3	0.19	0.81	-1.03
1.79	1.55 1.65	1.60	0	-4	0	0	1.60	0.20	4	0.27	0.73	-0.87
1.90	1.65 1.75	1.70	2	-3	-6	18	1.70	0.23	5	0.35	0.65	-0.73
2.05	1.75 1.85	1.80	1	-2	-2	4	1.80	0.26	6	0.42	0.58	-0.62
2.14	1.85 1.95	1.90	1	-1	-1	1	1.90	0.28	7	0.50	0.50	-0.52
2.20	1.95 2.05	2.00	1	0	0	0	2.00	0.30	8	0.58	0.42	-0.43
2.21	2.05 2.15	2.10	1	1	1	1	2.10	0.32	9	0.65	0.35	-0.34
2.27	2.15 2.25	2.20	2	2	4	8	2.20	0.34	10	0.73	0.27	-0.24
2.31	2.25 2.35	2.30	1	3	3	9	2.30	0.36	11	0.81	0.19	-0.15
2.40	2.35 2.45	2.40	2	4	8	32	2.40	0.38	12	0.88	0.12	-0.03
2.45	2.45 2.55	2.50	1	5	5	25	2.50	0.40	13	0.96	0.04	0.15
			13		5	147						

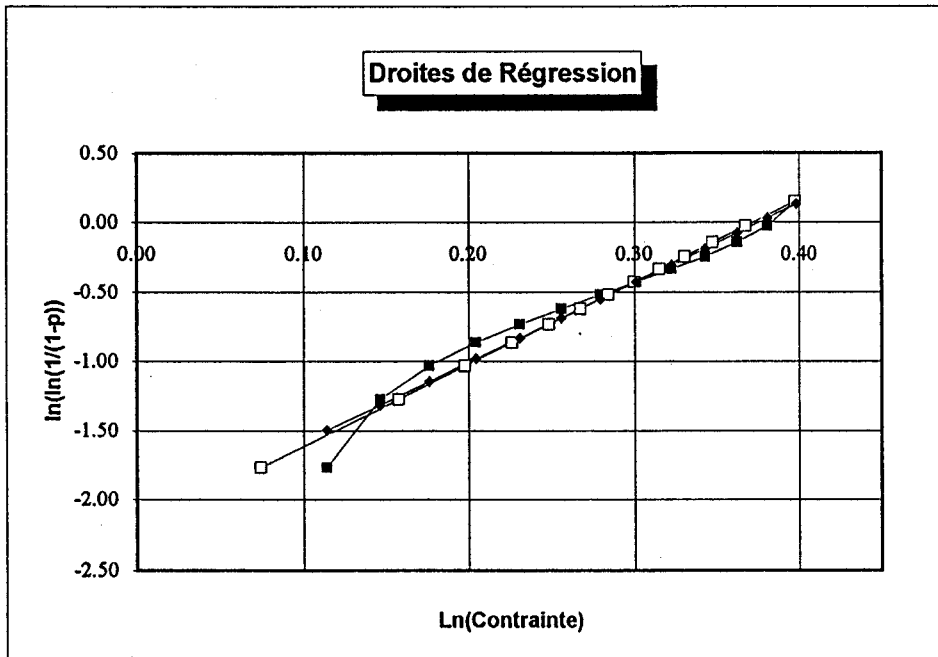
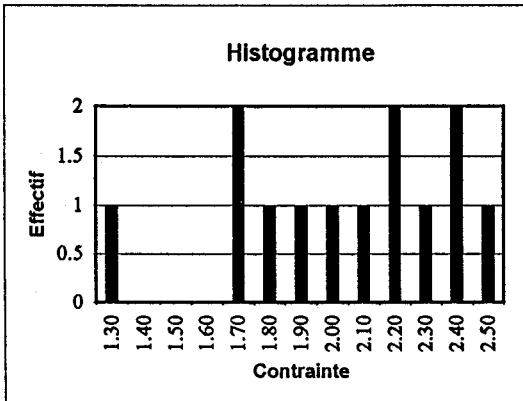
Moyenne : 2.00 GPa  
 SCE : 1.45  
 Variance : 0.12  
 Ecart-type : 0.35  
 CV % : 17.35  
 LPE : 0.21  
 Précision : 10.49 %

Xi	Y	Tend	Inv
0.11	-1.77	0.07	-1.5
0.15	-1.27	0.16	-1.3
0.18	-1.03	0.20	-1.1
0.20	-0.87	0.23	-1
0.23	-0.73	0.25	-0.8
0.26	-0.62	0.27	-0.7
0.28	-0.52	0.28	-0.6
0.30	-0.43	0.30	-0.4
0.32	-0.34	0.31	-0.3
0.34	-0.24	0.33	-0.2
0.36	-0.15	0.35	-0.1
0.38	-0.03	0.37	0.03
0.40	0.15	0.40	0.13

penne 1      ordonnée 1  
 0.17          0.37

penne 2      ordonnée 2  
 5.73          -2.15

Coeff. de Rég. : 0.96



Les droites de régression ont respectivement pour équation :

$$y = 5.73.x - 2.15$$

$$x = 0.17.y + 0.37$$

et mènent à un coefficient de corrélation de 0.94 : ce qui est correct.

Pour vérifier la théorie de Weibull, des essais de traction supplémentaires ont été réalisés sur la même fibre, mais à une longueur différente ( $l' = 40 \text{ mm}$ ). Pour cette nouvelle série, la pratique donne les résultats moyens suivants :

Force à la rupture : 21.73 cN

Ténacité : 181 cN/Tex

Contrainte : **1.76 Gpa**

Module d'élasticité : **56.8 Gpa**

En théorie, et en tenant compte de la valeur de  $m = 5.73$ , la contrainte pour cette nouvelle longueur de fibre devrait atteindre d'après :

$$\sigma_{12} = \sigma_{11} \cdot (l_1/l_2)^{1/m} = 2.03 \times (20/40)^{1/5.73} = \mathbf{1.79 \text{ GPa}}$$

### CONCLUSIONS :

Les résultats obtenus montrent donc que la distribution de Weibull peut s'appliquer à la fibre de PEHP.

Pour le cas du multifilament de PEHP (400 dTex - 390 brins), le banc de traction Statimat ME (Textechno H.Stein GmbH) installé dans le Laboratoire de l'E.S.A.A.T de Roubaix a permis de réaliser une série de tests plus conséquente (50 mesures) d'une façon automatique, et en continu. Les conditions opératoires requièrent une longueur de jauge de 500 mm avec une prétension de 0.5 cN/Tex, sous une cellule force de 100 N, et à une vitesse d'essai de 5000 mm/min. Les mors du type pneumatique agissent sur une longueur de maintien de 50 mm d'éprouvette, et permettent dans ces conditions de minimiser toute possibilité de glissement du matériau. Les résultats obtenus concordent visiblement avec les données avancées par le fabricant, puisqu'ils conduisent aux caractéristiques suivantes :

Ténacité (RKM) : 267.09 cN/Tex

Allongement : 3.33 %

Contrainte à la rupture : **2.59 Gpa**

Module d'élasticité : **78.5 Gpa**

Les différences importantes entre ces valeurs et les précédentes peuvent provenir des différences de conditions opératoires, en particulier de la vitesse d'essai. Mais nous avons constaté par ailleurs que les comportements des fibres et des fils sont différents.

### 2 / 3 / Caractérisation par propagation d'ondes longitudinales

Le but de cette technique est de déterminer le module dynamique d'un matériau par l'intermédiaire de son module sonique. En théorie<sup>17</sup>, d'après C.F. Zorowski et T. Murayama, la méthode est applicable aux fibres, mono et multifilaments, film, papier et tout autre matériau souple tel que tissu, enduit ou non, voire même non-tissé unidirectionnel.

Son principe<sup>18</sup> consiste à mesurer la vitesse de propagation d'une impulsion acoustique au travers de la section du matériau.

Mathématiquement, cette théorie répond à la formule suivante :

$$E = \rho \cdot C^2$$

où E représente le Module d'élasticité (Module d'Young),

$\rho$  = masse spécifique du matériau,

C = vitesse sonique.

Au niveau de l'interprétation des résultats, les tests peuvent conduire à la connaissance de propriétés spécifiques, telles que force, rigidité, élasticité. Les conditions opératoires permettent éventuellement de travailler dans une gamme d'hygroscopicité relativement étendue, et ce en adéquation avec l'utilisation ultérieure de l'article.

La littérature textile fait déjà référence à ce principe de mesure en 1944 par Ballow<sup>19</sup> et al, qui l'appliquent essentiellement sur les fibres, film et papier. Il faut attendre une vingtaine d'années pour voir mettre en pratique la théorie, grâce à Zorowski<sup>17</sup> et al, sur les filés de fibres, en prenant en considération la notion de torsion. Un modèle est alors proposé en considérant comme négligeable le comportement viscoélastique du matériau, et les résultats expérimentaux le rejoignent dans ces mêmes conditions. L'analyse mathématique à la base prend néanmoins référence dans un premier temps à un matériau du type monofilamentaire, linéaire et homogène en terme d'élasticité. On lui soumet une prétension  $F_0$ , comme illustré dans la Figure 7. Suivant la propagation d'onde longitudinale le long du filament, l'élément  $dx$  s'écartera de sa position initiale et sera légèrement étiré comme indiqué dans

la seconde phase. De ce fait, la tension variera au travers de l'élément  $dx$  dans le même rapport que l'accélération occasionnée, et cette variation se traduit par la seconde loi de Newton sur les déplacements :

$$\left( F + \frac{\partial F}{\partial x} dx \right) - F = (\rho A dx) \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (1)$$

$$\frac{\partial F}{\partial x} = \rho A \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (2)$$

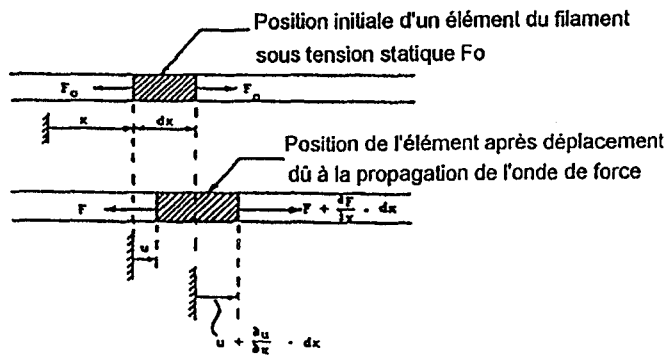


Figure 12 - Vitesse sonique : déplacement élémentaire dû à la propagation d'onde sur un filament

Pour un matériau linéaire élastique, en négligeant les effets de force transversale, la force longitudinale et la contrainte sont reliés par la loi de Hooke.

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad (3)$$

En considérant par ailleurs l'allongement uniforme au travers de la section de l'élément, la tension peut prendre la forme de l'expression suivante

$$F = \sigma.A = E.A.\varepsilon \quad (4)$$

L'élimination de  $F$  entre les équations 4 et 2 en terme de  $\varepsilon$  donne alors :

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial x} = \frac{\rho}{E} \times \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (5)$$

Il faut maintenant admettre que l'allongement  $\varepsilon$  puisse se décomposer en deux fractions bien distinctes : un paramètre constant dû à la tension statique initiale et un autre variable dû à la propagation d'ondes.

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon' \quad (6)$$

Le déplacement  $u$  de l'élément à partir de sa position initiale  $x$  dépend essentiellement du composant d'allongement variable. Il est défini par la relation :

$$\varepsilon' = \frac{\partial u}{\partial x} \quad (7)$$

En utilisant les équations 6 et 7 pour éliminer les composants liés à l'allongement, l'équation 5 prend la forme définitive :

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\rho}{E} \times \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (8)$$

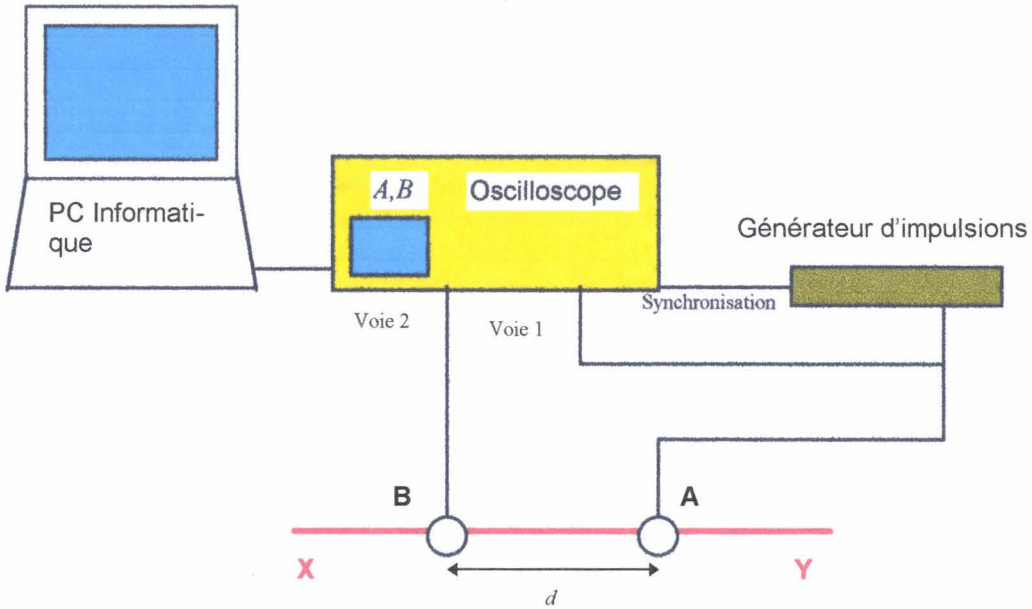
Cette équation représente l'équation différentielle générant une propagation d'ondes à une dimension planaire dans un matériau linéaire homogène élastique. Sa résolution donne le déplacement  $u$  d'un élément à partir de sa localisation initiale comme fonction du temps. La solution générale de cette équation peut être exprimée sous plusieurs formes mathématiques, dont l'examen révèle que la vitesse avec laquelle l'onde est propagée est donnée par :

$$E = \rho \cdot C^2$$

Il est à noter que pour un matériau linéaire élastique, la vitesse de l'onde est uniquement fonction des propriétés du matériau et n'est en aucun cas affectée par la tension statique initiale appliquée au filament.



**Schéma du Dispositif expérimental :**



**APPAREILLAGE :**

Le générateur d'impulsions du type Thandar TG 105 soumet par l'intermédiaire du transducteur A un signal au matériau, qui est ainsi transmis au capteur piézo-électrique situé en B. Sa récupération engendre un décalage dans le temps, que l'on peut analyser grâce aux courbes respectives A et B, dessinées par l'oscilloscope. Sa connexion avec l'outil informatique ne permet jamais que de sauvegarder les résultats, à seule fin de les exploiter ultérieurement au travers d'un tableur genre Excel. A ce stade, une étude relative au nuage de points obtenus et l'exploitation des droites de régressions correspondantes conduisent d'une part à la caractérisation de la structure linéaire en terme de module sonique, et d'autre part à la fiabilité ou non du test.

**Caractéristiques des appareillages utilisés :**

\* Capteurs piézo-électriques : matériaux cristallins qui ont la propriété de se déformer sous l'action d'un champ électrique. Du type sonore, ils sont constitués d'oscillateurs, appelés également "transducteurs".

Particularités :

- fréquence de résonance : 6.6 KHz
- niveau acoustique : 90 dB à 30 cm
- diamètre : 30 mm
- épaisseur : 4.5 mm
- fréquence fondamentale :  $f_0 = C/2e$   
avec C = vitesse du son dans le piézo-électrique  
et e = épaisseur de la lame piézo-électrique.

\* Générateur d'impulsions TG.105 : Il 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 : type TEKTRONIX 2211. Il possède une interface en série permettant la récupération des courbes sur ordinateur. La sortie de synchronisation du générateur 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, le signal est ensuite injecté sur l'entrée du déclenchement extérieur de l'oscilloscope.

**MODE OPERATOIRE :**

L'éprouvette sous forme de fil multifilamentaire (schématisée en rouge) est maintenue en tension entre les deux points X et Y. On y connecte les capteurs piézo *générateurs* A et *récepteurs* B placés à une distance *d* l'un de l'autre: cette dernière est variable dans la gamme de 5 à 25 cm avec un pas de 5. L'enregistrement des résultats se fait au travers de la courbe de réponse obtenue sur l'oscilloscope, en notant le  $\Delta T$  exprimé en microsecondes par rapport à l'impulsion de base, au niveau d'un point max. ou min., et ce en fonction de *d*. Le nuage de points obtenus alors est consigné sur un graphe dont la courbe  $\Delta T = k f(d)$ , représentative d'une droite, possède pour pente l'inverse de la vitesse sonique *V* (ou Célérité). Le module sonique ou dynamique du matériau est donné en application de la formule démontrée précédemment :  $E = \rho.C^2$

**Détermination expérimentale du module dynamique  
d'une éprouvette sous forme de fil multifilamentaire**

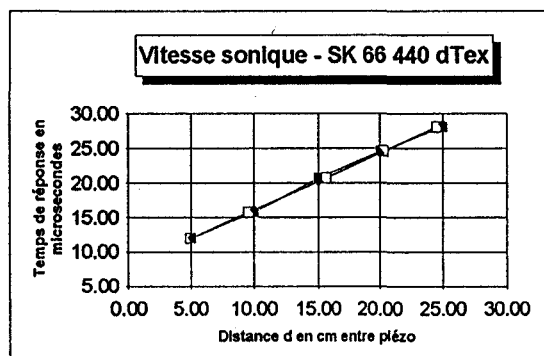
Le test s'est réalisé dans les conditions d'atmosphère suivantes : 55 % d'humidité relative - 20°C. Tension initiale sur l'éprouvette : 1 kg.

x en cm	T en $\mu s$	Tend	Tend inv
5	11.90	4.96	11.96
10	15.72	9.59	16.07
15	20.70	15.62	20.19
20	24.57	20.31	24.30
25	28.04	24.51	28.41

Tendance :  $x = 1.21y - 9.45$

Tendance inverse :  $y = 0.82x + 7.85$

Coefficient de Corrélation : 0.996



$V = 12100 \text{ m/s}$

Tableau 2 - Relevé de mesures expérimentales en vitesse sonique

### DISCUSSION :

a ) La vitesse de propagation de l'onde longitudinale pour le fil multifilamentaire à base de PEHP est très grande: 12100 m/s. Cette propriété doit être attribuée à la morphologie même de PEHP : Chaînes linéaires sans partie latérale étirées, en grande partie cristallisées en fibrilles.

b ) Le résultat obtenu selon ce procédé conduit à une valeur de module atteignant pour notre fibre un chiffre bien supérieur à celui obtenu par la traction uniaxiale (voir page 29). En effet, sa valeur avoisine ici les **145 Gpa**. Cette valeur est égale au double de celle du Kevlar.

En réalité, E croît quand le temps de sollicitation diminue. Ainsi, la valeur du module augmente de façon importante lors d'un impact. Cette propriété augmente les performances du matériau pour la résistance à l'impact. Nous avons par ailleurs réalisés des tests sur matériau souple du type tissu, ainsi que sur du non tissé unidirectionnel dans un souci d'établir une corrélation avec les essais de résistance à l'impact, qui seront abordés dans le chapitre § 4 - 2.

### 3 / Analyse morphologique de la fibre

#### 3 / 1 / Microscopies optique, à balayage électronique et à force atomique

##### 3 / 1 / 1 / Microscopie optique

Dans ce cadre, les explorations ont été réalisées sur microscope Nachet, dont le grossissement peut s'étaler dans la gamme de  $\times 160$  à  $\times 1680$ . L'appareil est équipé d'un système vidéo (caméra) relié à micro-ordinateur. Ces conditions offrent la possibilité de réaliser du traitement d'images et d'effectuer des mesures physiques (diamètres) au travers du logiciel PCScope. Le milieu d'immersion utilisé est à base d'un mélange d'alcool-glycérine, en proportion 50/50, ceci dans le but de provoquer un léger gonflement de la fibre, et favoriser son examen microscopique. En vue longitudinale, il est possible de déceler ici déjà la structure fibrillaire, et de confirmer par la même occasion le diamètre des fibres, qui, s'il s'agit d'éléments circulaires avoisine les  $12 \mu$ , évalués en théorie (p.16). A noter la structure en "peau de banane" du monofilament, qui autorise une épluchure et un affinage progressif du matériau. Il faut par ailleurs remarquer au passage la notion de « mariage de fibres », à laquelle il est fait allusion à la page 22, et imagé figure 13. Quant aux coupes transversales, elles nécessitent certes l'utilisation d'un microtome conventionnel, mais surtout d'un couteau à *lame de diamant*, afin de réussir à sectionner le matériau et obtenir une épaisseur d'échantillon avoisinant le micromètre. Au sein du laboratoire de l'ENSAIT il n'a pas été possible de confirmer la structure en forme de haricot, avancée par Oudet & Kausch<sup>20</sup>. Par contre les relevés de mesures physiques attestent la validité des résultats espérés en terme de finesse, donc de titrage.

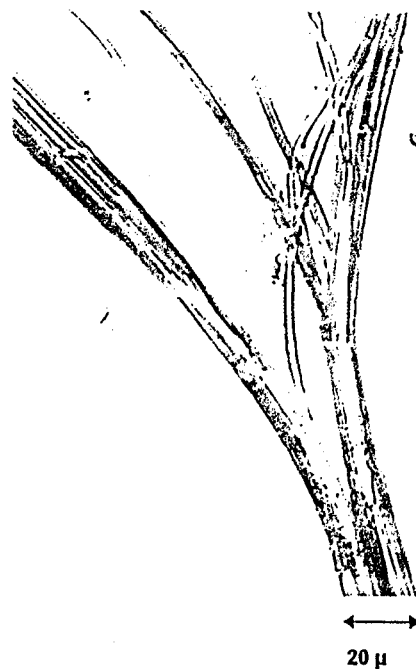


Figure 13 : Image d'un mariage de fibres

### 3 / 1 / 2 / Microscopie à balayage électronique

Les essais ont été effectués au Laboratoire SN3, de l'*U.S.T.L* grâce à la collaboration de Loïc Brunet. Le matériel a pour vocation initiale de travailler en transmission. Par la suite il a été équipé de l'option balayage, qui l'autorise à un grossissement maxi de x 40 000. Les préparations nécessitent une métallisation à l'or, afin de rendre l'échantillon conducteur avant de le bombarder d'électrons. Les conditions opératoires imposent d'opérer sous vide. L'appareillage présente les caractéristiques suivantes : JEOL 120 CX pour la partie transmission, Asid 4 D pour la partie balayage, Cond. Op. : 40 kV

Les figures 8 et 9 a - b représentent respectivement des monofilaments de PEHP vierge, puis ayant subi un effet de traction sans atteindre la rupture (soit un étirage), suivi d'un relâchement. La première laisse apparaître la structure fibrillaire décelée en microscopie optique. Les suivantes permettent de constater un effilement du matériau, accompagné d'une rupture de fibrille.



Figure 14 - MEB  
PEHP vierge - Gross : x 4000

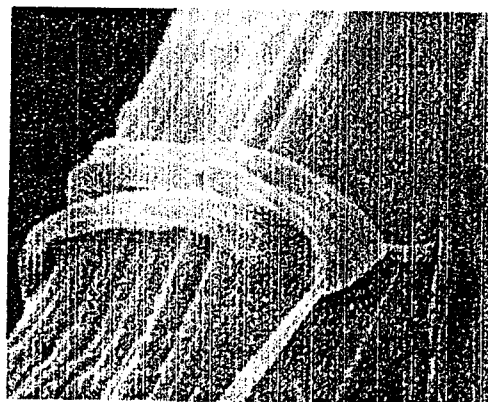
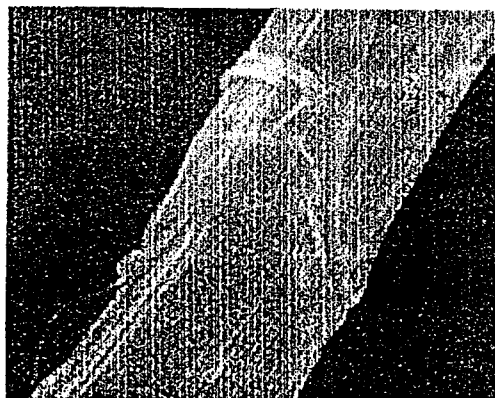


Figure 15 - MEB

a : PEHP étiré puis relâché Gross : x 2000

b : Idem - Gross : x 8000

### 3 / 1 / 3 / Microscopie à force atomique

Un nouveau concept de microscopie est né en 1982 avec la publication par G. Binnig et M. Rohrer<sup>21</sup> (prix Nobel de Physique 1986) des premières images de microscopie par effet tunnel (désigné par la suite par STM : Scanning Tunneling Microscopy). Ce microscope qui permet l'observation tridimensionnelle, dans l'espace réel, des surfaces avec la résolution atomique a considérablement modifié notre vision et notre compréhension des surfaces. Aussi son succès a-t-il été vif et sa propagation extrêmement rapide. Le microscope à force atomique (désigné par la suite AFM : Atomic Force Microscope) a été inventé par Binnig, C.F. Quate et Ch. Gerber en 1986, soit 4 ans seulement après le STM.

#### PRINCIPE :

Le principe de fonctionnement de l'AFM dérive directement du STM à savoir qu'en fait, dans les deux cas, il s'agit d'approcher une sonde au voisinage d'une surface et de mesurer localement et de manière contrôlée, l'interaction entre la sonde et la surface. Cette interaction concerne le courant tunnel dans le premier cas, et les forces interatomiques dans le second<sup>22</sup>.

#### MODE OPERATOIRE :

Un échantillon est fixé sur un conducteur piézo-électrique, pour être observé par une minuscule pointe pyramidale en  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , intégrée dans un cantilever. Pendant l'observation, les déflexions du cantilever sont proportionnelles aux variations de la force d'interaction entre la pointe et la surface.

Elles sont enregistrées par réflexion d'un faisceau laser sur un capteur optique de position, faisceau laser préalablement aligné sur la sonde du cantilever. Le conducteur piézo-électrique est guidé par un mécanisme électronique de rétroaction, qui contrôle la hauteur de l'échantillon.

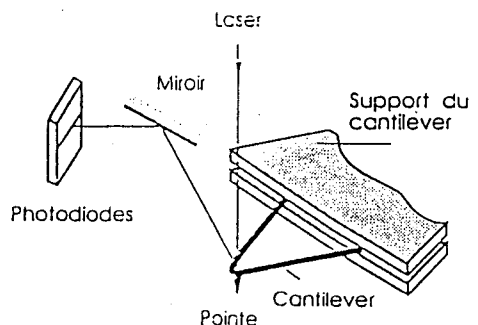


Figure 16 AFM - Tête de travail

Ainsi la pointe peut être observée au dessus de la surface avec une déflexion constante, et donc une force constante. Lors de l'engagement, l'échantillon est monté vers la sonde oscillante, dont l'amplitude décroît jusqu'à être égale à la valeur du point de réglage (Setpoint). Il y a alors engagement réel. Les échantillons ne nécessitent aucune préparation particulière. Ils peuvent être observés à l'air libre, dans des gaz ou des liquides, mais doivent être maintenus en place sur une surface plane à l'aide par exemple de colle de cyanoacrylate. Grâce à un interféromètre miniature qui se monte sur le détecteur piézo-électrique, le capteur peut maintenant se déplacer à la place de l'échantillon : la taille de celui-ci devient sans importance. Ainsi, seules la taille et la configuration de la sonde limitent la résolution de l'AFM<sup>23,24,25</sup>. Les données peuvent être stockées pour d'éventuelles analyses et recherches ultérieures.

### RESULTATS :

L'étude topographique du PEHP fait apparaître ici, au travers des clichés photographiques obtenus, la structure fibrillaire. Toutes les figures permettent effectivement l'observation de fibrilles orientées parallèlement à la direction de la fibre. Un relevé de mesures physiques donne des valeurs de diamètres de fibrilles comprises entre 25 et 45 nanomètres.

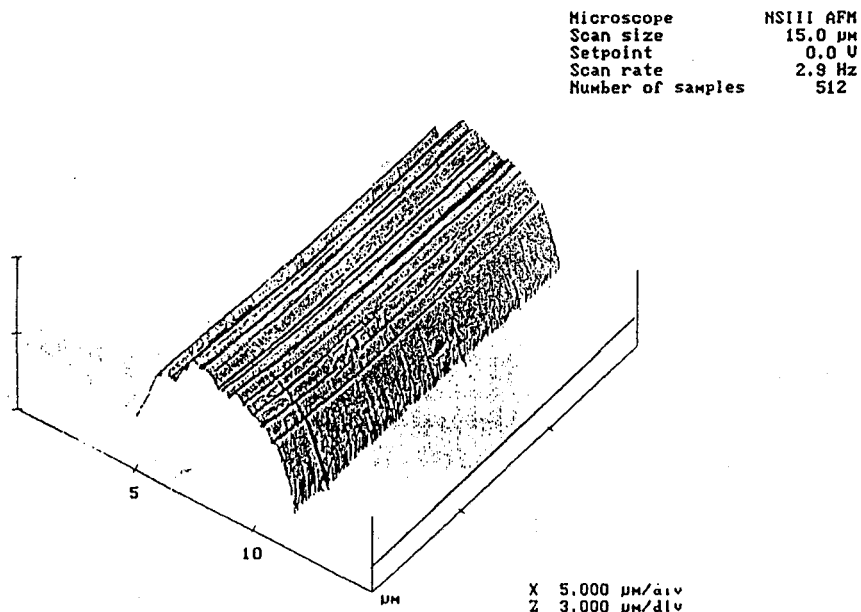


Figure 17 - AFM : Structure fibrillaire du PEHP

### Influence de la traction :

Une contrainte appliquée à un monofilament, sans toutefois atteindre la rupture, laisse apparaître après relâchement des *bosses*, qui accentuent le relief de la fibre et qui traduisent ainsi un changement d'état interfibrillaire. Certains éléments ont visiblement de la difficulté à reprendre leur place initiale lorsque cesse la sollicitation, et occupent en conséquence un espace inexistant à l'origine. Un surétirage provoque une modification de structure dans le sens d'une augmentation du nombre de fibrilles et d'un affinage simultané de celles-ci.

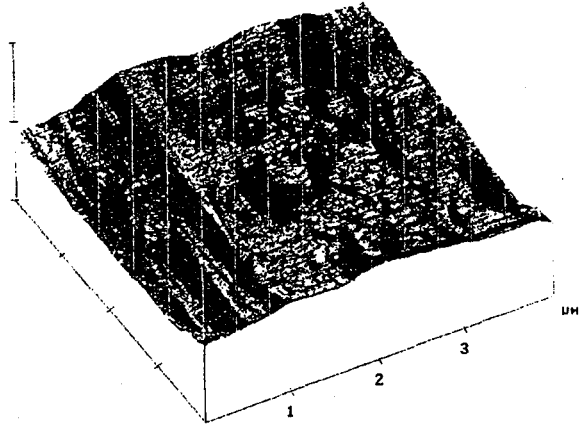


Figure 18 - AFM - Formation de "bosses" après traction.

### 3 / 2 / Rayons X

L'une des possibilités d'examen de la structure d'un polymère semi-cristallin consiste en l'utilisation de la technique de diffraction<sup>26</sup> des rayons X à grands angles. Cette dernière est un phénomène important pouvant servir à indiquer les positions relatives des atomes dans un solide cristallin. Elle permet ainsi de conduire à la connaissance de la structure du matériau. L'analyse de l'observation est basée sur l'équation fondamentale de Bragg, qui met en évidence la notion de réflexion sélective.

$$n \times \lambda = 2 d \times \sin \theta$$

où  $\lambda$  représente la longueur d'onde de la radiation,  
 $d$  la distance entre les plans parallèles dans les cristallites,  
 et  $n$  un coefficient entier.



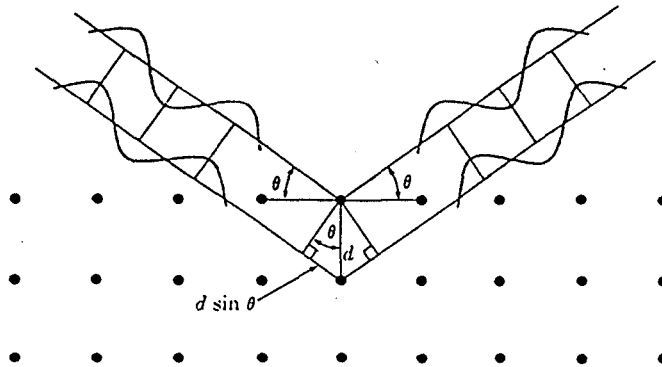


Figure 19 - RX : Diffraction obtenue de plans successifs d'atomes

Dans une configuration spatiale, la structure cristalline du PEHP peut être représentée schématiquement par la maille comme indiquée dans la figure 20. D'un point de vue plus symbolique encore, le schéma de droite représente une vue de dessus du même réseau, appelé orthorhombique dans la nomenclature des réseaux de Bravais. La littérature<sup>27,28</sup> mentionne que des expériences décèlent un degré de cristallinité d'environ 80 %, avec 75 % appartenant au réseau orthorhombique, 5 % au réseau monoclinique, le reste étant constitué par du matériau amorphe plus ou moins bien ordonné.

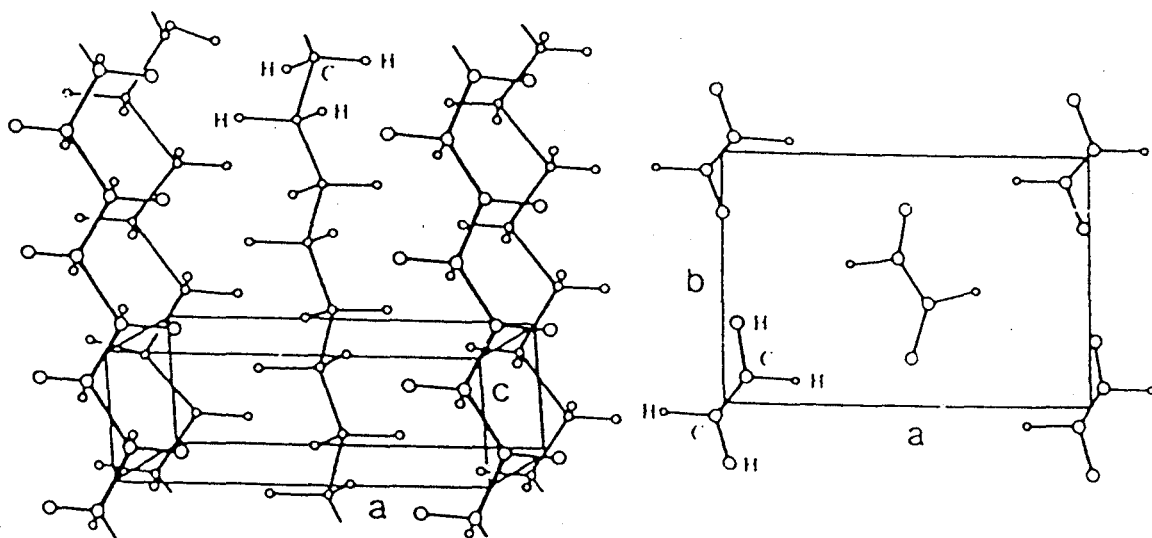


Figure 20 - RX : Structure cristalline du PEHP / Système orthorhombique

Il est à noter à cet effet que le PEHP est le siège d'une transformation martensitique orthorhombique - monoclinique. Elle s'effectue dans le sens monoclinique - orthorhombique, quand on chauffe jusqu'à une température<sup>28,29</sup> voisine de 130°C (voir Figure 22). Le phénomène semble irréversible, car, après refroidissement de l'éprouvette; et renouvellement de l'expérience déjà menée, il n'y a plus trace du phénomène. Inversement, elle s'oriente dans le sens orthorhombique- monoclinique, quand on exerce une contrainte<sup>30</sup> perpendiculaire à la direction des chaînes, ou une contrainte de cisaillement.

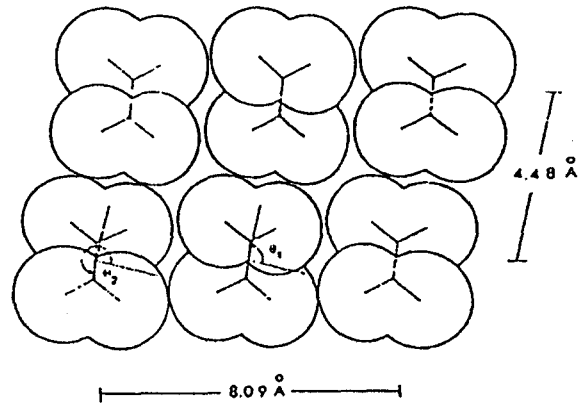


Figure 21 - RX : Système monoclinique

L'étude sera plus approfondie après les tests de résistance à l'impact, que l'on fera subir au matériau, mais sous forme cette fois de tissu ou de composites mono et multicouches. La transformation orthorhombique-monoclinique correspond essentiellement à un glissement d'une chaîne sur deux dans la maille cristalline<sup>30-33</sup>. On sait aussi que si l'on porte à 160°C le réseau orthorhombique d'un polyéthylène maintenu à l'état contraint, on a la transformation orthorhombique-hexagonal<sup>29,30,32</sup>, qui correspond essentiellement à une rotation d'une chaîne sur deux de la maille orthorhombique plus une translation, ce qui équivaut en définitive à un glissement hélicoïdal. Cette phase hexagonale est très proche de l'état amorphe.

Appareillage utilisé :

Détecteur multicanal CPS 120 d'INEL, sis au Laboratoire « Dynamique et Structure des Matériaux Moléculaires » de l'Université de Lille I (P5).

Conditions opératoires :

Durée du test : 2000 s

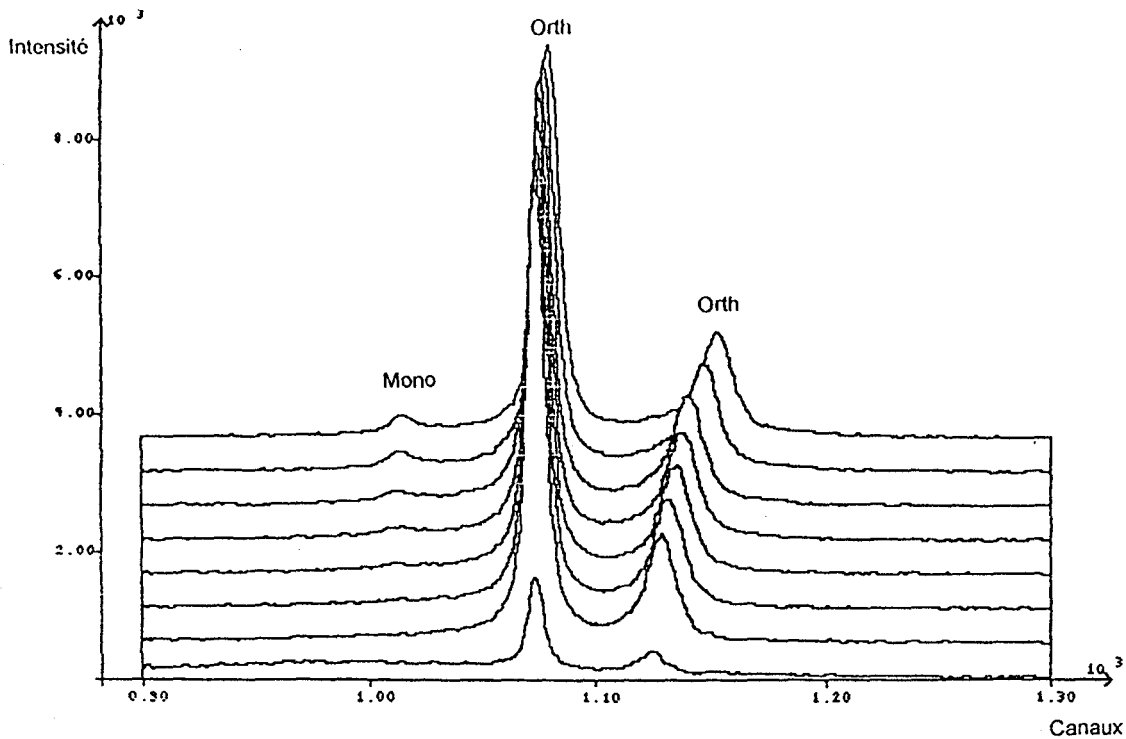


Figure 22- RX : Influence de la température.  
de haut en bas : 30°C, 60, 90, 100, 110, 120, 130, 140.

La figure ci-dessus illustre d'une façon concrète le comportement structural du PEHP énoncé précédemment, selon une augmentation de la température: Disparition du "monoclinique" au profit de "l' orthorhombique". L'irréversibilité du phénomène est à noter, car après refroidissement d'une éprouvette, elle conserve l'acquisition de l'état initialement constaté. Il est à noter par ailleurs qu'à l'approche de 140°, il y a décomposition de l'éprouvette par oxydation.

Une autre expérience illustrée en annexe permet de constater le phénomène inverse, eu égard à l'action d'une contrainte mécanique, et dans les conditions suivantes :

- 1 - éprouvette préalablement chauffée, puis étirée jusqu'à rupture,
- 2 - rupture en traction à température ordinaire,
- 3 - application d'une contrainte de traction, suivie d'un relâchement
- 4 - chauffage à 110°C essentiellement.

Une disparition du "monoclinique" est confirmée dans les cas 1 et 4. La réapparition est traduite par les courbes 2 et 3.

*Les chaînes peuvent tourner et glisser de façon relativement facile, sous l'action de la chaleur ou de contraintes mécaniques.*

#### 4 / Analyse par microcalorimétrie différentielle à balayage (DSC)

La microcalorimétrie différentielle à balayage (Differential Scanning Calorimetry) permet de caractériser l'état physique d'un polymère.

Le test consiste à mesurer l'énergie nécessaire au maintien de l'échantillon à la même température que la référence. La gamme de température s'étale d'une valeur voisine de  $-150^{\circ}\text{C}$  jusqu'à  $500^{\circ}\text{C}$ . Un courant d'azote permet d'éviter tout phénomène d'oxydation. L'éprouvette d'une masse d'environ 10 mg est placée dans une capsule d'aluminium percée. A l'issue du test, il est établi un thermogramme, comme représenté en figure 24, sur lequel il est possible de déceler les différentes transitions.

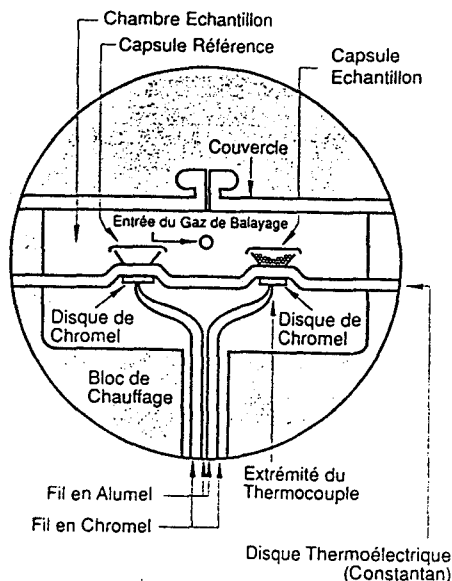


Figure 23 - DSC - Tête de travail

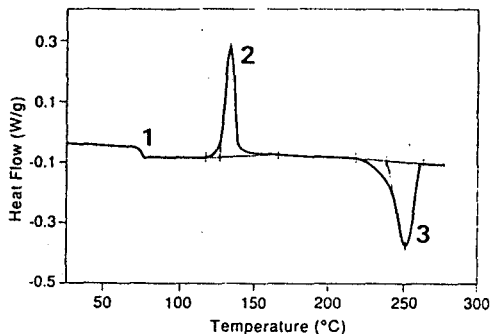
Une transition correspond au passage d'un état physique à un autre induit par un changement de température ou de pression. Pour les polymères, deux transitions sont possibles :

- la transition vitreuse correspondant au passage de l'état vitreux à l'état caoutchoutique,
- la fusion correspondant au passage de l'état cristallin à l'état liquide (phénomène endothermique). L'inverse représente la cristallisation (notion d'exothermie).

L'exploitation quantitative du thermogramme nécessite un certain nombre d'opérations (choix de la ligne de base, intégration, etc...) réalisées par l'ordinateur.

Figure 24 - DSC : Exemple de thermogramme

La transition vitreuse se manifeste par un simple changement de ligne de base (1) correspondant à une augmentation de la capacité calorifique du matériau lors du passage de l'état vitreux à l'état caoutchoutique. Cette transition est essentiellement liée au caractère amorphe du polymère.



Dans le cas du polyéthylène, la transition vitreuse se situe très au dessous de la température ambiante (vers  $-130^{\circ}\text{C}$ ). Il est difficile de la mettre en évidence par DSC.

La cristallisation se traduit par un pic exothermique (2). Elle peut avoir lieu soit lors du refroidissement du polymère fondu (les chaînes macromoléculaires s'arrangent alors selon un réseau prédéterminé par la nature du polymère), soit lors d'une montée en température (au-dessus de la température de transition vitreuse  $T_g$ , un polymère amorphe ou semi-cristallin peut cristalliser, du fait de la mobilité suffisante des chaînes). Dans le cas du Polyéthylène, la cristallisation est trop rapide pour être observable.

La fusion est liée au caractère cristallin du polymère, et se manifeste par un pic endothermique (3), dont l'importance est proportionnelle à la quantité d'énergie mise en jeu lors du changement d'état.

Le taux de cristallinité se mesure selon la formule suivante :

$$X \% = \Delta H_f / \Delta H_{f_{100}} \times 100$$

$\Delta H_{f_{100}}$  représente l'enthalpie de fusion du polymère 100 % cristallin.

Dans le cas du polyéthylène<sup>34</sup>,  $\Delta H_{f_{100}} = 282,15 \text{ J/g}$

Structure cristalline du Polyéthylène :

A partir de l'état fondu, le polyéthylène cristallise sous forme orthorhombique sphérolitique. Mais lorsqu'on réalise une fibre par étirement, il y a arrangement physique des chaînes. La morphologie sphérolitique devient fibrillaire. Les cristallites fondent alors à plus haute température. On sait que les fibres hautes performances de Polyéthylène comportent un faible pourcentage de monoclinique. Sous haute pression, en plus de la forme orthorhombique, on constate l'apparition d'une phase hexagonale<sup>35</sup>. Cette dernière peut apparaître dans les filaments contraints, portés à 160°C.

Expérience menée sur une éprouvette sous forme de fibres issues d'une bobine de fil multifilamentaire

Le test consiste en un premier cycle de montée en température dans une plage s'étalant entre 25 et 180°C avec une vitesse de 10°C/min., à la suite de quoi, après une phase intermédiaire de refroidissement jusque la température ambiante, on procède à une nouvelle montée en température.

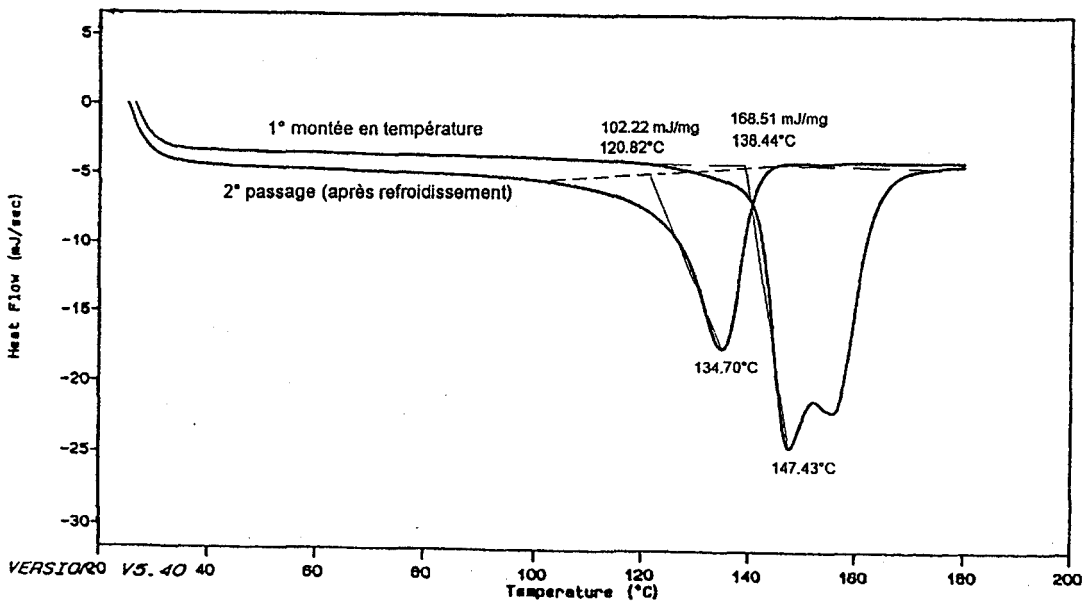


Figure 6 - DSC : Essai sur fibre élémentaire

*Conditions opératoires :*

- Référence échantillon : 430 bis*
- Masse de l'échantillon : 11,1 mg*
- Circulation de gaz : N2*

A l'issue de la première montée en température, on constate deux pics. Le premier d'entre eux représente la fusion de la phase orthorhombique fibrillaire, et a lieu à la température de 147,4°C. Le second est attribué quant à lui à la transformation de la phase orthorhombique en phase hexagonale et à sa fusion vers 158°C. Après fusion, le polymère recristallise sous forme orthorhombique sphérolitique, d'où l'apparition du troisième pic, à plus basse température (vers 135°C). Le taux de cristallinité de la fibre, initialement de 67 % environ, chute de façon considérable à une valeur avoisinant les 36 %.

La phase orthorhombique sphérolitique n'est pas aussi ordonnée que la phase orthorhombique fibrillaire. Au chapitre 3 / 2, des expériences de diffraction X à grand angle permettent d'affiner et de conforter ces premiers résultats sur la microstructure des fibres de Polyéthylène Haute Performance.

## 5 / Conclusions - Résumé

### Principaux Résultats :

- fibre très régulière, présentant néanmoins le phénomène de mariages de fibres détectable par le régularimètre.

- fibre organique avec haut module, haute résistance et allongement à la rupture de 3.1 %.

- vitesse de propagation d'ondes longitudinales exceptionnellement élevée ; d'où valeur très élevée du module quand la fibre subit un impact. Ce résultat permet d'entrevoir la performance exceptionnelle de la réponse à l'impact.

- Grâce à la conjonction de plusieurs phénomènes :

\* *simplicité de la structure de la chaîne; absence d'interaction latérale*

\* *morphologie fibrillaire,..*

, il y a possibilité de glissement et de rotation des chaînes, d'où :

\* *possibilité de transformation de phase,*

\* *possibilité de déformation plastique.*

### Conséquences :

La fibre Dyneema fabriquée par DSM High Performances Fibers (The Netherlands) et son homologue Spectra fabriquée par Allied Signal (U.S.A), appartiennent à la classe de Polyéthylène Haute Performance: PEHP.

Des propriétés exceptionnelles leur permettent d'envisager une longue carrière professionnelle. Effectivement, leur production industrielle relativement récente (1990) leur a déjà ouvert les horizons très variés que sont la protection individuelle, le sport et le loisir, pour ne citer que les principaux. Ce sont des domaines d'activités dans lesquels ces fibres excellent. On les rencontre aussi bien sur terre, que dans la mer ou même les airs:

- On les utilise dans la confection des tenues d'escrime, dans la réalisation des casques de motards, et des gilets pare-balles des militaires et policiers,..

- Elles parcourent les océans en guise de filets de pêche, ou même dans les câbles d'amarrage des plates-forme pétrolières.



- Enfin, on les rencontre en haute montagne sous forme de cordages d'alpinistes, ou même dans les parapentes, delta-planes et cerfs-volants.

*Elles allient à la fois les notions de performances et de protection.*

Elles côtoient la perfection dans leurs caractéristiques physico-mécaniques : régularité de titrage, valeurs élevées de module et de résistance spécifique, faible masse volumique,.....

Tous ces avantages vont dans le sens d'entrevoir pour elles de nouveaux débouchés encore. Leur avenir est donc très prometteur.

L'une des pistes envisagées s'oriente vers la recherche de nouvelles armures en tissage, dans un souci primaire d'amélioration de ce qui se fait déjà. Dans un second temps une application de résine en vue d'obtenir une enduction devrait permettre de pénétrer le domaine très vaste du matériau composite.

## **CHAPITRE 2**

### **Réalisation des tissus**

## SOMMAIRE

### 1 / Choix des armures et du matériel

1 / 1 / Test préalable à la mise en oeuvre - Voluminosimétrie

1 / 2 / Le métier à tisser à lance FATEX

### 2 / Plan de fabrication

2 / 1 / Quantité de matière nécessaire

2 / 2 / Mise en oeuvre

2 / 3 / Différentes opérations

2 / 3 / 1 / Ourdissage

2 / 3 / 2 / Rentrage

2 / 3 / 3 / Peigne

2 / 3 / 4 / Cartes de perçage

2 / 4 / Réalisation pratique

### 3 / Tissus commerciaux utilisés

### 4 / Conclusion - Résumé

### Références bibliographiques du Chapitre 2

## 1 / Choix des armures et du matériel

Nos premiers essais de résistance à l'impact ont été réalisés sur des échantillons à base de Polyéthylène Haute Performance, mis gracieusement à disposition par la Société Européenne de la Maille,... et de ce fait sous forme de tricots. En terme de protection, ce type d'article concerne le domaine du sport avec à titre d'exemple le cas des tenues<sup>36</sup> d'escrime, sinon les gants de bouchers voire même les tabliers de bûcherons. La protection touche donc dans ce cas, la notion<sup>37</sup> de coupe ou d'entaille. Les résultats ont vite démontré qu'il était préférable de s'orienter vers des tissus. Et c'est sous cette forme que DSM a proposé la matière d'oeuvre pour permettre la poursuite de nos travaux. Le nouvel inconvénient rencontré alors, a résidé dans le fait que ces nouvelles éprouvettes présentaient des caractéristiques vraiment dissemblables au niveau du tissage. Il a néanmoins été possible déjà à ce stade, de tirer des premières conclusions très intéressantes (cf. Chapitre 4 § 1 / 2). A seule fin de valoriser ces dernières, .... et surtout dans le souci de les concrétiser, il a été décidé de construire nos propres échantillons. A cet effet, il a fallu procéder dans un premier temps au choix de la matière première, et élaborer ensuite un plan de fabrication. Pour étudier l'influence de la construction du matériau et obtenir ainsi des points de comparaisons forts, le tissu a été réalisé à partir d'une même chaîne, avec une réduction unique mais selon 10 *armures* différentes (cf. Chapitre 2 § 2 / 2). Ce que l'on entend par *armure*<sup>38</sup> porte encore pour nom dans le jargon textilien, celui de *contexture*, et correspond en fait au type d'entrecroisement des fils, les uns par rapport aux autres. Parallèlement, chaque article a enfin été divisé en 4 parties afin d'observer l'action des enductions ultérieures. Le premier quart de tissu reste vierge de tout traitement pour jouer le rôle de témoin, alors que les 3 autres sont imprégnés respectivement de 3 résines époxy différentes : souple, semi-rigide et rigide. (cf. Chapitre 3 § 1 et 2). Eu égard aux caractéristiques et propriétés de la fibre Dyneema, passées en revue au Chapitre 1, et au domaine d'application, c'est le grade **SK 66**<sup>10</sup> qui a été retenu pour la mise en oeuvre des tissus, pour réaliser des éprouvettes destinées à subir les tests de résistance au choc par la suite. La réduction adoptée est de 16 fils par centimètre (Réduction Tissu Tombé de Métier, dont le symbole est  $R_{TTM}$

### Quelques définitions textiles :

En terme textile, un tissu est caractérisé par trois paramètres :

- la finesse<sup>39</sup> des fils qui le composent,
- la réduction<sup>40</sup> en Chaîne et en Trame,
- sa masse<sup>41</sup> surfacique.

La **finesse**<sup>39</sup> d'un fil est exprimée par l'intermédiaire de son titre, qui représente sa masse par unité de longueur. Référence aux normes, c'est le titre en Tex que l'on se doit d'utiliser. Il correspond à la masse en grammes par Kilomètre de matière. Il est à noter la possibilité d'utiliser des multiples ou sous-multiples du système.

On appelle **réduction**<sup>40</sup> le nombre de fils ou de duites, que l'on peut compter dans un tissu à l'unité de mesure, soit le pouce Tisserand (27 mm), soit le centimètre. D'où les expressions courantes de réduction Chaîne et de réduction trame.

La **masse**<sup>41</sup> **surfacique** est directement liée aux paramètres précédents ainsi qu'à l'armure de l'échantillon, qui correspond à l'entrecroisement des fils et des duites. Ces entrecroisements, a priori infinis sont classés en famille, classification faite d'après des bases offrant une certaine analogie. On les classe en armures fondamentales, auxquelles appartiennent taffetas, croisé et satin, ou dérivées et composées.

### Quelques définitions d'armures :

**La Toile**<sup>42</sup> : selon les centres manufacturiers, cette armure est appelée Toile dans le Nord, Taffetas dans la région lyonnaise, Drap à Verviers, Unis dans les Vosges. Au niveau construction, on l'obtient en faisant lever tous les fils de chaîne impairs au passage du premier fil de trame (*duite* en terme de tissage) et tous les fils pairs au passage de la deuxième duite. La toile n'a pas de flotté : elle est composée uniquement de grains constitués par un point, d'où grain le plus fin qui puisse exister. L'armure Toile donne à montage égal, le tissu<sup>43</sup> le plus solide. Le tissu correspondant n'a pas d'envers.

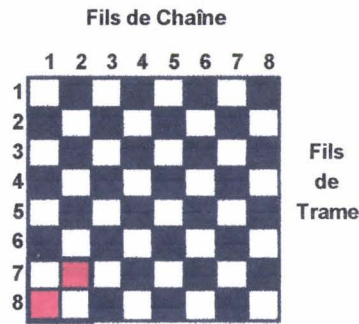


Figure. 26  
Armure Toile

Remarque : L'encart contenant des "carrés rouges" représente la configuration minimale d'une armure.

**Le Croisé<sup>44</sup>** : C'est un dérivé de Sergé, armure formée de flottés chaîne ou trame liés par un point suivant un décochement de un. Chaque duite passe successivement au dessus de plusieurs fils et au dessous d'un seul fil. La figure 27 représente un Sergé de 3 parce que sur la même duite, les points de liage se retrouvent tous les 3 fils. Mais on peut trouver des sergés de 4 ou même de 5.

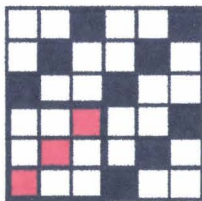


Fig. 27  
Sergé de 3

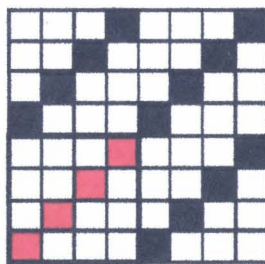


Fig. 28  
Sergé de 4

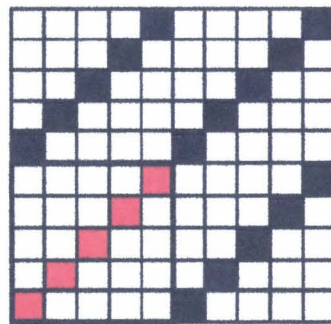


Fig. 29  
Sergé de 5

Cette armure présente des côtes saillantes séparées par des sillons obliques formés par les points de liage. De tels sergés présentent un envers. Plus le numéro du sergé est grand, plus longs sont les flottés de duites ou de fils présentant un risque d'accrochage mécanique. Des sergés réduisant ce risque, et ne présentant pas d'envers sont obtenus par l'armure de la figure 30., dite croisé 2 et 2 qui est celle des tissus lourds pour vêtements de travail.

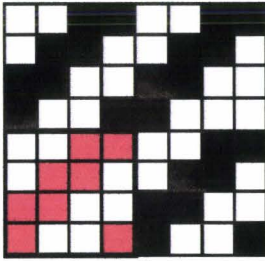


Fig. 30  
Croisé 2 x 2

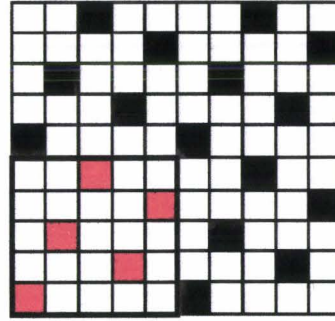


Fig. 31  
Satin de 5

**Le Satin**<sup>45</sup> : Cette armure comporte des flottés comme le sergé, mais les points de liage forment cette fois des lignes interrompues par des décochements de 2 ou 3 fils. La comparaison des figures 29 et 31 illustre la différence entre sergé et satin de 5. Il est aisé de constater que, par la disposition des points de liage, l'armure satin, à nombres égaux de fils et de duites (*réduction Chaîne et Trame*), et de titres identiques (*finesse*) est plus fragile que le sergé, lui même (sauf pour le sergé 2 et 2) plus vulnérable que l'armure toile. (Essais en traction Ch et Tr sur bandes de 20 cm de long et de 5 cm de large).

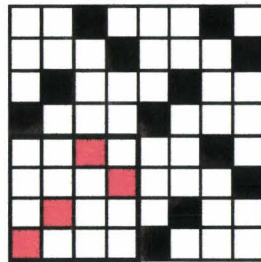


Fig. 32  
Satin de 4

Remarque :

D'après la définition même du satin, il n'est pas possible de pointer des satins de 4 et de 6. Cependant, on tisse des étoffes d'aspect satiné, auxquelles on donne le nom de "satins irréguliers". Le satin de 4, appelé autrefois le *satin turc* ne donne pas de "cordon", et c'est en réalité un sergé de 4, dans lequel 2 fils vont à droite et 2 fils vont à gauche, comme indiqué figure 32

### 1 / 1 / Test préalable à la mise en oeuvre - Voluminosimétrie

Ce paramètre *voluminosité du fil* fait partie intégrante de la caractérisation de base de la matière première, et trouve surtout un intérêt réel dans le cas des fils du type texturé (Ce n'est pas le cas ici en fait). Le but recherché consiste en la détermination du poids de matière par unité de volume, en tenant compte de la tortuosité ou torsion des filaments. Les interstices entre fibres font que ce ne peut être ainsi la même chose que la densité du matériau, ou encore la masse volumique.

Au niveau du tissage, et en particulier au stade de l'ourdissage, sa connaissance a surtout pour objet de permettre le calcul du déplacement du chariot du peigne de mise, lors de la juxtaposition des sections sur le tambour. L'appareil de laboratoire porte pour nom le voluminosimètre, et a été conçu par l'I.T.F. Il est constitué d'un moteur débiteur, qui entraîne le fil à vitesse réglable, jusqu'à un fléau de balance. Le mouvement de ce dernier est réalisé de manière à appliquer une tension constante au fil. C'est le critère le plus important. Le fil est ensuite rembobiné entre deux bagues solidaires d'un cylindre-support, dont le diamètre est inférieur à celui des bagues. Il se trouve ainsi ré-enroulé dans un volume limité par 3 côtés. Un capteur optique se trouve sous ce volume annulaire, et en définit la quatrième limite. Son déclenchement arrête le rembobinage lorsque le volume prédéfini est atteint. La pesée du calibre permet d'en déduire la voluminosité, qui s'exprime en  $\text{g/cm}^3$ .

L'étalonnage de l'appareil nécessite l'utilisation d'un anneau de contrôle du volume adapté. Sa position vis à vis du capteur est réglable par l'intermédiaire d'un ergot, qui permet la détection de son passage à chaque tour de rotation du mobile sur lequel il est monté.

Il est également possible de jouer sur la vitesse d'action à l'aide de pignons de commande interchangeables.

Enfin, la tension initiale affectée au fil est un facteur très important de manoeuvre, que l'on règle par adjonction de masselotes additionnelles au fléau, dont l'horizontalité doit être conservée en jouant sur le potentiomètre I. Afin d'interpréter les résultats par voie statistique, un relevé d'une dizaine de mesures s'avère indispensable.



Détermination expérimentale de la voluminosité  
du PEHP multifilamentaire :

Test réalisé en condition d'atmosphère standard : 65% HR - 20°C

Volume de référence : 7 cm<sup>3</sup>

Vitesse : 100 trs/min.

Contrepoids : 28g

Poids moyen sur 10 éprouvettes : 3.57 g

soit **Voluminosité moyenne : 0.51 g/cm<sup>3</sup>**

*Remarque : La valeur est bien inférieure à la densité.*

Les paramètres statistiques déduits de cette étude conduisent à une précision équivalente à 0.83 %, résultat très satisfaisant, pour le nombre d'essais effectués.

### 1 / 2 / Le métier<sup>46</sup> à tisser à lance FATEX

Cette machine a fait son apparition sur le marché vers les années 60 grâce à la Société Ancet Fayolle, d'origine Lyonnaise. A l'époque, son principe révolutionnaire a permis une exploitation industrielle immédiate avec un maximum de rendement et de rentabilité pour les entreprises.

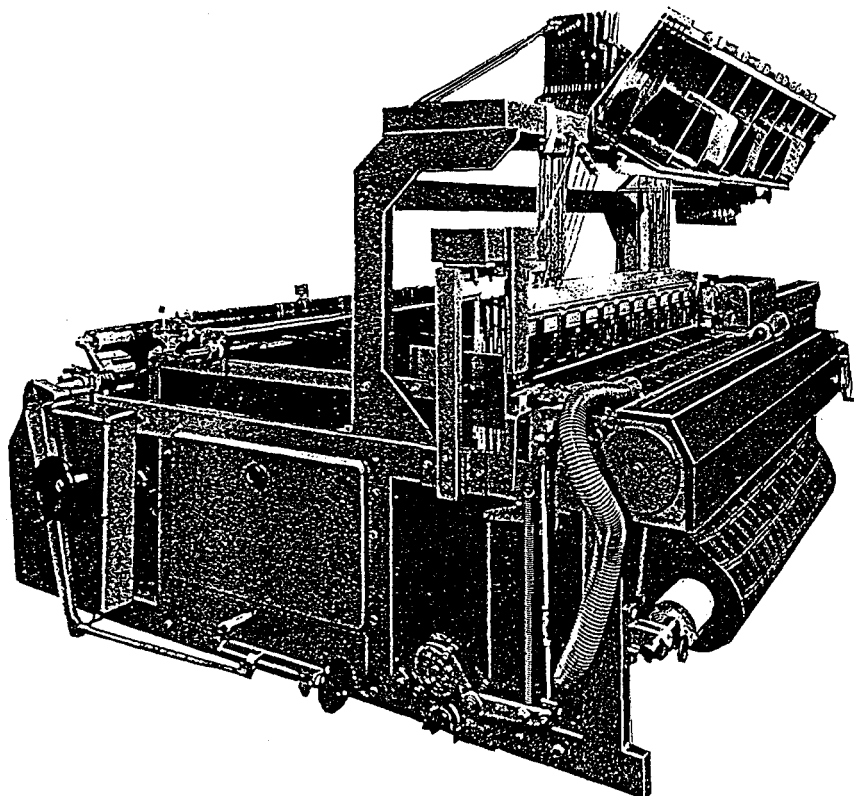
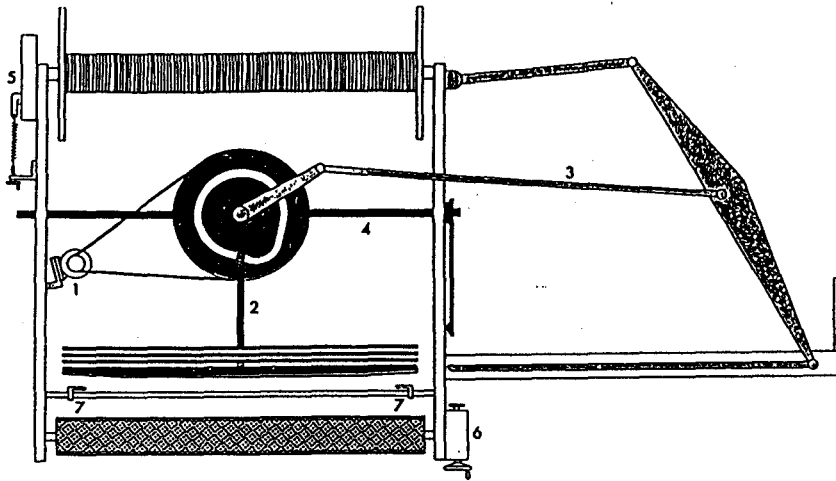


Figure 33 - Tissage - Métier à lance Fatex

Figure 34 - Tissage - Principe mécanique



1 Moteur. — 2 Mouvement du battant. — 3 Mouvement d'insertion de la trame. — 4 Mouvement de la mécanique d'armure ou de façonné. — 5 Donneur de chaîne hydro-magnétique. — 6 Régulateur. — 7 Mécanisme de formation des lisères.

Le principe de cette machine à tisser sans navette est du type « lance unilatérale », et offre de nombreux avantages, traduits par la Figure 34: il permet une alimentation de la trame par bobine, et du même coup la suppression du canetage. Le mouvement du fil de chaîne est par ailleurs réduit par la faible ouverture de foule. Celui du battant est très rapide et énergique : à noter qu'il ne s'effectue que sur 1/3 du cycle. La lance rigide, munie à son extrémité d'une pince, prend le fil présenté par la filière qui descend, et tire la trame à simple duite à travers toute la largeur du tissu dans un mouvement progressif: l'insertion de la trame se fait de ce fait en douceur, selon la courbe en « cloche » figure 36.

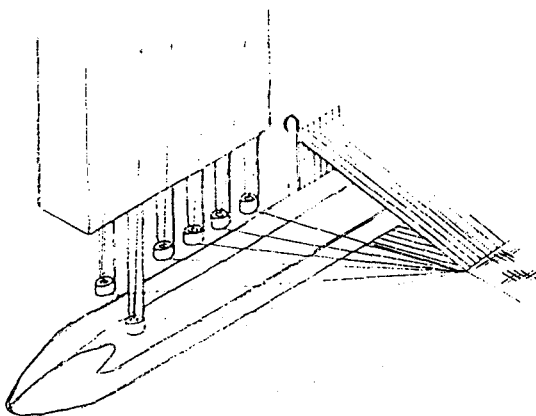


Figure 35 - Tissage - Sélection de duite

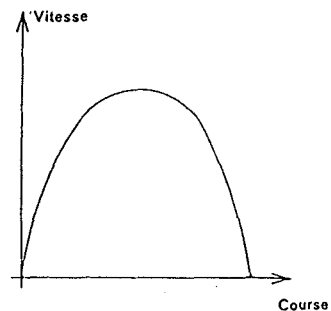


Figure 36 - Tissage - Insertion Trame

### CARACTERISTIQUES MECANIQUES

Course du peigne : 75 mm      Ouverture de foule au peigne : 25 mm  
Empeignage utile 160 cm      Vitesse industrielle : 115/125 coups/mn  
Régulateur à rochet.      Possibilité de réduction : 1,5 à 60 duites/cm

### REGLAGES

Couteau : à régler de façon à ne pas heurter la lance lors de son passage

Sélecteur de trame : à positionner en hauteur pour permettre à la pince d'attraper la duite.

Tension de la chaîne : veiller à la régularité du déroulement de la chaîne, à partir de l'ensouple.

Hauteur du cadre : à ajuster pour que la foule soit suffisamment ouverte, et de façon constante.

Course de la lance : supérieure à la largeur de laize.

## 2 / Plan<sup>47</sup> de fabrication

### 2 / 1 / Quantité de matière nécessaire

Comme indiqué page 52, la réalisation de 10 armures distinctes est prévue au programme, avec 3 types d'enductions pour chacune d'entre-elles. Le fait par ailleurs de conserver des éprouvettes « témoins » non traitées par l'enduction conduit ainsi à l'obtention de 40 échantillons tous différents. Les tests de résistance à l'impact nécessitent la confection de rondelles de tissus d'un diamètre de 9 cm. 10 semblent être un minimum pour interpréter les résultats par voie statistiques. Pour la traction, ce sont des bandelettes rectangulaires qu'il faut concevoir, aux dimensions de 30 x 5 cm, et ce aussi bien en chaîne qu'en trame. Dans ce cas également, 10 essais sont à prévoir. Ainsi, 30 éprouvettes occupent une surface théorique équivalente à :

$$S = 10 \times (\pi \times d^2)/4 + 20 \times (l \times L)$$

Application numérique :  $S = 10 \times (\pi \times 9^2)/4 + 20 \times (5 \times 30) = 3636.17 \text{ cm}^2$   
soient **0.3637 m<sup>2</sup>**

Compte-tenu des pertes éventuelles dues au placement des éprouvettes pour la découpe ultérieure, et à certains défauts possibles (casse chaîne, noeuds,...), un coefficient multiplicateur de 2 est pris en considération au titre de coefficient de réserve. Par ce fait, la production à assurer est estimée à environ 30 m<sup>2</sup>.

A partir de la même chaîne, et dans le souci d'obtenir le nombre d'armures initialement prévu de 10, le travail est conçu pour en fabriquer simultanément 3 sur la même laize (en fait 3 bandes de 50 cm) sauf pour la toile. Les lisières quant à elles seront respectivement tissées avec les mêmes armures que les bandes extérieures, et mesureront 5 cm. Soit une largeur de tissu « tombé de métier » de 160 cm.

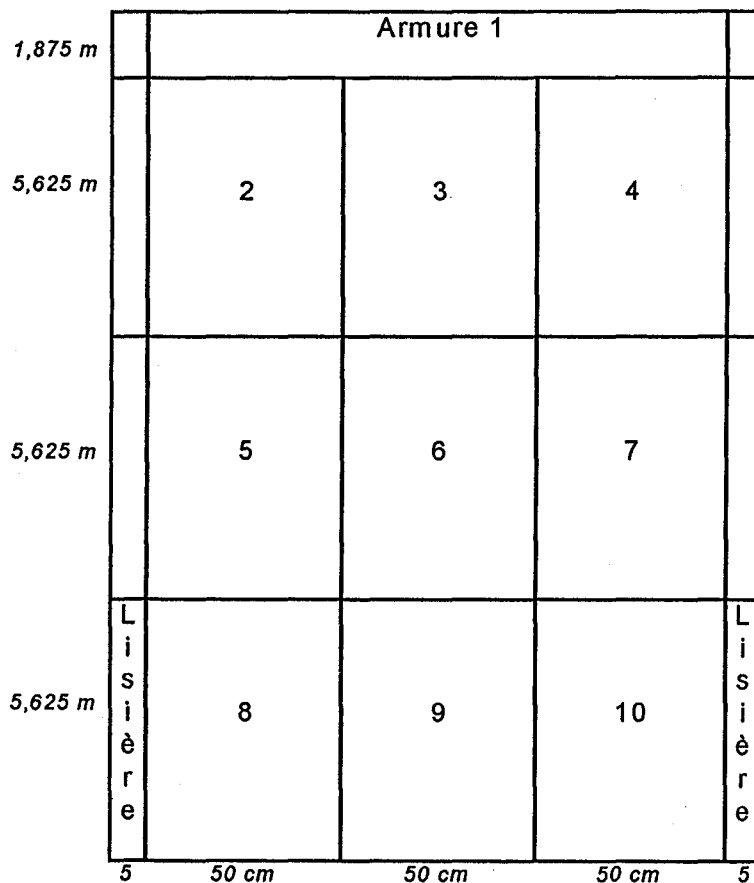


Figure 37 - Tissage - Répartition des différentes armures sur tissu.

Horizontalement, la bande du haut a pour base l'armure « toile », celle immédiatement en dessous, le « croisé 2 x 2 » (2), puis le « sergé de 6 » (6), et enfin le « satin de 5 » (10). Les 6 autres (3,4,5,7,8 et 9 ont été conçues en fonction de leur compatibilité avec les précédentes. (Voir les schémas d'armures p. 65).

**Calcul de la masse surfacique :**

Pour un tissu d'une largeur  $l_i$  (laize) et d'une longueur  $L_i$ , (dimensions en « Tombé de Métier », toutes deux exprimées en cm, la pièce pèse :

$$P = \frac{R_{cTTM} \times L_r \times l_i}{Nm_c} + \frac{R_{tTTM} \times l_e \times L_i}{Nm_t}$$

avec :

- $R_{cTTM}$  et  $R_{tTTM}$  représentant respectivement les réductions chaîne et trame (en nombre de fils/cm) du tissu en "Tombé de Métier",
- $Nm_c$  et  $Nm_t$  la finesse des fils de chaîne et de trame (en numéro métrique).
- et  $L_r$  et  $l_e$  les longueurs en m de fils utilisés pour la longueur et la largeur de la pièce, en tenant compte des notions de retrait  $r$  et d'embuvage  $e$ . A noter à cet effet que :

$$L_r = \frac{100 \cdot L_i}{100 - r} \quad \text{et} \quad l_e = \frac{100 \cdot l_i}{100 - e}$$

**Application numérique :**

Dans le cas de notre fabrication, les fils de chaîne et de trame sont identiques (cf Chapitre 1 § 2 / 1, p.16), tout comme les réductions d'ailleurs aussi bien en chaîne qu'en trame (cf Chapitre 2 § 1, p.52).

- $R_{cTTM} = R_{tTTM} = 16$  fils/cm
- $Nm_c = Nm_t = 22.72 = (1000/44 \text{ Tex})$
- $l_i = 1.60$  m       $L_i = 18.75$  m (en respect de la surface envisagée de 30 m<sup>2</sup>)
- $r = e = 10$  % (valeurs approximatives et théoriques, avant lancement de production). Elles sont toujours sur-estimées par rapport à la réalité.

Alors,

$$L_r = \frac{100 \times 18.75}{100 - 10} = 20.83 \text{ m} \quad \text{et} \quad l_e = \frac{100 \times 1.6}{100 - 10} = 1.78 \text{ m}$$

$$P = \frac{16 \times 20.83 \times 160}{22.72} + \frac{16 \times 1.78 \times 1875}{22.72} = 4697 \text{ g soit } 4.7 \text{ kg}$$

Pour conforter le calcul précédent, le poids au m<sup>2</sup> de l'étoffe s'obtient encore par la formule suivante : (pour une utilisation du même fil en chaîne qu'en trame, à partir d'une même réduction et en tenant compte des notions de retrait r et d'embuvage e :

$$P = R_{TTM} \times \left( \frac{100}{100 - r} + \frac{100}{100 - e} \right) \times \frac{100}{Nm}$$

Application numérique :

$$P = 16 \times \left( \frac{100}{100 - 10} + \frac{100}{100 - 10} \right) \times \frac{100}{22.72}$$

$$P = 156.44 \text{ g/m}^2$$

Pour des besoins de 30 m<sup>2</sup> de tissu, le poids de matière nécessaire à la réalisation de l'article est de 4693 g ou 4,7 kg.

## 2 / 2 / Mise en oeuvre

### Caractéristiques techniques du tissu :

Le nombre de fils nécessaires en chaîne est fonction de la largeur à tisser et de la réduction initialement envisagée.

$$n_f = l_{TTM} \times R_{cTTM} = 160 \times 16 = \mathbf{2560 \text{ fils}}$$

- Largeur du tissu « tombé de métier » :  $l_{TTM} = 160 \text{ cm}$
- Largeur du tissu sur métier :  $l_{TM} = 178 \text{ cm}$
- Réduction du tissu « tombé de métier » :  $R_{TTM} = 16 \text{ fils/cm}$
- Réduction du tissu sur métier :  $R_{TM} = 14.4 \text{ fils/cm} (2560/178)$

La quantité de matière première mise à disposition par DSM équivaut à 10 kg aussi bien pour la chaîne que pour la trame, et sous la forme de 4 bobines dans chacun des cas. Pour la chaîne, le fil accuse une torsion primitive de 60 trs/m; ce n'est pas le cas pour la trame. La longueur de tissu à réaliser étant relativement faible, un ourdissage sectionnel est préconisé, à partir de 64 sections de 40 fils (*compromis entre le nombre de cônes à rembobiner, et le nombre de sections à réaliser*), et selon le schéma suivant :

A	Lisière	1° Bande	2° Bande	3° Bande	Lisière
Sections	1° et 2°	3° au 22°	23° au 42°	43° au 62°	63° et 64°
Largeur en cm	5	50	50	50	5
Nombre de fils	80	800	800	800	80

Tableau 3 - Tissage - Répartition des fils de Chaîne

**Choix du Peigne :**

Le peigne est un appareil adapté à la partie supérieure du battant du métier (cf. Figure 34). Il permet le maintien de la largeur du tissu pendant sa fabrication: chaque duite a une longueur identique, et par le mouvement du battant, le tissu acquiert une densité uniforme. Le peigne frappe en fait les duites dans la foule pour les tasser les unes contre les autres.

Son choix s'effectue de manière à obtenir la réduction la plus proche de celle initialement choisie (ici, 14.4 fils/cm). Pour le métier à lance FATEX, on dispose d'un peigne de 600 broches par mètre: ainsi, avec un embrochage de 2,4 fils/broche, la réduction est respectée.

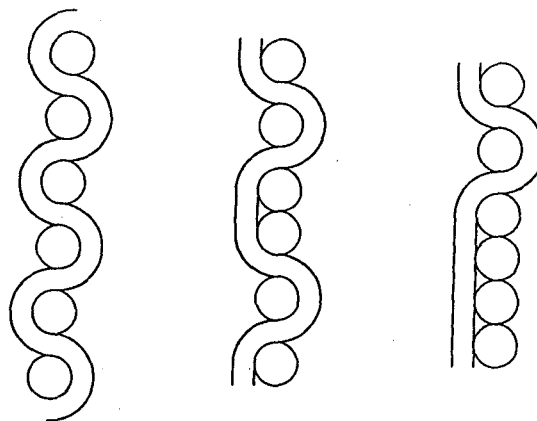
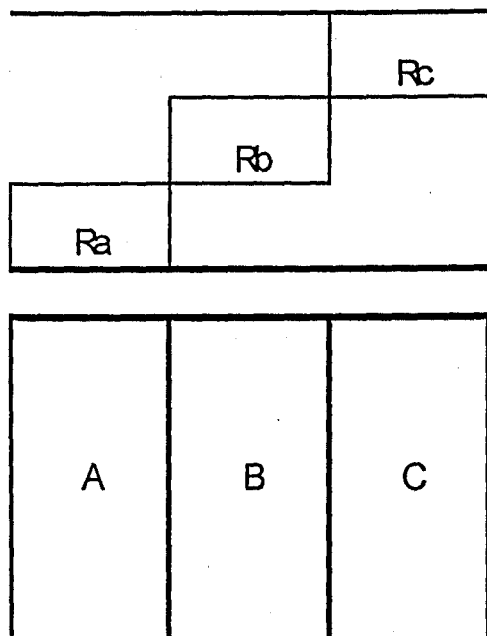
**Nombre de cadres :**

La capacité de ce métier est de 16 cadres. Afin d'avoir les raccords d'armures sur 4, 5 et 6 lames, 15 ont été utilisés.

**Choix des armures :**

Elles doivent être compatibles 3 par 3 en respect des prévisions énoncées au Chapitre précédent et illustrées par la Figure 24. Effectivement, selon les armures, la consommation de fil peut être totalement différente, eu égard à l'entrelacement des fils perpendiculaires. Elle est en fait directement liée au nombre de « levées ». Une levée correspond au passage d'un laissé à un pris entre 2 duites consécutives. Ainsi, pour éviter des différences de tensions entre les 3 sections, **la limite de tissabilité est fixée à 75 %** : pour être compatible, et donc pouvoir positionner 3 armures côte à côte, **le nombre de levées le plus petit doit valoir entre 0.75 et 1 fois le nombre de levées le plus grand.**

EXEMPLE



A	B	C
6/6*	4/6	2/6
100 %	66 %	33 %
	100 %	50 %

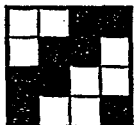
*Remarque \* Ce rapport résulte du calcul suivant : Numérateur = nombre de traversées réelles du fil - Dénominateur = nombre de traversées maxi.*

La toile, que l'on utilise le plus couramment est élue comme armure de référence. Vu son nombre de levées important, il s'avère difficile de trouver une homologue qui lui soit à la fois compatible et intéressante à étudier (car trop peu de différence, si le nombre de levées est quasi identique). Cette armure qui pose des problèmes de sous-tensions des fils de chaîne présente une limite de tissabilité maximale. Aussi est-il préférable de limiter sa longueur à tisser à la valeur de 1.875 m. afin d'éviter une augmentation des risques. Par ailleurs, la toile ne sera tissée que sur 2 bandes, puisqu'elle nécessite un raccord pair, alors que l'un des raccords se fait sur 5 lames. Les armures sélectionnées ensuite concernent le croisé 2x2, le sergé de 6 et le satin de 5, qui constituent les armures du type « basiques ». Les six autres ont été conçues en fonction de leur compatibilité avec les précédentes, comme prévu page 57. Elles sont illustrées à la page suivante.

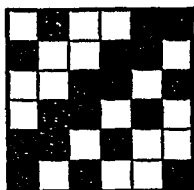




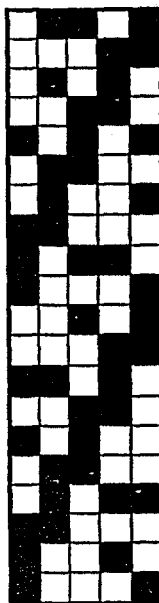
TOILE



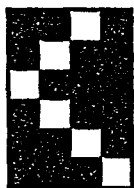
CROISE 2-2



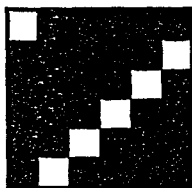
SERGE COMPOSE



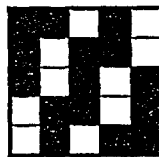
SATINE 3-7, MOTIF DECOCHEMENT 4



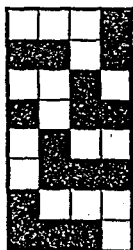
SERPENTINE  
BASE SERGE DE 4



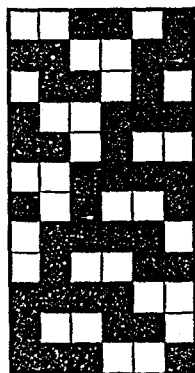
SERGE DE 6



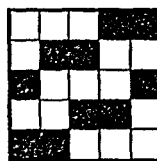
SATIN DE 5 A REPETITION  
SENS CHAINE



DIAGONALE 8/4  
DECOCHEMENT 2



DIAGONALE 12/6  
DECOCHEMENT 2



SATIN DE 5 A REPETITION  
SENS TRAME

TOILE		
CROISE 2x2	SERGE COMPOSE	SATINE 3-7 Décochement 4
SERPENTINE	SERGE de 6	SATIN de 5 à répétition Sens Trame
DIAGONALE 8/4 Décochement 2 2 1 1 2 1 1	DIAGONALE 12/6 Décochement 2 3 1 2 1 2 1 1 1	SATIN de 5 à répétition Sens Trame

RAP1/Chap2/Ref1.xls

Figure 38 - Tissage - Planification des armures

Un tableau en *annexe* indique les consommations et compatibilités des armures choisies.

### 2 / 3 / Différentes opérations

#### 2 / 3 / 1 / Ourdissage

Son but est de préparer la chaîne en disposant parallèlement les fils, en nombre plus ou moins important, et en longueur et tension constantes. Les fils se succèdent dans l'ordre établi par la feuille d'ourdissage, afin de se présenter dans le même ordre lors de la mise en oeuvre sur le métier à tisser. La méthode utilisée dans le cas présent est un **ourdissage sectionnel**, sur ourdissoir tambour.

#### Longueur de tissu :

Comme indiqué Figure 24, la longueur de tissu se décompose en 4 portions pour une valeur totale de 18.75 m : la toile est tissée sur 1.875 m, et les 9 autres armures sur 5.625 m chacune.

$$L_i = 18.75 \text{ m} \quad L_r = 20.83 \text{ m}$$

En tenant compte des pertes sur métier au titre de fin d'ensouple par exemple, et au travers des réglages de base, la dimension totale est évaluée à 25 m, ce qui impose 9 tours de tambour eu égard à son périmètre de 2.8 m.

#### Angle et embrochage du peigne de mise :

Ce réglage sert à définir la largeur qu'occupe une section de fils, sur un tour de tambour. Le peigne est en fait constitué de 2 bras mobiles, dont

l'angle d'écartement fixe cette largeur en fonction de la réduction du peigne et de l'embrochage.

$$\cos \theta = \text{Réduction Peigne} \times \text{embrochage} / R_{cTM}$$

avec : Réduction Peigne = 5 broches /cm

Soit  $x$  l'embrochage en fils par broche.

$$\Rightarrow \cos \theta = 5 \cdot x / 14.4$$

Pour $x = 2,$	$\theta = 46^\circ$
$x = 3,$	$\theta = \text{impossible}$
$x = 2,33$	$\theta = 36^\circ$
$x = 2,66$	$\theta = 22^\circ$

$\theta$  doit être inférieure à  $30^\circ$ . De ce fait l'embrochage de 2.66 réalisé avec 8 fils sur 3 broches convient selon la disposition suivante :

**3 fils - 2 fils - 3 fils**

**Déplacement du peigne de mise :**

$$\text{Déplacement} = \frac{\text{Nbre de fils/cm} \times \text{coefficient}}{\text{Nm fil} \times \text{voluminosité}}$$

avec : Nbre de fils/cm = 14.4

coefficient = 1.18

Nm fil = 22.7

voluminosité = 0.51 g/cm<sup>3</sup>

Dans ces conditions :

$$\text{Déplacement du peigne de mise} = 1.47 \text{ cm}$$

**Réglage des pignons de l'ourdissoir :**

Un tableau en *annexe* donne la valeur des pignons de l'ourdissoir en fonction de celle du déplacement du peigne de mise. Le résultat précédent impose la combinaison des pignons B, P et T.

**Largeur de chaque section :**

Il est prévu 64 sections de 40 fils chacune, avec les caractéristiques établies page 63.

$$l_i = 1.60 \text{ m} \quad l_e = 1.78 \text{ m}$$

D'où une largeur de section équivalente à :

$$l_s = 178/64 = 2.78 \text{ cm}$$

La feuille d'ourdissage donnée en *annexe* traduit l'évolution de la largeur ourdie, et permet ainsi de vérifier tout au long du travail le bon déroulement de l'opération.

**2 / 3 / 2 / Rentrage**

Cette opération consiste quant à elle à passer tous les fils de chaîne dans les lisses des différents cadres formant le harnais, et ceci dans un ordre défini au préalable. Le mouvement vertical des cadres provoque lors du tissage l'évolution des fils de chaîne en terme de « levés ou baissés ». Chaque cadre comporte donc un certain nombre de lisses, au travers desquels les fils sont introduits individuellement dans un oeillet : il y a autant de lisses que de fils. L'armure correspond au mode d'entrelacement des fils dans le tissu, et le rentrage, s'il est suivi donne alors un carton de perçage identique à l'armure elle-même. Dans notre cas, puisque la largeur du tissu est divisée en 3 parties, un rentrage suivi par corps s'impose (3 corps). 15 fils évoluent d'une façon différente, d'où la nécessité de 15 lames, à cause des raccords d'armures valant 4, 5 et 6. Le rentrage par corps consiste à diviser le harnais en plusieurs corps, et à rentrer en suivi les fils effectuant une évolution similaire, ou de même nature sur chaque corps qui lui est propre. La représentation schématique de toute cette lotion est illustrée en *annexe*.

**2 / 3 / 3 / Peigne**

L'embrochage théorique de 14.4 fils/cm se réalise du point de vu pratique en insérant 12 fils sur 5 broches selon la disposition suivante :

br 1	br2	br3	br4	br5
2 fils	3 fils	2 fils	3 fils	2 fils

Le peigne monté sur le métier de l'ENSAIT ne possédant que 1020 broches, il n'est pas possible d'y placer les 2448 fils de départ. Aussi a-t-il fallu concevoir l'élimination de 56 fils de lisière de chaque côté du tissu. Un embrochage ou un peigne différent aurait permis d'utiliser tous les fils prévus, mais cela aurait été au détriment de la réduction.

### **2 / 3 / 4 / Cartes de perçage**

Celles-ci permettent de définir le mouvement des cadres. Comme mentionné plus haut, le rentrage étant suivi, la carte de perçage est strictement identique à l'armure. Elle se réalise sur une machine de piquage. Le perçage est effectué 2 duites par 2 avec un minimum de 84 duites à réaliser. On sélectionne un « pris » en perçant le carton à l'endroit correspondant, et inversement toutes les duites non percées sont par voie de conséquence des « laissées ». 4 cartons de 120 duites ont été conçus, en harmonie avec la planification exposée figure 38.

### **2 / 4 / Réalisation pratique**

En terme de production, si la vitesse du métier est estimée à 100 coups/min, avec une réduction trame de 16 duites/cm, la machine fabrique du tissu à raison de 375 cm/h ( $: 100/16 = 6.25 \text{ cm/min}$ )

Les besoins de l'étude évalués à 25 m nécessitent donc un temps d'action équivalent à :  $2500/375 = 6.66 \text{ h}$ , soit **6 h 40 min**

#### **Problèmes rencontrés en cours de réalisation :**

Par son absence d'élasticité, ce genre de fil est peu adapté à ce type de métier. La surtension des fils de chaîne a provoqué en cours de fabrication une casse du pignon d'entraînement du tissu sur le cylindre d'appel en sortie. Le pignon de rechange non conforme au précédent a du coup imposé un nouveau réglage à ce niveau. La grande ténacité du matériau de base n'a occasionné que très peu de casses en chaîne en vitesse de croisière. Néanmoins, un blocage visiblement insuffisant de l'ensouple a entraîné sa chute, suscitant par là même des casses multiples en chaîne, par accrochage de la lance lors de son passage suivant

l'incident. Dans la foulée, cette dernière s'est vu freinée par contact final contre le couteau, qui en marche normale sectionne le fil de trame. Ce dernier s'est lui-même trouvé endommagé et a nécessité son remplacement. A ce niveau d'ailleurs, il est à envisager un autre système de coupe, vu les performances mécaniques du matériau travaillé : l'idée va dans le sens d'une adaptation d'un système thermique (du style fer à souder) à monter à chaque lisière.

La compatibilité de la toile avec toute autre armure est difficilement concevable, et entraîne un problème de sur-tension sur un côté du métier. La fin du tissage de la toile a nécessité de ce fait un nouveau réglage de la machine.

### **Le produit sortant :**

La caractérisation du tissu réalisé est détaillée au Chapitre 4. Elle concerne la traction uniaxiale en Chaîne, en Trame, la résistance à l'impact, et la propagation sonore.

## **3 / Echantillons commerciaux utilisés**

Dans l'optique de procéder à un point de comparaison cette fois entre fibres de natures différentes (PEHP, Kevlar, verre), nous avons utilisés des tissus disponibles sur le marché. Pour les confronter entre eux, l'idéal est d'utiliser des échantillons de même grammage, de même armure et faits à partir de fibres de même titre. Malheureusement, il est difficile de se procurer de tels articles sur le marché. Aussi, avons-nous opté pour ceux qui se rapprochent le plus les uns des autres. A cette fin, ce sont des tissus de même grammage (175 g/m<sup>2</sup>) qui ont été utilisés. Les caractéristiques des fibres et tissus offerts par les fournisseurs figurent dans le tableau de la page suivante. De son analyse, il ressort qu'effectivement, si les fils n'ont pas le même titre, la différence de réduction des articles tissés fait qu'en conséquence, les matériaux ont néanmoins pratiquement la même masse surfacique. A noter en définitive, que ces articles sont destinés à entrer en composition dans les matériaux

composites prévus à partir des matrices détaillées dans le Chapitre 3, et ce sous la forme d'échantillons multicouches.

Nature	PEHP 1 et 2	Polyaramide	Verre
Dénomination Commerciale	Dyneema SK 66	Kevlar 49	Silionne Verre E
Module d'Young E (en GPa)	99	130	73
Module de Coulomb G (en GPa)	3	12	30
Coefficient de Poisson	0.3	0.4	0.25
Titre (en dTex)	440	1270	680
Ténacité (en cN/Tex)	330	205	135
Armure	Toile	Satin de 4	Toile
Réduction (fils/cm)	R x R	6.6 x 6.6	12 x 11

Fig. 39 : Tissage - Caractéristiques des fibres et Tissus.

Ces articles destinés à subir une enduction, vont donc former des stratifiés "multicouches", tels que présentés en page 81. Pour la suite, ils seront spécifiés selon les références ci-après :

PEHP1 : Article 505 / Filaments SK 66 - Réduction : R = 17.5 x 17.5 fils/cm

Masse surfacique : 175 g/cm<sup>2</sup>

PEHP2 : Article 506 : / Filaments SK 66 - Réduction : R = 16 x 16 fils/cm

Masse surfacique : 145 g/cm<sup>2</sup>

*Rappel : La fibre Dyneema SK66, préférentiellement conseillée dans le domaine<sup>10</sup> balistique présente un titre qui lui permet d'être utilisée pour des tissus de faible masse surfacique.*

## 4 / Conclusion - Résumé

Dans un souci permanent de trouver une amélioration, aussi minime soit elle, vis à vis de l'existant dans le domaine de la protection, *et en particulier au niveau de la conception des gilets pare-balles*, il a été décidé d'essayer de réaliser des tissus susceptibles de dépasser les performances de la toile. L'utilisation courante de cette armure simple pour ce type d'article ne se justifie jamais que par un nombre d'accrochage maximum entre les fils de chaîne et de trame : cet argument va effectivement dans le sens d'une résistance à l'impact satisfaisante. Or la propagation de l'énergie dissipée par le projectile doit par ailleurs et paradoxalement se trouver ralentie à cause de cet entrelacement excessif des différents fils. N'utilise-t-on pas effectivement dorénavant des articles du type non-tissé unidirectionnel du style UD pour favoriser ce dernier point ?

Eu égard à cette réflexion, et dans la préoccupation de minimiser l'influence d'un nombre de paramètres trop important, sur un même métier à tisser, et à partir d'une chaîne identique, 3 armures fondamentales ont permis de réaliser une dizaine d'éprouvettes toutes différentes les unes des autres.

*La mise en oeuvre ne s'est pas réalisée sans rencontrer d'obstacles.*

*Le PEHP impose des conditions opératoires matérielles  
en rapport avec ses performances intrinsèques.*

Le point de comparaison des différents produits obtenus porte, on le verra dans le chapitre 4, en particulier sur la résistance à l'impact.

Le domaine du matériau composite est abordé quant à lui au chapitre 3, selon deux aspects :

- Dépôt de résine en monocouche du type enduction sur les éprouvettes tissées par nos soins.
- Réalisation de stratifiés du type multicouche sur éprouvettes commerciales.



**CHAPITRE 3**  
**Etude des formules d'enduction et**  
**réalisation des composites souples et rigides**

## **SOMMAIRE**

### **1 / Les produits d'enduction ou matrices**

1 / 1 / Polyester insaturé

1 / 2 / Produits à base d'époxydes

### **2 / Formulations**

### **3 / Mise en oeuvre - Application**

3 / 1 / Technique par Foulardage - Taux d'exprimage

3 / 2 / Traitement de surface

3 / 3 / Moulage des plaques

### **4 / Découpe des éprouvettes**

### **5 / Caractérisation - DSC**

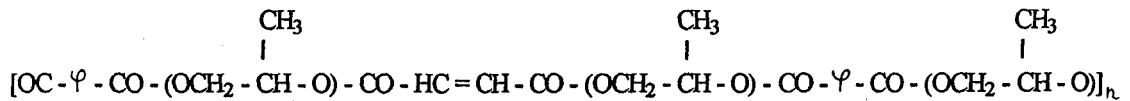
### **6 / Conclusion - Résumé**

## 1 / Les produits d'enduction ou matrices :

Au sujet des matrices organiques utilisées, l'une est à base de polyester insaturé, et l'autre à base de prépolymère époxyde.

### 1 / 1 / Polyester insaturé

Le produit utilisé est la résine **G102E** de la société **NESTE** (équivalente à la **PRESTER 1004**). C'est un mélange de styrène et de prépolymère insaturé. Le prépolymère<sup>48</sup> est issu de la condensation entre les anhydrides ortho-phthalique et maléique avec la 1-2 Propane diol; le motif constitutif s'écrit :



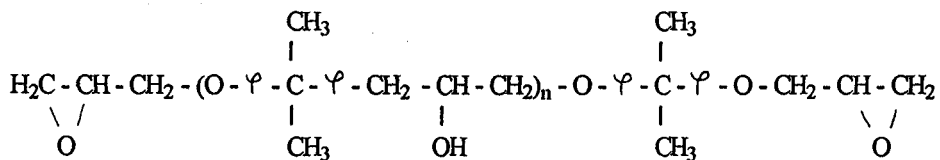
Remarque : Fonctions  $\varphi$  en position ortho

$M_w = 2000$  g/mol.

La polymérisation est du type radicalaire avec pour amorceur le peroxyde de Méthyl-Ethyl-Cétone. La quantité introduite dans la résine est de 1 % en masse. Le mélange sera par la suite mis en étuve pendant 2 h à 80°.

### 1 / 2 / Résines époxydes

Le second type de matrice est obtenu à partir d'un prépolymère époxyde (DGEBA) et d'un durcisseur aminé. Dans le cas des enductions réalisées sur tissu "monocouche", trois types de réticulats ont été utilisés : un souple, un semi-rigide et un rigide. Pour les "multicouches", seul le rigide a été testé. Dans chacun des cas, l'époxyde est la **DER 332** de **DOW CHEMICAL**. Il s'agit du Diglycidyl-Ether du Bisphénol A (DGEBA) :



Remarque : Fonctions  $\varphi$  en position para

$n = 0.03$

Les amines employées sont toutes trois des **Jeffamines** fabriquées par la société **TEXACO** : la D400, la D2000 et la T403.

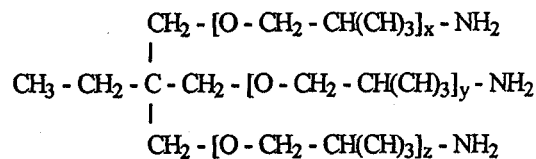
La D400 et la D2000 sont des diamines<sup>49</sup> ayant des formules similaires, avec des valeurs de x différentes :



avec pour la D400,  $x = 5.6$

et pour la D2000  $x = 33.1$

La T403 est une triamine<sup>50</sup> dont la formule s'écrit de la façon suivante :



avec  $x + y + z = 5.3$

### 1 / 2 / 1 / Epoxy souple

Le réticulat souple utilisé est un mélange de DGEBA avec les diamines D2000 (67.15 %) et T403 (32.85 %). Les quantités sont exprimées en masse conformément au document<sup>51</sup> en référence bibliographique.

### 1 / 2 / 2 / Epoxy semi-rigide

Dans ce cas le mélange utilisé est constitué de DGEBA, D400 (40 %) et D2000 (60 %) conformément au même document<sup>51</sup>.

### 1 / 2 / 3 / Epoxy rigide

Seules la DGEBA et la D400 interviennent ici. Le réticulat obtenu a un Tg de l'ordre de 37°C, mesuré par DSC. Cette analyse a par ailleurs permis de déterminer les taux d'avancement de la polymérisation. Une cuisson est réalisée sur l'appareil, pour permettre l'obtention d'une courbe de référence. Le traitement consiste en une montée en température de 25°C à 250°C, à la vitesse de 10°C par minute.

L'aire du pic de cuisson  $\Delta H_0$  correspond alors à un taux d'avancement de 100 %. On soumet alors des échantillons de réticulats ayant polymérisé dans d'autres conditions de durée au même traitement thermique, afin de mesurer leur enthalpie de cuisson résiduelle  $\Delta H$ .

Soit le rapport :

$$X = (\Delta H_0 - \Delta H) / \Delta H_0$$

X donne le taux d'avancement.

Les courbes de DSC se trouvent en annexes. On obtient le tableau de résultats qui suit, duquel il est possible de faire la constatation suivante : un traitement d'une durée de 2 h à 80°C permet d'atteindre un taux d'avancement supérieur à 95 %. C'est la raison pour laquelle ces conditions opératoires ont été adoptées pour la polymérisation de tous les échantillons.

<sup>T1</sup>	Référence	2 h à 80°C	2 h à 80°C puis 2 mois à 25°C
Delta H cuisson (J/g)	-243.99	-11.42	-14.52
X en %	100	95.31	94.04

Tableau 4 - DSC : Conditions opératoires optimales

## 2 / Formulations

Elles sont effectuées conformément aux stoechiométries de réactions, en tenant compte des fonctionnalités des amines. Dans ces conditions, les calculs conduisent aux valeurs centésimales suivantes :

<sup>T2</sup>	DGEBA	D400	D2000	T403	Total
Souple	36.7		33.5	16.4	100
Semi-rigide	47.4	21	31.6		100
Rigide	63.3	36.7			100

Tableau 5 - Enduction : % des constituants

Afin d'améliorer la fluidité du mélange, la DGEBA est légèrement chauffée avant d'entrer en contact avec l'amine. Le mélange des produits se fait juste avant la mise en oeuvre sans ajout de solvant.

### 3 / Mise en oeuvre - Application

#### 3 / 1 / Technique par Foulardage - Taux d'exprimage

Cette technique<sup>52</sup> a été employée essentiellement dans le cas des échantillons enduits en "monocouche", et par l'intermédiaire des résines époxydes du type souple, semi-rigide et rigide.

Le dépôt des produits sur tissu s'opère par l'opération de foulardage<sup>a</sup>, afin d'éviter tout début de réticulation. L'application s'effectue au foulard sans ajout de solvant, avec un taux<sup>b</sup> d'exprimage  $T_{exp}$  avoisinant les 80 %. La cuisson nécessite une durée de 45 minutes à 1 heure à 100°C pour le PEHP et seulement 15 minutes à une température de 180°C pour le Kevlar.

<sup>a</sup> Le foulardage est un traitement de teinture en pièces à la continue. Il consiste en une imprégnation du textile, immédiatement suivie d'un exprimage entre des rouleaux dont la pression est variable selon les textiles et la hauteur de ton du colori désiré.

<sup>b</sup> Le taux d'exprimage représente la quantité de bain emmené par le textile après passage au foulard. Il s'exprime en pourcentage de la masse sèche initiale du textile.

$$T_{exp} = 100 \times (m_f - m_i) / m_i$$

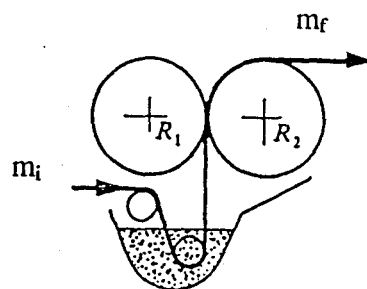


Fig. 40 - Enduction : Foulard

Pour des armures à texture lâche du type Sergé de 6, il est difficile d'obtenir effectivement des taux d'exprimage de 80 %, car le tissu est vite saturé de résine, d'autant plus que sa mouillabilité est très réduite. Après imprégnation, les tissus enduits sont posés à plat sur des plaques d'aluminium préalablement cirées pour éviter tout risque d'adhérence. La cire utilisée est la cire de démoulage **54D ABEL-BONNEX**. Les échantillons ainsi

disposés ne sont pas susceptibles de se déformer lors de la polymérisation, et toute migration de résine encore peu visqueuse est alors évitée.

### 3 / 2 / Traitement de surface

De par sa structure chimique non polaire, le polyéthylène n'offre pas de mouillabilité ni de possibilité d'adhérence chimique avec une résine. La fibre Dyneema ne déroge pas à cette règle: sa stabilité chimique, l'absence de groupements polaires et la faible énergie de surface des filaments entrent en conflit avec une liaison entre fibre et matrice. Etant donné que l'adhérence fibre/matrice est un élément clef dans le transfert d'efforts de la matrice vers la fibre, diverses recherches ont eu lieu afin d'améliorer ces caractéristiques de mouillabilité et d'adhérence. Elles ont conduit en l'application de différents traitements<sup>35,53,54</sup> de surfaces: du type oxydant à base d'agents chimiques, ou encore traitement corona ou plasma.

La grandeur généralement mesurée après ce type de traitement est la force de cisaillement interlaminaire ou ILSS (Interlaminar Shear Strenght).

Polyéthylène Haute Performance					
	Sans traitement	Décharge Corona	Plasma	Kevlar	Verre
ILSS (MPa)	8 à 11	18 à 20	30 à 34	55	80

Tableau 6 - Enduction : Influence du traitement de surface

Le traitement plasma sous oxygène est celui qui donne les meilleurs résultats en terme d' ILSS, de mouillabilité, de résistance au déchaussement (extraction de fibre de la matrice ou Pull-out) et de caractéristiques en flexion. Les effets correspondent en l'introduction de fonctions à -H mobiles, tels que les fonctions hydroxyles, ou carboxyles et aussi carbonyles. Par microscopie SEM, on peut par ailleurs constater la modification de l'état de surface.

Pour certaines expériences, les tissus PEHP ont donc été traités au plasma (ITF Nord) sous une faible pression d'oxygène (10 torrs) et à une puissance de 300 W pendant 15 minutes.

La sensibilité de la fibre Dyneema vis à vis de ces divers traitements est étudiée au Chapitre 3 § 5.

### 3 / 3 / Moulage des plaques

Cette technique relativement artisanale concerne essentiellement le cas des enductions des tissus commerciaux en "multicouches", et par l'intermédiaire des résines polyester et époxyde, mais du type rigide uniquement (soit la D400).

La mise en oeuvre se fait par contact en utilisant comme moules des plaques d'aluminium de dimensions 500 x 300 mm, préalablement cirées comme indiqué au Chapitre 3 § 3 / 1. L'empilement des couches se fait en respectant la séquence 0°.45°.0°.45°. Les couches sont plaquées les unes contre les autres avec un rouleau débulleur afin d'obtenir le moins de bulles d'air possible entre les tissus, peu d'excès de résine entre les couches, et une épaisseur constante au sein d'une même plaque de composite. Le nombre de couches est choisi en respect des impératifs suivants : limite du capteur (20 kN) pour la force de l'impact, masse surfacique et pourcentage volumique des fibres aussi proches que possibles entre les échantillons avec des tissus différents. Ainsi le nombre de couches est de 4 sauf spécification contraire ; l'épaisseur des échantillons est comprise entre 1 et 1.5 mm. Notre souci majeur réside dans l'obtention d'échantillons comparables. Aussi nous sommes nous attachés à essayer de réaliser des éprouvettes d'une masse surfacique de même ordre (environ 700 g/m<sup>2</sup>). De ce fait, pour certains articles le nombre de couches atteint la valeur de 6. Volontairement ce nombre est toujours pair, en respect de la séquence 0-45-0-45° évoquée d'une part, et parce que cette orientation permet par ailleurs d'approcher le plus possible le cas des composites orthotropes<sup>55</sup>.

Après imprégnation, les échantillons sont portés à 80°C pendant 2 heures. L'étude préalable en DSC page 77, a montré que dans ces conditions, l'avancement de la réaction de durcissement est supérieur à 95 % et que les fibres de PEHP ne subissent pas de détérioration thermique.

On remarquera que les composites à base de tissus traités par plasma acquièrent une teinte légèrement jaunâtre, que l'on attribue à l'apparition de composés quinoniques. En fait, ceux-ci résultent de l'action de radicaux libres, *greffés sur la fibre par le traitement plasma*, sur des cycles benzéniques issus du motif DGEBA.



Les caractéristiques des différents stratifiés obtenus sont rassemblés dans le tableau suivant :

Type de Résine :	Polyester						
Eprouvette de Tissu	Nombre de Couches	Masse Surfaccique en g/m2	Epaisseur en mm	Poids du tissu sec g	Poids Plaque g	Renfort en Masse %	Volume de fibres %
Verre (Toile)	6	960	1	125	236	53	33
Kevlar (Satin de 4)	4	700	1.38	96	227	42.3	36.1
PEHP1 non traité	4	700	1.6	94	256.5	37	40.4
PEHP1 Traité	4	700	1.48	93.9	248.7	37.7	41.2
PEHP2 non traité	4	580	1.32	79.1	230.3	34.3	37.7
PEHP2 Traité	4	580	1.3	81.3	211.6	38.4	41.2

Type de Résine :	DGEBA + D400						
Eprouvette de Tissu	Nombre de Couches	Masse Surfaccique en g/m2	Epaisseur en mm	Poids du tissu sec g	Poids Plaque g	Renfort en Masse %	Volume de fibres %
Verre (Toile)	6	960	1.02	125	237.5	52.6	34.3
Kevlar (Satin de 4)	4	700	1.5	98	267	36.9	32.6
PEHP1 non traité	4	700	1.6	92	262.5	35.1	40
PEHP1 Traité	4	700	1.6	94.7	258.4	36.6	41.7
PEHP2 non traité	4	580	1.3	79.3	243.2	32.6	37.4
PEHP2 Traité	4	580	1.3	81.3	220.1	36.6	41.7

RAP2/Chap3/Comp.xls

Tableau 7 - Enduction : Caractéristiques des stratifiés

#### 4 / Découpe des éprouvettes

En regard de la norme NFT- 51 - 118, les éprouvettes de choc sont des disques d'un diamètre de 60 mm. En flexion trois points, ce sont des barreaux de 80 x 15 mm. Dans le cas du PEHP du type "monocouche", la préparation est réalisée à l'aide de la table laser du type "LECTRA SYSTEMES", dont dispose le secteur confection de l'ENSAIT, sinon à la CSTTP de Roubaix. L'utilisation de l'outil laser se justifie par la résistance de la fibre Dyneema, qui lui interdit toute forme de découpe mécanique traditionnelle sous peine d'endommagement sérieux des échantillons. Le seul moyen de découpe propre est l'exploitation du bas point de fusion du PEHP (~ 150°C). Les articles du type "multicouches" ont imposé la nécessité d'utilisation d'un outil

qui permette une plus grande puissance du rayon laser. L'agence LECTRA SYSTEMES de Marcq en Baroeul dispose d'un appareil, dont la hauteur de coupe atteint 5 mm. Elle s'est mise à disposition pour procéder à la découpe de nos éprouvettes plus épaisses. Pour les éprouvettes à base de fibres de verre, les barreaux de flexion sont coupés à l'aide d'une scie circulaire de petite dimension pour électronicien. Quant aux disques de choc, ils nécessitent une scie cloche fixée sur perceuse à colonne. Les éprouvettes ébavurées sont ensuite rectifiées par ponçage. Dans le cas du Kevlar, la méthode est identique. La découpe s'avère plus laborieuse, car il y a un phénomène d'échauffement et provoque du même coup une usure prématurée de l'outil. Les bords de l'échantillon deviennent beaucoup moins nets: On peut constater une défibrillation, qui si elle n'est pas trop gênante pour les essais en choc, elle le devient en flexion, car il y a un risque de perturbation sur l'intégrité de l'éprouvette. Le moyen le plus viable s'est révélé être un massicot à tôle disposant d'un grand bras de levier (~ 1.5 m). Le temps de contact entre lame et plaque étant relativement court, le cisaillement est net et sans trop de bavures.

## 5 / Caractérisation - DSC

L'analyse en DSC permet d'observer l'évolution de la cristallinité de la fibre Dyneema après traitement plasma décrit plus haut, sinon traitement thermique simulant les conditions de polymérisation des résines (80°C pendant 2 heures). Par commodité, il a été adopté la nomenclature suivante:

- NT 25°C : Echantillon vierge de tout traitement.
- NT 80°C 2h : Echantillon n'ayant subi qu'un traitement thermique
- T 25°C : Echantillon ayant subi le traitement plasma.
- T 80°C 2h : Echantillon ayant subi le traitement plasma, puis thermique.

L'aire du pic de fusion donne le  $\Delta H_f$  de la fibre, et la valeur de  $\Delta H_{f,\infty}$  du PEHP équivalente à 282.15 J/g, donnée par la littérature<sup>34</sup> permet l'obtention du taux de cristallinité selon la formule, déjà rencontrée page 45:

$$X = (\Delta H_f - \Delta H_{f\infty}) \times 100$$

Les courbes de DSC des échantillons enduits et le tableau suivant rassemblent les résultats obtenus.

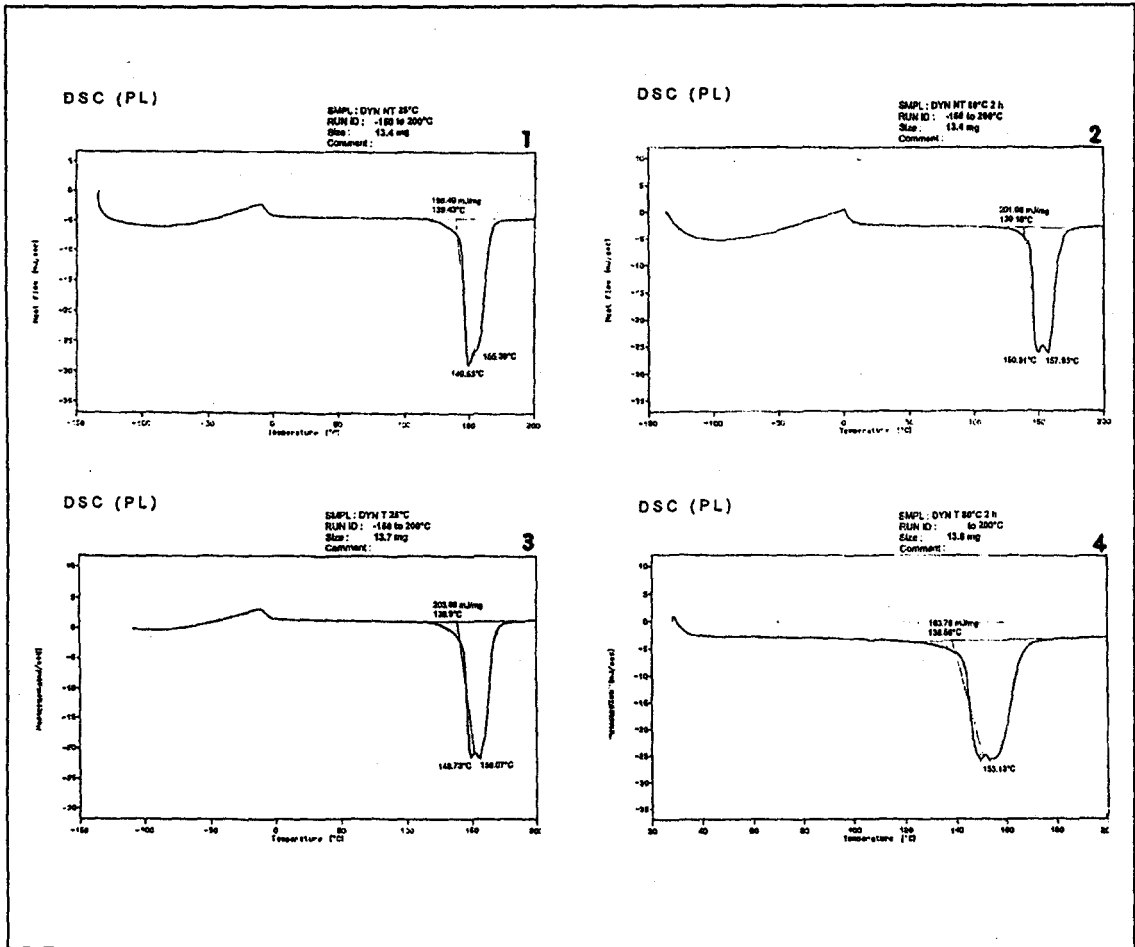


Figure 41 - Courbes DSC

	NT 25°C	NT 80°C 2h	T 25°C	T 80°C 2h
X en %	69.6	71.6	72.3	68.6

Tableau 8 - Taux de cristallinité obtenus en DSC des fibres de PEHP traitées ou non.

Aux erreurs expérimentales près, on peut remarquer que la cristallinité de la fibre reste constante aux environs de 70 %. Les divers traitements auxquels le matériau est soumis n'ont donc pas d'influence, tout au moins sur ce paramètre; ce qui constitue une garantie quant à ses caractéristiques mécaniques et chimiques. Les courbes de DSC des résines époxy se trouvent en annexe.

## 6 / Conclusion - Résumé

Dans bien des domaines d'application, des progrès sont réalisés tous les jours qui permettent d'ouvrir de nouveaux champs d'activités.

L'alliance de la fibre textile et de résines permet de dire que les plastiques armés sont des matériaux susceptibles de remplacer les matériaux traditionnels dans nombre d'applications; et en particulier d'applications extrêmes où l'on a besoin d'un excellent rapport résistance/poids, de bonnes qualités mécaniques,... où l'on recherche un matériau qui ne se corrode pas,... où l'on a besoin d'un matériau que l'on puisse produire à moindre frais, en faibles ou en moyennes séries.

C'est dans cette optique que l'on s'est penché sur la recherche d'un nouveau produit résultant de la complémentarité des différents constituants. Les composites à matrice organique sont généralement constitués de résines polyester, époxydes ou phénoliques, avec des renforts en fibres minérales (verre, carbone) et organiques (aramides, polyamides). Leur application va des industries de pointe telles que l'aéronautique, où le prix de revient est secondaire, à l'industrie automobile, où l'on a toujours à coeur de tirer sur les prix au maximum, tout en ayant la meilleure qualité possible, en passant par l'industrie des sports et loisirs, où l'on associe haute performance, prix et qualité. L'association fibre-matrice permet l'obtention de ce matériau nouveau, dont l'usage pré-destiné et les caractéristiques spécifiques sont directement liées aux paramètres suivants :

- la nature des composants,
- les proportions des composants,
- l'orientation des fibres.

*La mise en oeuvre s'est réalisée selon une technique couramment appliquée en impression textile : le foulardage.*

A noter qu'en terme d'échantillon composite, il a été réalisé des éprouvettes aussi bien du type monocouche que multicouche (au nombre de 4). Le point de comparaison des différents produits obtenus porte, comme déjà mentionné, sur la résistance à l'impact, abordée au chapitre suivant.

**CHAPITRE 5**  
**Caractérisation mécanique des**  
**Tissus et Matériaux Composites**

## SOMMAIRE

### **1 / Essais de résistance à la traction uniaxiale sur matériaux souples monocouches**

1 / 1 / Descriptif machine

1 / 2 / Echantillons non traités : influence de l'armure.

1 / 3 / Echantillons imprégnés : Influence de l'enduction.

1 / 4 / Discussion

### **2 / Mesures de vitesses de propagation d'une impulsion d'onde acoustique dans différentes directions d'un tissu.**

### **3 / Essais de résistance à l'impact - Dart-Test**

3 / 1 / Descriptif machine

3 / 2 / Résultats bruts sur échantillons monocouches

3 / 2 / 1 / Tests réalisés sur éprouvettes tissées par nos soins.

3 / 2 / 2 / Tests réalisés sur éprouvettes commerciales.

3 / 3 / Résultats bruts sur échantillons multicouches

Comparaison avec Verre & Kevlar

3 / 4 / Discussion

### **4 / Calcul de simulation numérique de la pénétration d'échantillons composites par projectiles (programme AUTODYN)**

### **5 / Conclusion - Résumé**

## 1 / Essais de résistance à la traction uniaxiale sur matériaux souples monocouches

Pour certains matériaux souples à usage technique tels que bandes transporteuses, structures tendues, sangles, etc..., la résistance dynamométrique uniaxiale est un facteur primordial. Elle est avant tout fonction de celle des fils de chaîne, et de leur densité dans le tissu. Mais le type d'entrelacement avec la trame joue également un rôle non négligeable, et détermine la facilité d'imprégnation d'une enduction.

Dans notre étude, nous nous sommes exclusivement intéressés aux deux points suivants : type d'armure et nature de l'enduction.

Comme mentionné au Chapitre 2, sur métier à lance FATEX, garni d'une chaîne unique à base de polyéthylène à haute performance, il a été réalisé un rentrage suivi par corps (au nombre de 3), et 4 cartons successifs afin d'obtenir ainsi a priori 12 échantillons différents. 4 d'entre eux correspondent aux armures basiques : toile, croisé 2x2, sergé de 6 et satin de 5. Les autres ont été conçues en fonction de leur compatibilité avec les précédentes. Si les duites ont même titrage que les fils de chaîne, mais sans torsion, la réduction, après vérification pratique en laboratoire, donne les valeurs suivantes : 9.26 fils/cm en trame et 14.81 fils/cm en chaîne. Pour des raisons essentiellement techniques et directement liées à la matière d'oeuvre utilisée, il n'a pas été possible de respecter les prévisions, et il a fallu opérer de ce fait à cette modification. Ainsi, pour une valeur de retrait et/ou d'embuvage quasi équivalente et évaluée sur maillemètre à 3 % (voir annexe), la masse surfacique des différents échantillons s'élève en moyenne à 110 g/m<sup>2</sup> (cf. Formule page 62), sauf pour 3 d'entre eux, qui s'élève à 135 g/m<sup>2</sup>. En fait, le relief apporté par les armures de ce type permet à certains fils de se superposer, et ainsi alourdir le produit final. Les relevés de mesures et photographies des différents échantillons se trouvent également en Annexe.

Le Chapitre 3 précise qu'en terme d'enduction, les échantillons ont été imprégnés de résines époxy/amines du type souple, semi-rigide et rigide, selon la technique par foulardage, avec un taux d'exprimage d'environ 80 %

(traitement de cuisson : 2 h à 80°C). Ceci pour ce qui est des éprouvettes du type "monocouche".

## **1 / 1 / Descriptif machine**

### *Caractéristiques du matériel et Conditions opératoires*

Les tests de traction ont été effectués sur la machine Zwick 1456 avec un capteur de 10 kN (cf. figure 10, page 23). Pour les éprouvettes de tissus, la norme<sup>56</sup> NF G 07-001 Janvier 1973 préconise des dimensions de bandelettes dans le sens chaîne comme dans le sens trame, équivalentes à 300 x 50 mm. Les 50 mm de large s'obtiennent par effilochage (avec une pré-découpe au fer à souder). Sur banc de traction, leur maintien se fait par des mors à vagues, qui permettent de réaliser le test sur une longueur effective de 200 mm. Dans notre cas, quelques essais préliminaires ont imposé de s'éloigner de la norme au niveau de la largeur pour se limiter à 30 mm seulement (en respect de la capacité du capteur). La vitesse d'action est réglée à 60 mm/min. Le résultat d'un test est représenté sous la forme d'une courbe comme illustré figure 42. L'essai est en fait considéré comme terminé lorsque la force devient inférieure à 80 % de la force max.

### Remarques :

Très vite, il a été décelé un inconvénient majeur en cours d'opération, auquel nous avons d'ailleurs déjà été confronté : il s'agit en l'occurrence du glissement des éprouvettes dans les mors. Pour éviter Ce phénomène, nous avons enduit les extrémités des éprouvettes, et protégé de papier aluminium. Les tests à caractère douteux ont d'office été éliminés.

## **1 / 2 / Echantillons non traités**

Sont rassemblés dans le tableau qui suit, les résultats des échantillons non enduits, les plus performants en terme de dynamométrie. Les courbes "Force-Allongement" présentent, quel que soit le type d'armure, une réponse ou un profil comme indiqué dans les figures 42 & 43.



A'	CHAÎNE			TRAME		
	F max. (N)	A à F max. (%)	Embuva <sup>*</sup> en %	F max. (N)	A à F max. (%)	Retrait <sup>*</sup> en %
Diagonale 12/6	3868.50	8.20	2.68	3088.18	6.10	3.39
Diagonale 8/4	2888.85	7.13	2.24	2884.62	6.08	3.49
Satin 5 Tr	3002.20	8.00	2.80	3320.30	7.88	2.82
Toile	3328.98	7.30	2.76	1457.83	5.40	3.65

\* : valeurs mesurées en laboratoire

Tableau 9 - Traction / Tissus non traités

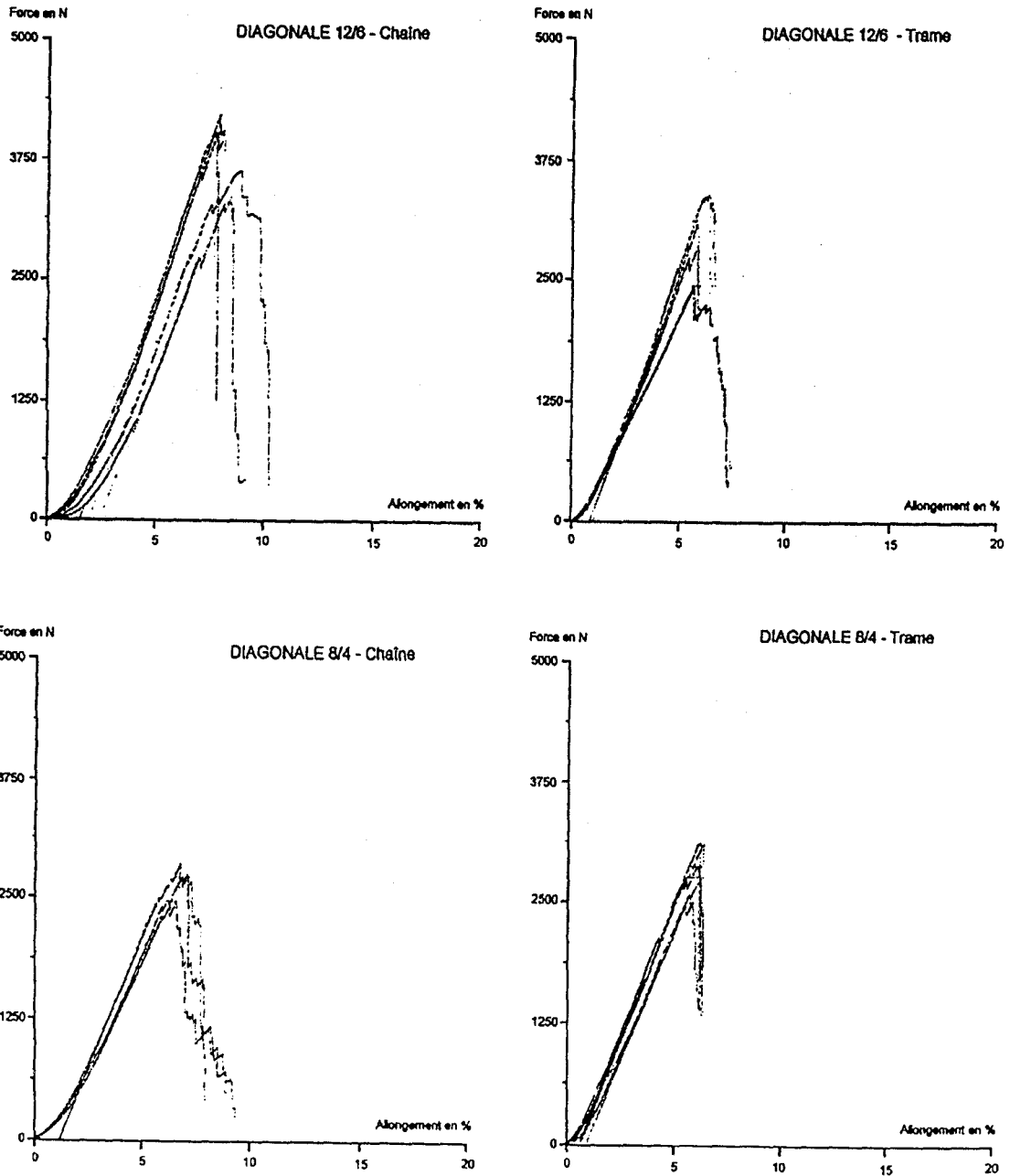


Figure 42 - Courbes : F (N) = f(Allgt en %)

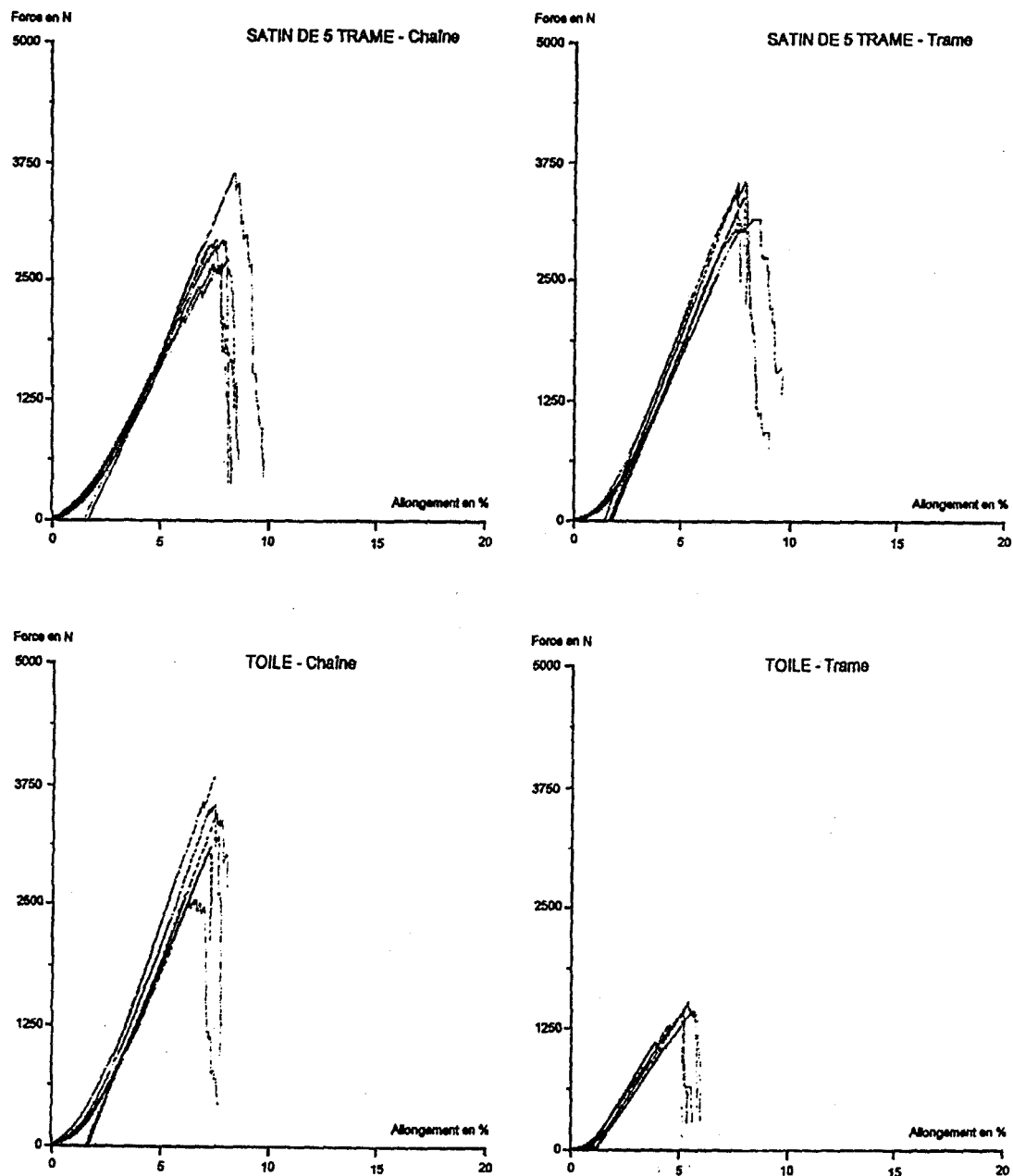


Figure 43 - Courbes  $F(N) = g(\text{Allgt en } \%)$

La différence relativement conséquente observée entre chaîne et trame pour l'armure toile (figure ci-dessus) est directement liée à la remarque relative à la différence de réduction pratique évoquée page 87.

### ***Discussion :***

Les figures précédentes illustrent la réponse élastique caractéristique des différents tissus testés. Elle est dominée dans une première phase par la flexion des fils (ou des duites) occasionnée par les notions d'embuvage ou de retrait : c'est la *partie incurvée*. Elle est alors prise en relais dans un 2<sup>o</sup> temps par l'allongement propre des fils : c'est la *partie linéaire*. Le profil de toutes ces courbes rejoint la théorie<sup>57</sup> énoncée par William WARREN.

L'intersection de la partie linéaire de la courbe avec l'axe des abscisses permet d'évaluer la réponse préliminaire du tissu à la contrainte donnée à environ 1.25 % d'allongement en moyenne. Cette valeur provient en partie de celle relative aux notions d'embuvage  $e$  et de retrait  $r$  mesurées sur maillemètre (voir Annexe), et dont les résultats apparaissent au tableau 9.

A cet effet, il faut mentionner que  $e$  et  $r$  dépendent du nombre de points de liage dans le tissu; il est donc logique de constater que ces valeurs soient plus importantes dans le cas de la toile. Pour 3 armures de même trame, la consommation des fils de chaîne n'est pas la même, ce qui entraîne une surtension pour l'une ou l'autre des armures, et modifie du même coup légèrement les réductions. Ainsi, il est délicat d'établir une corrélation entre  $e$  et  $r$  de chacune des armures et leur consommation de fil.

### **Influence de l'armure :**

La recherche de l'armure la plus performante peut s'effectuer selon la démarche suivante : dans un espace plan, et à partir d'un nuage de points représentatif des valeurs obtenues pour un paramètre donné, l'échantillon "idéal" est considéré comme celui ayant la force à la rupture max., pour un allongement min. Ainsi, ce point qui caractérise **l'article au module le plus élevé**, se situe dans le coin supérieur gauche de la zone rectangulaire qui délimite tous les tests. (*Ceci est une première hypothèse, sur laquelle nous reviendrons ultérieurement. Il est par ailleurs à noter que pour chaque test, il a été réalisé 5 essais.*) Puis, par un balayage concentrique à ce point, les armures se classent d'elles-mêmes en fonction de leur éloignement vis à vis de

ce point de référence. A titre d'exemple, le cas des échantillons non enduits, et testés en chaîne essentiellement, donne la configuration suivante.

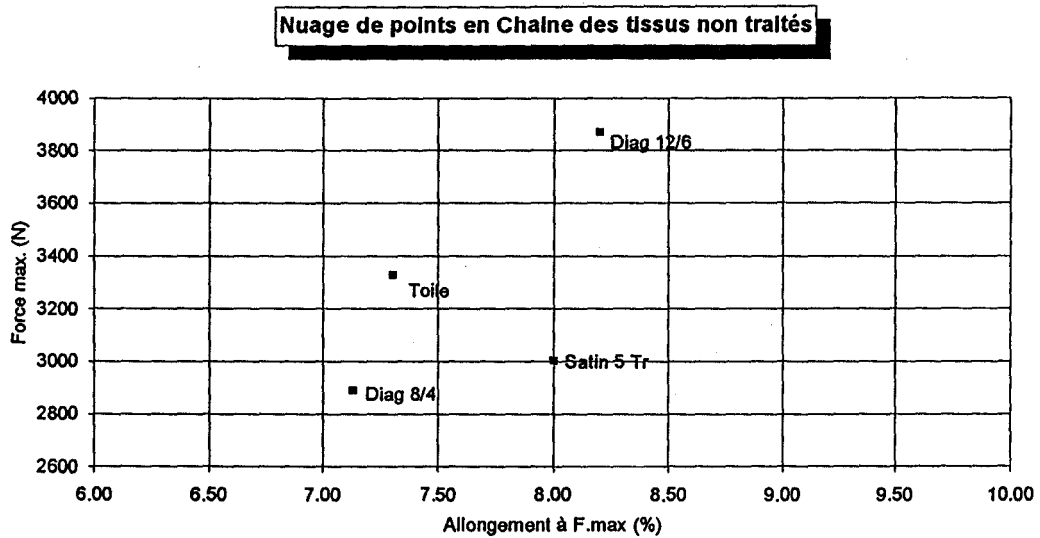


Figure 44 - Positionnement par rapport au point "Idéal".

De ce premier cas de figure, il ressort que c'est la toile qui se rapproche le plus du point "idéal", qui présente les coordonnées suivantes :

$$F = 3868.5 \text{ N et } A = 7.13 \%$$

Cette armure, utilisée dans de très nombreux domaines d'application s'en écarte légèrement, avec au niveau de la force un  $\Delta F$  d'environ 14 %, et pour l'allongement un  $\Delta A$  de -2.38 % seulement (soit 14 % moins résistant avec une déformation d'environ 2.35 % supérieure que l'armure dite "idéale"). Dans le sens trame, c'est par contre la diagonale 12/6 qui se positionne au mieux, avec des écarts atteignant des pourcentages respectifs de 7 et -13 % pour la résistance et l'allongement à la rupture.

### 1 / 3 / Echantillons imprégnés

RESINE	TISSUS	Chaîne		Trame	
		A à Fmax. (%)	F max. (N)	A à Fmax. (%)	F max. (N)
		<b>SOUPLE</b>	Diagonale 12/6	6.98	3189
	Diagonale 8/4	7.83	3119	6.76	2436
	Satin 5 Tr	7.16	3199	7.06	1912
	Toile	9.44	3643	5.80	1762

Tableau 10 a - Traction / Echantillons imprégnés

RESINE		TISSUS	Chaîne		Trame	
			A à Fmax. (%)	F max. (N)	A à Fmax. (%)	F max. (N)
SEMI RIGIDE	Diagonale 12/6	8.60	4461	6.10	2379	
	Diagonale 8/4	8.30	3013	6.53	1812	
	Satin 5 Tr	7.25	3365	7.00	1783	
	Toile	9.08	3381	7.16	1651	
RIGIDE	Diagonale 12/6	7.08	3991	5.70	2552	
	Diagonale 8/4	6.44	2709	6.55	2572	
	Satin 5 Tr	6.24	2697	6.56	2390	
	Toile	7.10	3233	7.34	1834	

TAB10

Tableau 10 b - Traction / Echantillons imprégnés

*Remarque : Apparaissent en italique les meilleurs résultats par groupe d'essais.*

Une illustration graphique permet une simplification, quant à l'exploitation de ces résultats: il est possible de la trouver sous forme d'histogrammes en annexe. (Fichiers AC, AT, BC, BT,....DT).

**Influence de l'enduction :**

Au niveau de la résistance et en particulier en chaîne, on constate une possibilité d'amélioration en moyenne de 10 %, sur chacune des 4 armures de base. Par contre, ce n'est pas le cas pour la trame, où il y a toujours détérioration, sauf pour la toile, où le gain peut atteindre alors 25 %.

En terme d'allongement, l'incidence est très variable pour la chaîne (gain de 3 jusque 22 % dans le meilleur des cas), et peu conséquente dans le cas de la trame (en moyenne 10 % de gain, quand gain il y a!!).

**Examen des meilleurs échantillons au cas par cas :**

Si dans un premier temps la priorité est donnée à l'armure, le point de comparaison peut alors porter sur l'enduction, et conduire à la constatation suivante: cette sélection laisse en compétition les cas suivants : *Fichiers comparatifs : A'C, A'T, B'C,....D'T' (voir Annexe)*

	Chaîne	Trame
Diag 12/6	Rigide	Sans
Diag 8/4	Sans	Sans
Satin 5 Tr	Rigide	Sans
Toile	Sans	Souple

Arm1

Dans ces conditions, ces échantillons se distinguent de la façon suivante (*Fichier Best.xls*) :

- en Chaîne, c'est la **diagonale 12/6 rigide**, qui occupe le 1° rang.
- en Trame, c'est la même armure lorsqu'elle n'est pas traitée qui prédomine, mais de très peu la **diagonale 8/4 elle-même non traitée**.

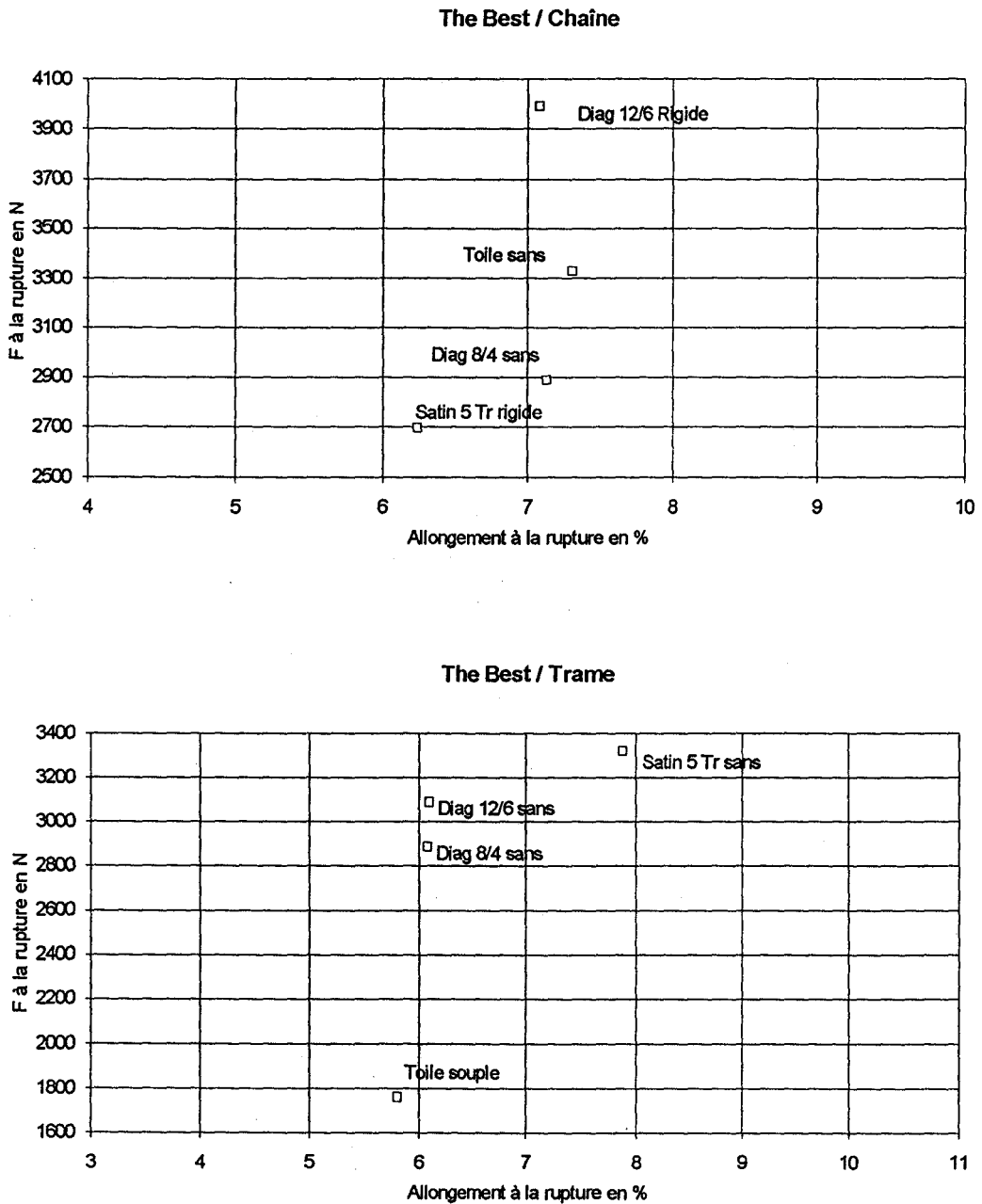


Figure 45 - Classement dynamométrique définitif

Dans la mesure où l'on inverse l'ordre des critères de comparaison, la tendance laisse souvent apparaître une émergence de la diagonale 12/6., et s'oriente dans le sens suivant :

	Chaîne	Trame
Sans	Toile	Diag 12/6
Souple	Satin 5 Tr	Diag 12/6
Semi Rigide	Diag 12/6	Diag 12/6
Rigide	Diag 12/6	Diag 12/6

End1

Le classement de ces échantillons (*Fichier Best.xls*) conduit à la même conclusion que celle issue du tableau précédent. En définitive ici, l'armure du type **diagonale 12/6 enduite du résine époxy rigide** est meilleur en Chaîne, alors qu'en trame c'est sans enduction qu'elle offre les meilleures performances dynamométriques. Cette analyse permet donc de conforter la précédente.

Ce classement basé sur le module le plus élevé (cf. page 91) peut paraître arbitraire et discutable. Du point de vue utilisation, on peut effectivement considérer le produit idéal comme celui qui présente les valeurs de force et d'allongement à la rupture les plus importantes, donc se baser cette fois sur **la notion d'énergie de rupture**. Le point idéal dans ce nouveau cas de figure occupe non plus la position en haut et à gauche du secteur délimité par les 4 points, mais celle en haut et à droite. De cette remarque, découlent les conclusions suivantes :

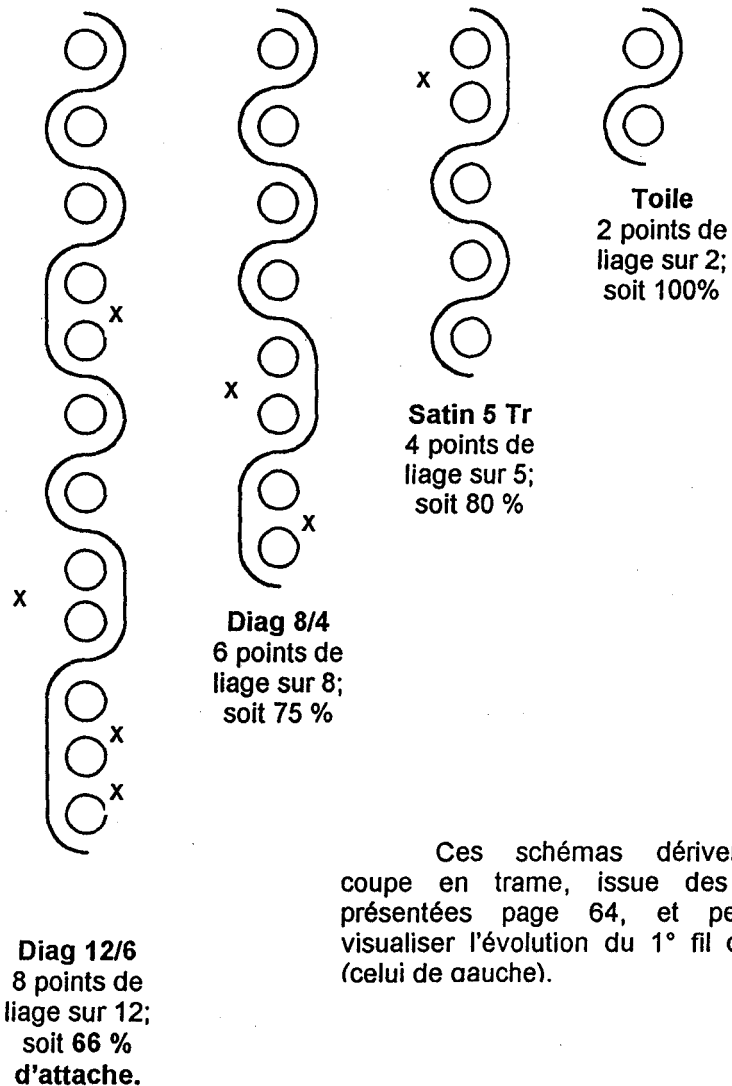
	Chaîne	Trame	Classement vis à vis de l'Energie		Chaîne	Trame
Diag 12/6	Semi Rigide	Sans		Sans	Diag 12/6	Satin 5 Tr
Diag 8/4	Semi Rigide	Rigide		Souple	Toile	Diag 8/4
Satin 5 Tr	Sans	Sans		Semi Rigide	Diag 12/6	Diag 12/6
Toile	Souple	Rigide		Rigide	Diag 12/6	Diag 8/4

Am2 End2

En Chaîne, la **Diagonale 12/6** enduite **semi-rigide** l'emporte sur ses concurrentes, alors qu'en trame, c'est le **Satin de 5 Tr non traité**.

Ainsi quel que soit le classement adopté, les conclusions semblent converger dans le fait que la toile offre des propriétés dynamométriques inférieures à d'autres armures, bien qu'elle soit préférentiellement utilisée en industrie.

Le léger relief apporté par les diagonales parvient à améliorer l'adhérence de l'enduction. Visiblement, la résine parvient à pénétrer plus facilement les interstices X offerts par les points de liage, inférieurs en nombre à ceux de la toile. (% d'attache le plus faible).



**Influence de la nature de fibre :**

Pour comparaison, des tissus de polyaramide et de verre, enduits ou non, ont également été testés. Provenant du commerce, ces échantillons peuvent difficilement être confrontés à ceux produits par nos soins. Aussi, la société DSM nous a-t-elle procuré les articles déjà présentés au Chapitre 2 § 3, page 71. Certains ont subi un traitement Plasma.



Nature de la fibre	Type de Tissu	F en N	A en %
Verre	Toile	392.14	1.58
Kevlar	Satin 4	2712.86	4.18
Dyneema	Sergé 4	4190.96	7.68
Dyneema traité	Sergé 4	3095.26	5.57
Dyneema	Toile	3765.90	9.89
Dyneema traité	Toile	3429.10	8.36

Tableau 11 - Traction / Influence fibre - Echantillons non enduits

Toujours selon le même principe de classement, il ressort qu'ici c'est le tissu du type Sergé de 4 PEHP qui prédomine, suivi de très près par la toile PEHP, elle même suivie du même type d'échantillon mais traité Plasma. (ceci en se basant sur l'énergie)

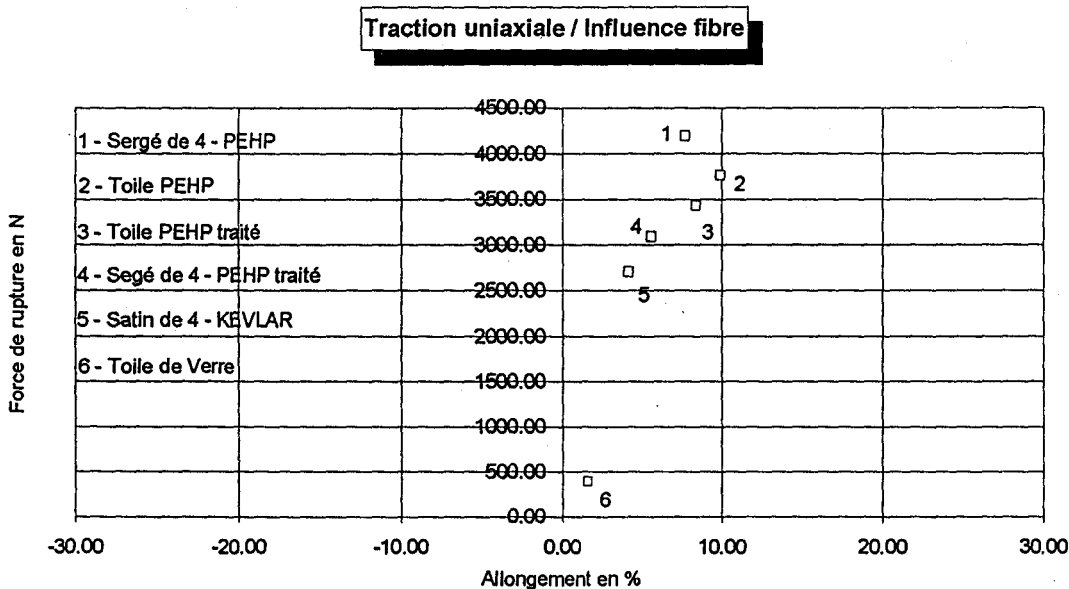


Figure 46 - Dispersion dynamométrique en fonction de la nature des fibres

### 1 / 4 / Discussion

Les résultats montrent donc que :

1 / Les courbes de traction des tissus comportent toujours 2 parties : début incurvé dû à la mise en place relative des fils de chaîne et de trame, puis la partie principale, linéaire jusque la rupture due à l'élasticité propre des filaments (voir figure 47 - Avertissement : Echelles différentes en abscisses).

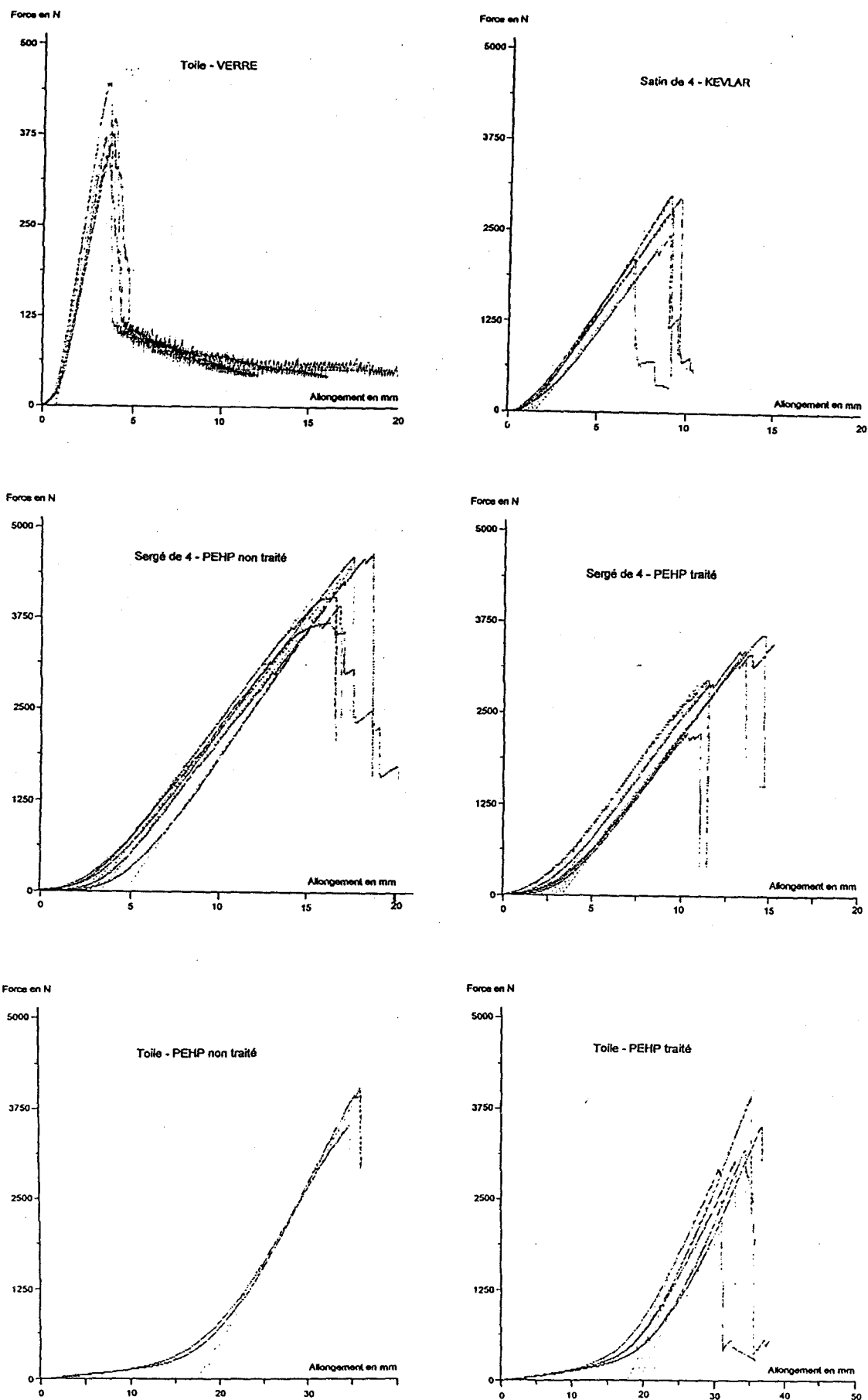


Figure 47 - Traction / Profils de réponse des tests sur tissus non enduits

L'allongement à la rupture en traction des tissus ( $\varepsilon_r$  en %) est donc supérieur à celui du filament  $\varepsilon_{rf}$ . En effet, pour obtenir  $\varepsilon_r$ , on ajoute à  $\varepsilon_{rf}$  la valeur appelée "retrait" ( $r$ ) ou "embuvage" ( $e$ ) suivant qu'on tire la trame ou la chaîne. Ces valeurs de l'ordre de 2 à 3 % dépendent bien sûr du type d'armure et peuvent être déterminées indépendamment du test de traction (voir annexe : Maillemètre). Ce schéma est bien suivi quantitativement par les tissus de Kevlar dont les courbes de traction peuvent être calculées a priori par les équations de Warren<sup>57</sup>. Dans le cas des tissus commerciaux de PEHP, qualitativement les valeurs de  $\varepsilon_r$  suivent le classement dû au retrait ou à l'embuvage, mais quantitativement,  $\varepsilon_r$  est supérieur de quelque pour-cent à la somme  $\varepsilon_{rf} + r$  ou  $\varepsilon_{rf} + e$ ; comme si le retrait ou l'embuvage est amplifié par un allongement supplémentaire. Cet allongement supplémentaire pourrait être dû à un glissement des chaînes les unes par rapport aux autres. Ce glissement serait provoqué par des forces de cisaillement dont l'origine provient du fait que l'orientation de la force de traction varie au cours de l'entrelacement de ce fil avec le fil perpendiculaire. Dans le cas des tissus fabriqués par nos soins, les résultats ne sont pas nets.

2 / Pour les tissus enduits, l'allure de ces courbes de traction dépend de la nature des fibres dans le tissu :

- avec le verre, la partie incurvée disparaît,
- avec le polyaramide, cette partie devient quasi linéaire, et la valeur de l'allongement à la rupture du tissu diminue et se rapproche de celle de la fibre,
- avec le Polyéthylène haute performance, l'allure est conservée, surtout dans le cas des enductions souples et semi-rigide. Pour l'enduction rigide, elle rejoint le profil du polyaramide.

Ces résultats montrent que les tissus de verre et de Kevlar quand ils sont enduits ont perdu leur caractère "tissu", avec les mouvements relatifs des fils de chaîne et de trame, à cause de la bonne adhésion entre le textile et le produit déposé; mais que le PEHP le conserve à cause de la mauvaise adhésion. Ce point est très important pour la compréhension de l'excellente performance des tissus PEHP enduits ou des stratifiés à base de PEHP.

3 / On peut penser que la force de rupture  $f_r$ , et par suite la résistance à la rupture  $\sigma_r$  diminue quand augmente le nombre d'entrelacements entre fils de chaîne et de trame dans l'armure. Elle varierait dans l'ordre suivant :

$$f_r \text{ toile} < f_r \text{ satin} < f_r \text{ diagonale.}$$

Expérimentalement, on a :

$$f_r \text{ toile} \# f_r \text{ satin} < f_r \text{ diagonale}$$

(référence aux échantillons ENSAIT). La résistance la plus élevée est donc celle des tissus unidirectionnels, ce qui est logique. Par contre, l'armure toile devrait posséder la valeur de l'allongement de la rupture  $\varepsilon_r$  la plus élevée.

Comme l'énergie de rupture résulte du produit de la résistance et de l'allongement de la rupture, sa variation doit être déterminée au cas par cas. Dans notre étude, c'est l'armure diagonale 12/6 qui est la plus favorable et non l'armure toile, c'est à dire la plus serrée, comme on pourrait penser intuitivement et habituellement.

## 2 / Essais de résistance à l'impact - Dart-Test

Les matériaux composites à matrice organique sont utilisés de façon courante comme matériaux de structure. On connaît maintenant leur excellente tenue en tension uniaxiale, grâce aux valeurs élevées des modules d'élasticité et de la résistance des fibres de renfort.

Par contre, les matériaux composites sont susceptibles de subir de façon irréversible des dommages conséquents suite aux chocs, même de vitesse relativement faible.

De nombreuses améliorations ont été apportées pour augmenter la résistance à l'impact. On peut par exemple rendre la matrice plus ductile par incorporation de nodules élastomères. Une solution élégante consiste à utiliser des interfaces fibre-matrice à propriétés contrôlées. On peut également jouer sur les fibres de renfort : soit sur leur nature, en cherchant des fibres ductiles, soit sur leur mélange, avec les composites dits hybrides, enfin sur leur disposition géométrique avec les différents modes de mise en oeuvre (tissage, tricotage, tressage) ou l'agencement des couches.

Les résultats sont spectaculaires puisqu'on dispose maintenant de matériaux composites utilisés pour la protection contre les tirs balistiques ou les armes à fragmentation. Ces matériaux utilisent comme renforts les tissus de polyéthylène haute performance (PEHP), de polyaramide ou même de verre. Les fibres PEHP sont les dernières venues dans la famille des fibres de renfort. Leur fabrication est l'aboutissement d'une longue série de recherches menées de par le monde, mais essentiellement en Europe, notamment par Penning<sup>29</sup>, Ward<sup>8</sup> et Lemstra<sup>7</sup>.

L'étude de la résistance à l'impact de ces tissus haute performance et des composites correspondants a été effectuée par plusieurs auteurs. Prevorsek et al<sup>58,59,60</sup> étudient l'impact balistique sur les composites à base de Spectra (PEHP fabriqué par Allied Signal), Jacobs, Van Gorp et al<sup>61,62</sup> étudient des composites à base de Dyneema (PEHP fabriqué par DSM High Performance Fibers). Peijs<sup>63</sup> souligne l'intérêt des hybrides PEHP-Carbone. Zee et al<sup>64</sup> mène l'étude comparative sur les composites renforcés par les tissus PEHP, PET (polyéthylène téréphtalate) et graphite, à la fois à vitesse balistique (320 m/s) et à vitesse plus faible par chute de masse. Jang et al<sup>65</sup> étudient aussi, de façon comparative et par chute de masse, les tissus et composites à base PEHP, PET, Nylon, polyaramide, graphite et verre. Enfin, Desper et al<sup>27</sup> ont entrepris grâce à la diffraction X aux grands angles, une étude sur les effets morphologiques de l'impact balistique sur les tissus PEHP.

L'étude présentée ici concerne la résistance à l'impact en déformation multiaxiale à vitesse relativement faible (5 m/s). Elle a été réalisée sur une machine hydraulique Zwick du type Rel 1853.

*L'objet recherché porte sur une comparaison du comportement des matériaux composites réalisés avec différents tissus de renforcement et plusieurs types de matrices.*

En fait, nous avons donc réalisé, comme indiqué dans les chapitres précédents des matériaux composites en utilisant plusieurs types de tissus de renforcement : polyéthylène haute performance (PEHP - Dyneema SK 66), Polyaramide (Kevlar), et Verre... et plusieurs types de matrices : polyépoxydes et polyester insaturé.

## 2 / 1 / Descriptif de la machine hydraulique Zwick Rel 1853

**Caractéristiques du matériel :** Bâti : 100 kN

Capacité :  $\pm 20$  kN

Déplacement :  $\pm 150$  mm

Traverse mobile : 1300 mm

Haute rigidité : 4 colonnes

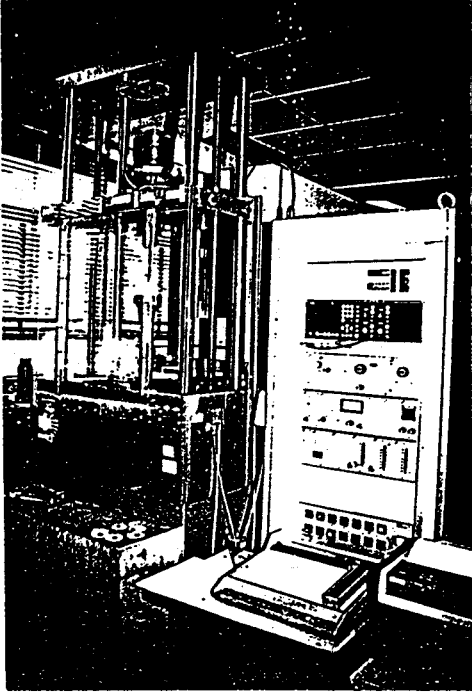


Fig. 48- Impact / Machine hydraulique servo-asservie Zwick Rel 1853

Cette machine d'essai présente une gamme d'applications très variées. Elle peut être utilisée comme machine d'essai hautes vitesses (pouvant atteindre 20 m/s), statique (à partir du  $\mu\text{m}/\text{min}$ ), de fatigue ou de fluage. En fonction de l'outillage qui lui est adapté, elle peut appliquer trois types de sollicitation : en traction, en flexion trois points et multiaxiale. L'installation se présente comme-suit :

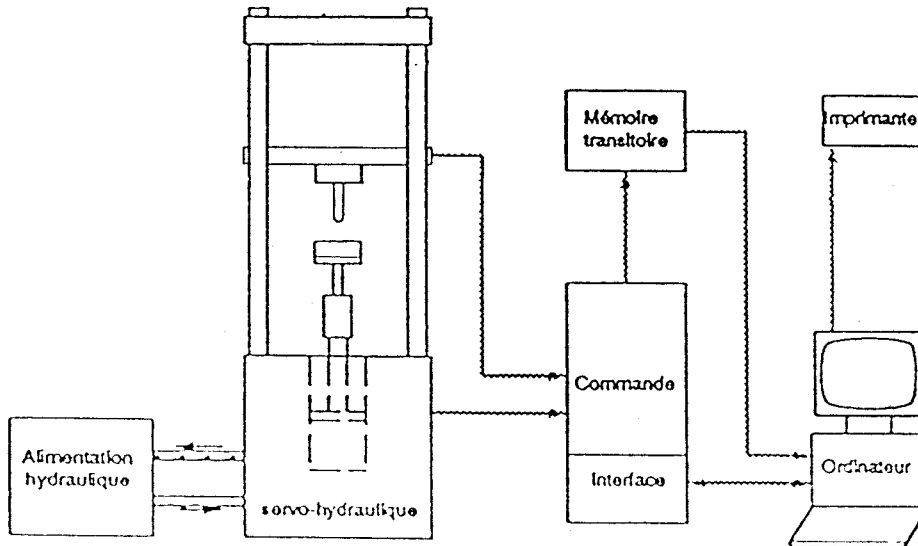


Fig. 49- Impact / Schéma de l'installation

Les échantillons sont représentés par des éprouvettes circulaires préalablement découpées aux ciseaux électriques pour les tricots, sinon au rayon laser (Lectra-Système), pour les tissus et enductions. Les rondelles ont une dimension d'environ 90 mm de diamètre. Celles-ci prennent place dans les mors de la machine, avant d'être comprimées par serrage des couronnes complémentaires, sur une bande de maintien de 27 mm. Une clef dynamométrique assure un couple constant de 125 Nm. La surface d'attaque est d'environ 10 cm<sup>2</sup>. Le test consiste en la mise en contact de l'éprouvette contre le percuteur fixe, qui peut être de différentes formes au niveau de l'embout : hémisphérique, cylindrique, ou simulant la pointe d'épée. La force agissant sur l'échantillon est enregistrée par des capteurs piézoélectriques situés sur le percuteur. Le résultat du test se fait sous forme de courbes *force et déformation* en fonction du *temps*, selon la figure ci-dessous.



Fig . 50- Impact - Tête de travail équipée d'un percuteur hémisphérique

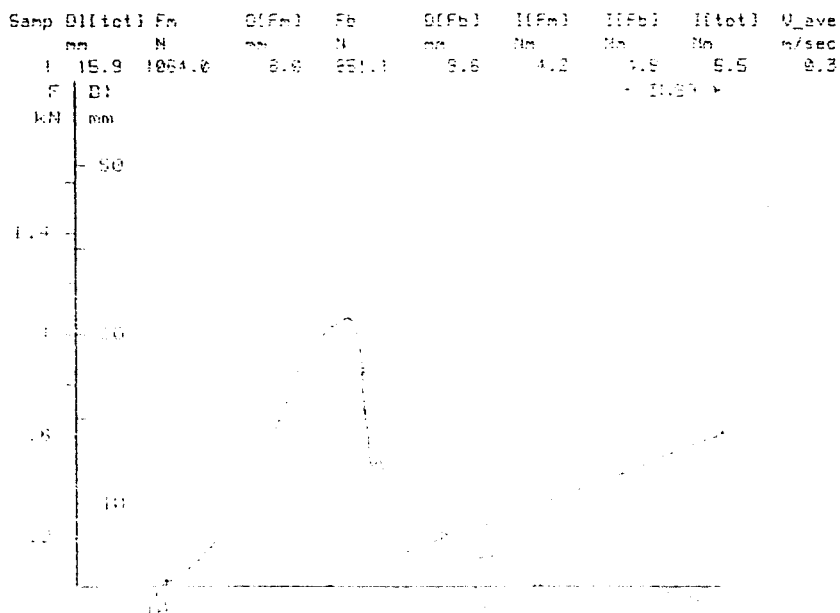


Fig 51 - Impact - Exemple de résultat d'un essai

Nomenclature (pour la figure 51) :

Samp : Références de l'échantillon

Dl(tot) : Valeur de la déformation totale exprimée en mm

Fm : Force maximale en Newton

D[Fm] : Déformation à la force maximale

Fb : Force à la rupture

D[Fb] : Déformation à la rupture

I[Fm] : Energie à la force maximale

I[Fb] : Energie à la force de rupture

I[tot] : Energie totale

V\_ave : Vitesse d'action en m/sec

et, à l'issue d'un test statistique :

Mean valu : valeur moyenne

Std dev. : écart-type

Var. coef : coefficient de variation

**2 / 2 / Résultats bruts sur échantillons monocouches**

La méthode d'essai est décrite dans la norme<sup>67</sup> NF T 51-118 relative aux éprouvettes de plastique planes, et adaptée en conséquence aux surfaces des matériaux souples, à base de textiles enduits ou non.

Dans les essais mécaniques, la vitesse d'action est un paramètre très important. Ainsi, une étude préliminaire porte sur son influence, dans la gamme des possibilités offerte par l'appareil. Il en ressort que dans cet éventail (de 0 jusqu'à 20 m/s), quelle qu'en soit la valeur, le résultat n'est que très peu affecté comme indiqué dans la figure suivante.

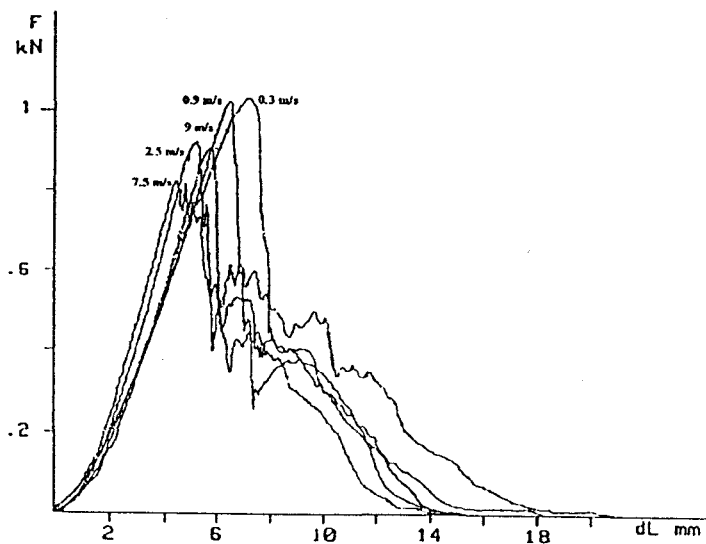


Fig. 52 - Impact - Influence de la vitesse

En conséquence de quoi, pour la plupart d'entre eux, tous les tests ultérieurs ont été réalisés à une vitesse avoisinant les 5 m/s, valeur, qui visiblement occasionne le moins de problème au niveau du glissement de



l'échantillon. Le nombre d'éprouvettes par condition d'essais s'élève à 10 en moyenne dans un souci de fiabilité des résultats. En terme de statistiques, le pourcentage de variations des résultats a été vérifié inférieur à 15 %, afin d'autoriser une comparaison lors des tests à la même vitesse de consigne.

### 2 / 2 / 1 / Tests réalisés sur éprouvettes tissées par nos soins

Au niveau des essais, la réaction des éprouvettes suite au choc conduit à plusieurs types de réponses possibles. Malgré les soins particuliers apportés au serrage, certains échantillons parviennent néanmoins à glisser hors des mors. En règle générale, ce phénomène se traduit par une extraction d'un nombre de fils variable dans le sens de la contrainte de choc. En conséquence de quoi, il est évident que l'interprétation ne peut, bien entendu, se faire de la même façon que pour une perforation franche et nette. Un glissement présente un profil de courbe ductile. Ce premier cas de figure (glissement occasionnel) a surtout été rencontré pour les articles qui n'ont pas subi l'imprégnation de résine. Et c'est ainsi que l'étude particulière relative à ce phénomène permet à nouveau une comparaison entre armures de conception différente. Les résultats sont représentés par la figure suivante:

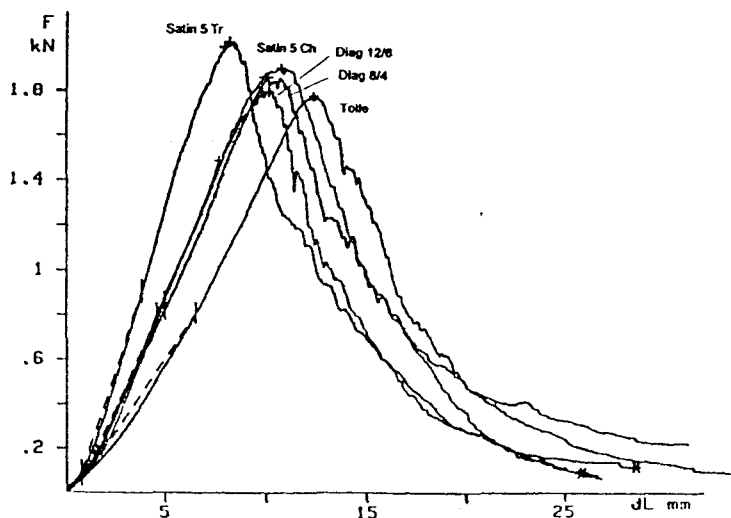


Figure 53- Dart test - Ruptures ductiles

**Influence de l'armure :**

D'une façon similaire à celle réalisée au Chapitre 4 § 1 / 2 pour la traction, la comparaison des résultats relatifs à l'impact conduit à un premier classement des différents échantillons, duquel seuls les 4 les plus performants sont retenus. Une étude sur la réponse énergétique permet ensuite d'affiner la sélection et d'en déduire le meilleur élément.

MP1	Déformation en mm	Fmax en N	Energie à Fmax en Nm	Energie Totale en Nm
Diagonale 12/6	10.80	1863	10.02	22.24
Diagonale 8/4	10.10	1719	8.76	17.34
Satin 5 Tr	10.70	2035	11.11	23.58
Satin 5 Ch	10.62	1969	10.58	23.16
Toile	9.67	1833	8.68	18.36
Sergé Composé	10.32	1465	7.60	17.06
Croisé 2x2	10.50	1273	6.92	14.78
Satiné	9.82	1162	6.24	12.68
Serpentine	9.48	1139	5.86	12.44
Sergé de 6	10.08	919	6.06	10.92

Tableau 12 - Dart test - Réponse des Echantillons non imprégnés

En classement préliminaire, seules sont retenues les armures dont la force maxi excède 1700 N. Les autres offrent visiblement peu d'intérêt. La position des échantillons restants est imagée sur la figure 54, et permet de faire ressortir que sur un plan énergétique, 3 armures devancent la toile : à savoir les satins de 5 Ch et Tr, puis la diagonale 12/6. Les gains en énergie, et en force max. étant plus importants que les pertes en déformation, le classement définitif donne dans l'ordre définitif et décroissant suivant :

- 1 - Satin de 5 Tr      2 - Satin de 5 Ch      3 - Diagonale 12/6

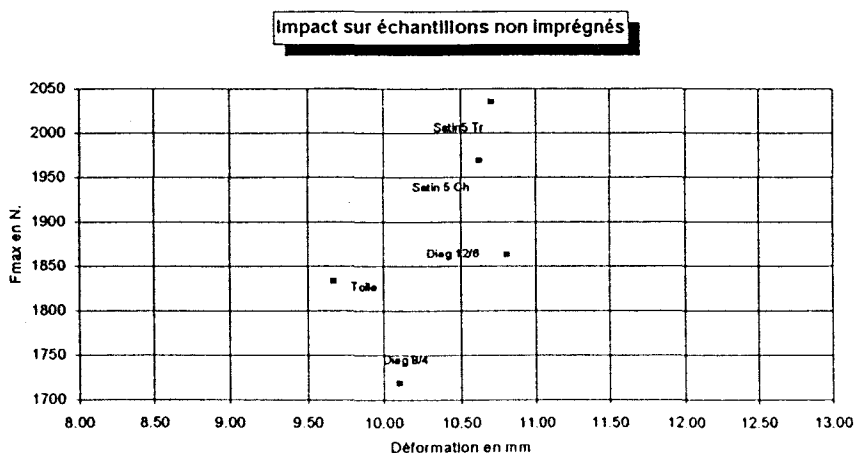


Figure 54 - Dart test / Réponse des échantillons non enduits

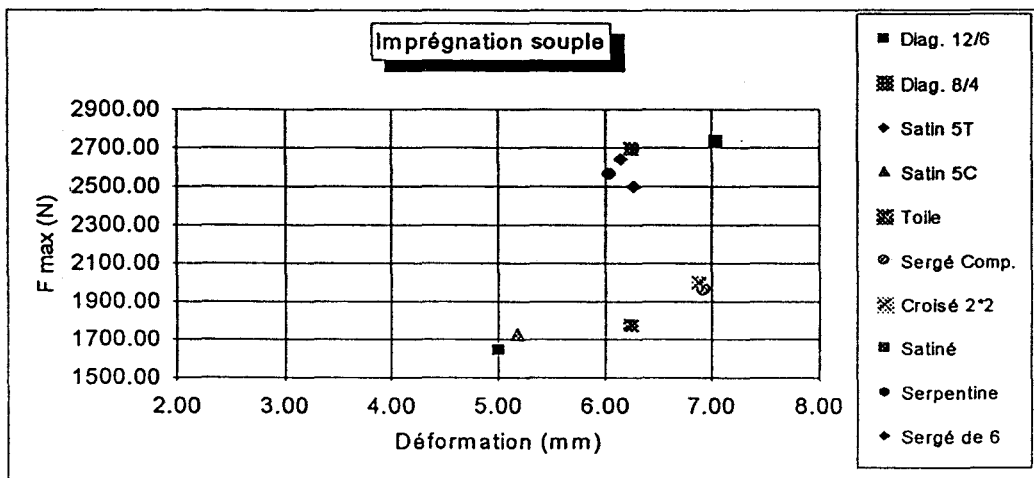
**Influence de l'enduction :**

Selon le même principe de classement, les résultats issus des éprouvettes enduites conduisent aux conclusions suivantes :

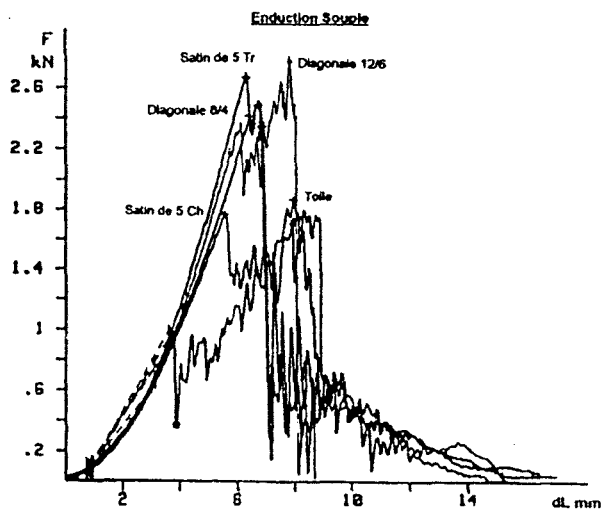
Imprégnation du type	Souple	Semi-rigide	Rigide
1°	Diagonale 12/6	Diagonale 8/4	Satin de 5 Tr
2°	Diagonale 8/4	Satin de 5 Ch	Diagonale 8/4
3°	Satin de 5 Tr	Diagonale 12/6	Diagonale 12/6 <sup>B1</sup>

Tableau 13 - Dart test - Influence de l'enduction

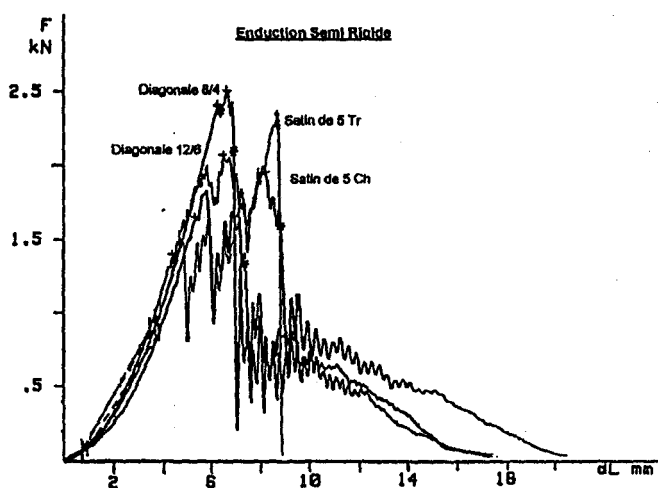
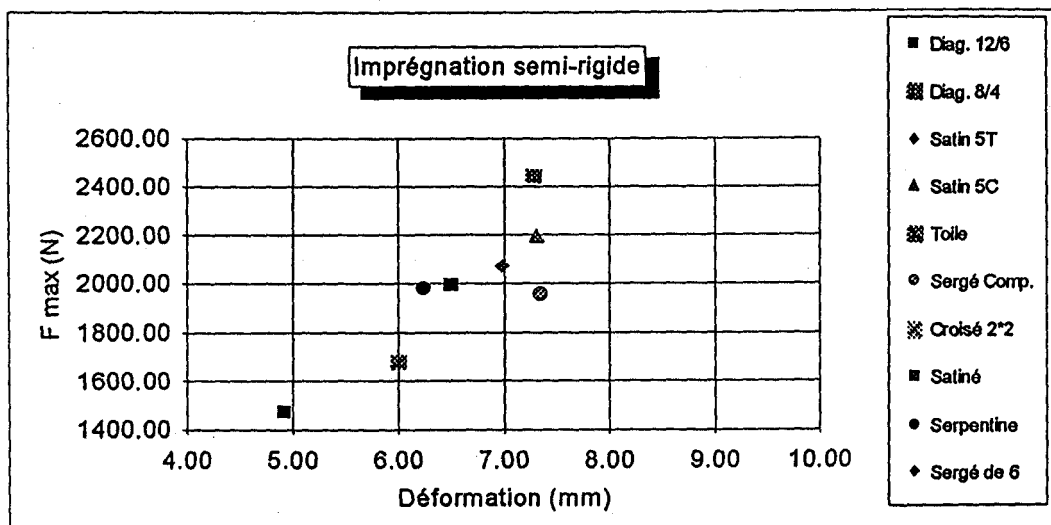
La constatation flagrante qui apparaît au travers de cette étude comparative veut que ce sont toujours les mêmes armures qui se classent en tête de la compétition. Un examen approfondi en terme de CV au niveau des forces et déformations permet de faire émerger *la diagonale 12/6 avec une imprégnation rigide.*



RAP2 /Chap4/Echelle.xls

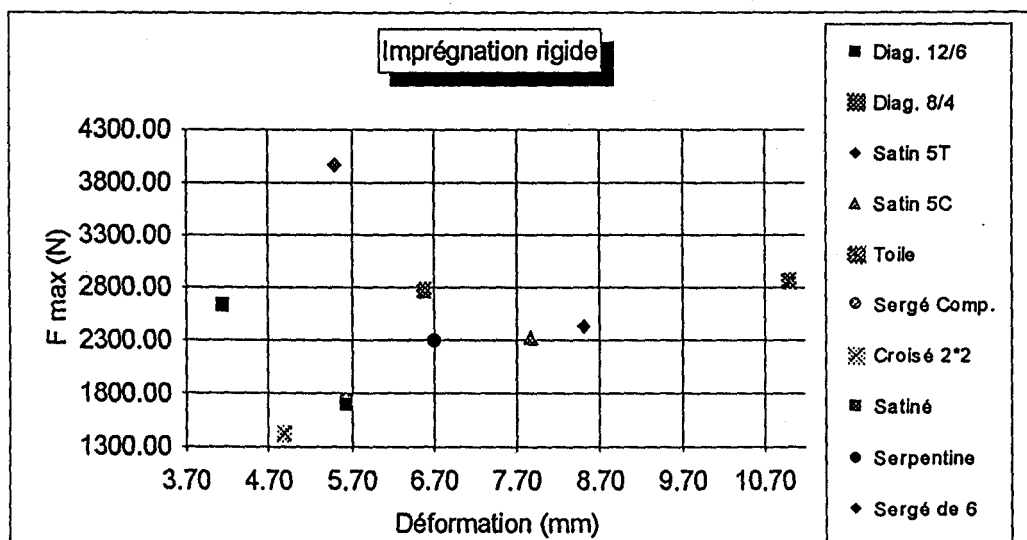


Figures 55 a et b - Dart test / Réponse des échantillons enduits « souples »



Figures 56 a et b - Dart test / Réponse des échantillons enduits « semi rigides »

L'aperçu global des figures précédentes permet de constater une dispersion relativement faible des valeurs de déformation comparativement à l'enduction du type rigide qui suit.



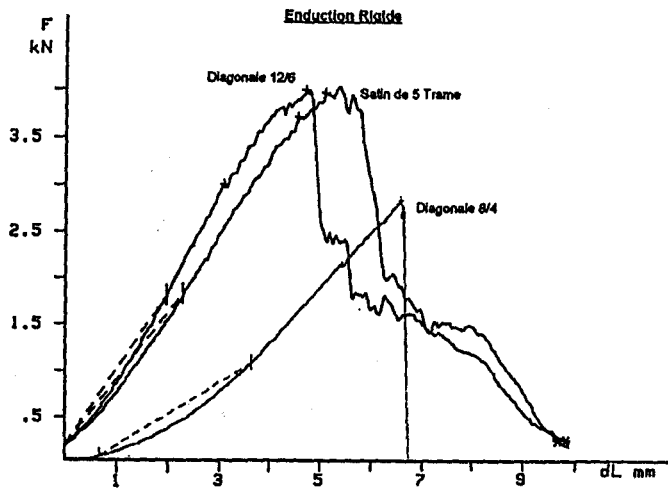


Figure 57 a et b - Dart test / Réponse des échantillons enduits « rigides »

L'importance de la dispersion au niveau de la déformation pour ce cas de figure conduit à des conclusions nettement opposées selon qu'on se place en terme d'énergie, sinon de module.

### 2 / 2 / 2 / Tests réalisés sur éprouvettes commerciales

Les échantillons auxquels il est fait allusion ici concernent ceux référencés page 69, accompagnés d'autres mais d'un grade différent (SK65), et parfois même laminés. Le laminage en question correspond en un dépôt de film de polyéthylène déposé sur une face du tissu, sur une épaisseur de 60 $\mu$ .

Référence N°	Type d'armure	Grade	Réduction fils/cm	Masse surfacique en g/m <sup>2</sup>
505	Toile	SK 66	17.5 x 17.5	175
506	Sergé de 4	SK 66	16 x 16	145
514	Toile	SK 65	8.2 x 8.2	314
514 L	Toile laminée	SK 65	8.2 x 8.2	369
516	Sergé de 6	SK 65	7.5 x 7.5	271
516 L	Sergé 6 laminé	SK 65	7.5 x 7.5	326

Tableau 14- Dart test - Echantillons commerciaux

Les éprouvettes du type "laminé" ont été testées sur chacune des 2 faces, pour voir l'influence du laminage. Il est à noter qu'ici encore le phénomène de glissement est à prendre en considération, surtout pour les échantillons non enduits. Les données obtenues sont donc à prendre sous

réserve, et ne peuvent jamais être prises que comme *minorants* des résistances réelles.

Armure Référence	Type	Fmax en N	D[Fmax] en mm	I[Fmax] en Nm	I[tot] en Nm	Ductilité
Sergé de 4 / 506	non enduit	1603.00	9.15	7.50	18.25	0.59
Toile / 514	non enduit	4656.00	11.87	26.80	40.13	0.33
	laminé 1	5479.00	14.00	42.55	79.15	0.46
	laminé 2	4838.00	13.23	34.43	77.70	0.56
Sergé de 6 / 516	non enduit	1928.00	7.68	7.44	17.24	0.57
	laminé 1	1849.00	8.40	8.40	31.12	0.73
	laminé 2	1838.00	7.80	7.70	18.53	0.58

Tableau 15 - Dart test - Relevé de mesures N° 1

Remarques :

1 - Par ductilité, on entend le paramètre issu du calcul suivant :

$$\text{Ductilité} = (I[\text{tot}] - I[\text{Fmax}]) / I[\text{tot}]$$

2 - Laminé 1 signifie que le film de PE se trouve face au percuteur, alors que pour laminé 2, c'est l'inverse

En comparant les tableaux 15 et 16, une imprégnation améliore visiblement les performances d'un tissu aussi bien en résistance qu'en capacité d'absorption d'énergie. Même les tissus du type laminé ont des performances inférieures. Il n'y a que dans le cas de l'armure toile (514), que l'amélioration est moins nette.

Influence de l'armure :

L'imprégnation d'une armure lâche (516) permet d'égaliser sinon de se rapprocher des performances d'une armure plus serrée (514) et non enduite, alors que les différences sont relativement importantes sur les tissus non imprégnés. Ce type de comportement est illustré en annexe avec d'autres articles.

Influence du type de résine :

Les résines epoxy permettent d'avoir de meilleures performances que les résines polyester en terme de résistance. La disparité des résultats en terme d'énergie n'autorisent pas de conclusions précises. Pour une armure lâche (516,506), les époxy dures et souples donnent de bons résultats.

Concernant l'armure serrée, plus la résine est souple, plus le tissu accepte une force max élevée.

	Type de résine	F max en N	D[Fmax] en mm	I[Fmax] en Nm	I[ <i>tot</i> ] en Nm	Ductilité
506	D 400	3598	19.40	45.10	77.10	0.42
	D 400 - D 2000	3260	9.80	17.35	36.75	0.53
	D 2000 - T 403	3485	10.65	19.75	56.10	0.65
514	PES	5033	10.98	26.38	38.00	0.31
	D 400	5136	12.32	30.90	40.96	0.25
	D 400 - D 2000	5152	10.76	25.94	34.90	0.26
	D 2000 - T 403	5236	11.86	31.40	41.64	0.25
516	PES	2765	8.18	12.24	31.06	0.61
	D 400	3626	8.84	15.44	27.08	0.43
	D 400 - D 2000	3206	6.52	9.52	19.56	0.51
	D 2000 - T 403	3935	8.92	17.68	42.14	0.58

Tableau 16 - Dart test - Relevé de mesures N° 2

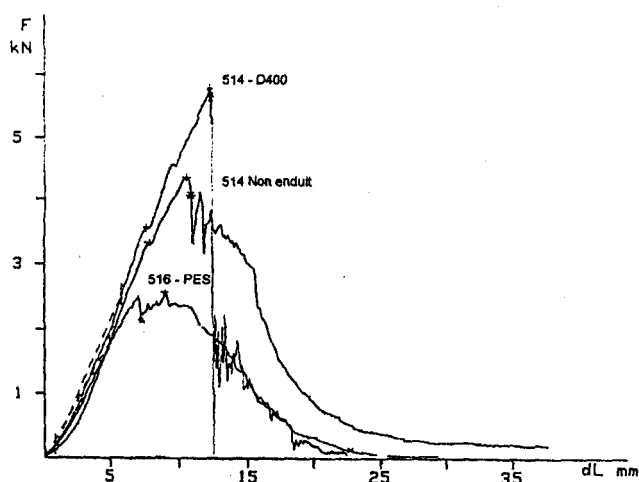


Figure 58 - Dart test / Influence du type de résine

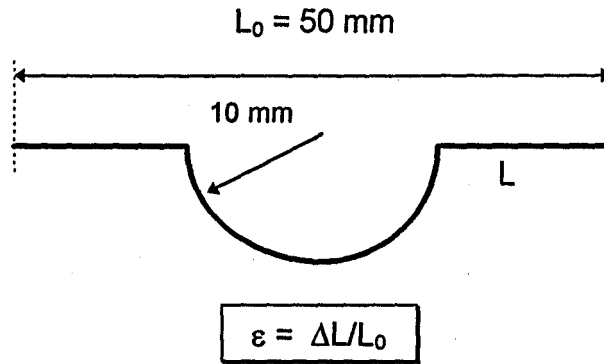
En traction uniaxiale, les allongements à la rupture de la fibre sont de l'ordre de 3 à 4 % (Voir Chapitre 2 § 2/2 - page 24). On constate que dans le cas de l'impact, la flèche à la rupture correspond à un allongement beaucoup plus important.

**Calcul mécanique de la déformation après rupture :**

Un calcul simple à partir des dimensions de l'échantillon ( $\Phi_{int} = 50$  mm), et du percuteur hémisphérique ( $\Phi = 20$  mm) permet de montrer que la flèche à la rupture (de l'ordre de 10 mm, et parfois même supérieure) correspond à

un allongement d'environ 20 %, alors que la valeur pour les fibres en traction uniaxiale est de 3,1 %. Si on tient compte de l'embuvage et du retrait, la valeur de l'allongement à la rupture du tissu peut aller à 7 %. Néanmoins, comme l'entrelacement entre fils de chaîne et de trame tient jusqu'à la rupture et même après, la valeur prévisible de l'allongement à la rupture est en dessous de 7 %, donc nettement en dessous de la valeur expérimentale. Cet allongement supplémentaire serait lié à la déformation plastique<sup>65,67</sup> du PEHP.

*La valeur élevée de la flèche à la rupture est une des causes de la grande valeur de l'énergie absorbée, donc de la grande résistance à l'impact de ce type de composite.*



A la rupture,

$$L = L_0 + \Delta L \geq \pi.r + 30$$

$$\Delta L = (\pi.r + 30) - L$$

$$\Delta L = 31.4 + 30 - 50$$

$$\Delta L = 11.4 \text{ mm}$$

Soit exprimé en % :  $\varepsilon = 22.8$

	514				516	
	PES	D 400	D 400 + D 2000	T 403 + D 2000	D 400	D 400 + D 2000
Allongt en %	23.5	29.5	29.5	23	23.9	23

Tableau 17 - Dart test - Déformations enregistrées.

Les déformations mesurées dépassent les valeurs usuellement mentionnées par la littérature<sup>65,67</sup>. La discussion sera reprise ultérieurement.



### 2 / 3 / Résultats bruts sur échantillons multicouches

Les conditions opératoires sont identiques aux cas de figure précédents, sauf au niveau des mors: ici, ils sont spécifiques aux éprouvettes de plastiques planes.

Tout comme lors des essais en monocouche, deux types de résultats amènent à deux interprétations possibles.

Effectivement, les échantillons de verre d'une part, à base de Kevlar et de PEHP traité par Plasma d'autre part ne présentent pas de problème particulier, alors que ceux de Dyneema non traités ont tendance quant à eux à glisser hors des mors. Ces derniers sont par ailleurs beaucoup plus sensibles à un délaminage important.

Ce délaminage prend des proportions telles que l'éprouvette perd toute sa rigidité, au point que les quatre couches se retrouvent après coup comme si elles étaient superposées sans liant. Dans ces conditions et vu les efforts appliqués aux membranes, il est facilement compréhensible que les tissus glissent hors des mors.

	Type Résine	Fmax en N	D[Fmax] en mm	l[Fmax] en Nm	l[tot] en Nm	Ductilité
Verre	D 400	1682	3.84	2.48	7.52	0.67
	PES	1721	4.10	2.76	11.64	0.76
Kevlar	D 400	1710	4.88	4.94	14.86	0.67
	PES	1434	4.26	3.38	13.30	0.75
506 NT	D 400	5201	9.40	22.28	30.52	0.27
	PES	7390	14.54	57.50	81.16	0.29
505 NT	D 400	7849	11.40	38.27	73.60	0.48
	PES	7989	14.57	61.80	90.07	0.31
506 Traité	D 400	1859	4.50	3.88	9.40	0.59
	PES	1846	4.66	3.64	3.94	0.08
505 Traité	D 400	2801	8.62	12.64	23.36	0.46
	PES	3338	8.84	14.46	16.22	0.11

B4

Tableau 18 - Dart test - Déformations enregistrées.

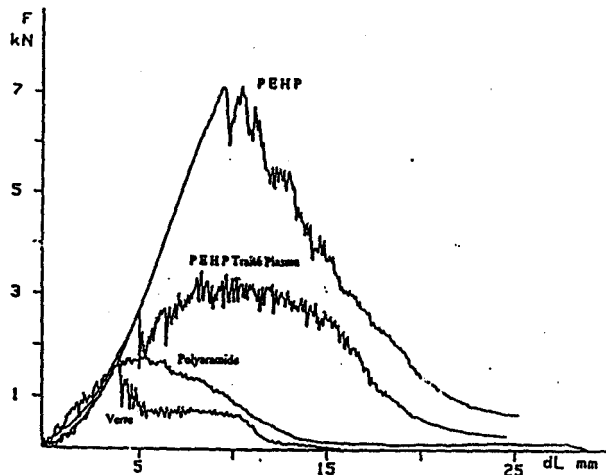


Figure 59 - Dart test / Réponse des échantillons enduits multi-couches

### Conclusions et interprétations :

#### Echantillons PEHP non traités :

C'est avec ces échantillons que l'on obtient les valeurs des forces maximales les plus grandes (de plus de 5000 N à presque 8000 N). On constate par ailleurs les déformations les plus importantes, mais les résultats sont à considérer sous réserve, eu égard aux phénomènes de glissement évoqués. Ces stratifiés absorbent en conséquence de grosses quantités d'énergie par rapport aux composites de verre, de Kevlar et de Dyneema traité. En effet, l'énergie cinétique du percuteur est aussi absorbée par le délaminage des différentes couches, contrairement au stratifié à base de Dyneema traité, qui lui, offre une rupture franche. Encore une fois le délaminage occasionne durant l'essai le glissement de l'éprouvette, hors des mors. Pour une même armure, les valeurs sont pratiquement identiques au niveau  $F_{max}$  et  $l_{(tot)}$ , sauf pour le 506 / D 400, où il y a le moins de glissement. Graphiquement, le glissement est illustré au travers du nuage de points relativement dispersé.

#### Echantillons PEHP traités :

D'un point de vue global, les forces maximales obtenues par le PEHP sont supérieures à celles des stratifiés en verre et en Kevlar, mais inférieures

à celles du Dyneema, lorsqu'il n'est pas traité. Cette infériorité s'explique en partie par la perte de résistance en traction occasionnée par le traitement Plasma, mais aussi par l'amélioration de l'adhérence qui réside entre les différentes couches, ce qui a pour effet de les rendre plus solidaires les unes aux autres.

*Influence de l'armure et de la résine :*

- la résine PES rend le composite plus fragile,
- l'armure toile (505) permet une absorption d'énergie supérieure au Sergé de 4, au verre et au Kevlar,
- le Sergé de 4 a des performances inférieures au Kevlar en terme d'énergie.

*Du fait de la qualité de l'interface fibre/matrice, l'énergie produite par le choc est absorbée en rupture du composite.*

*Echantillons de verre et de Kevlar :*

Ces éprouvettes donnent les résultats les plus faibles en Forces maximales, mais les plus grandes valeurs de « ductilité ». A cet effet, on peut constater qu'effectivement les courbes relatives à ces essais présentent après rupture une symétrie par rapport à  $F_{max}$ . En fait l'échantillon semble jouer le rôle de frein; tandis que les échantillons à base de Dyneema traités offrent une pente descendante, caractéristique de la fragilité occasionnée par le traitement et de la netteté de la réponse. Si l'on ne considère que la résine PES, il y a pour ces cas de figures augmentation de ductilité, contrairement aux cas précédents. L'influence de la résine n'est malgré tout pas évidente à faire ressortir: les énergies absorbées sont pratiquement équivalentes pour le PES et l'époxy. On note enfin peu de dispersion au travers des résultats statistiques. (voir Annexe)

## 2 / 4 / Discussion

Toutes les figures et tableaux présentés précédemment montrent clairement que pour les échantillons étudiés, les composites renforcés PEHP ont les meilleures performances aussi bien pour les forces et flèches à la rupture que pour les énergies absorbées. Dans ces expériences, les composites renforcés verre se comparent honorablement avec ceux renforcés Kevlar. Il est vrai que le nombre de couches, le grammage et le taux massique sont plus élevés pour le verre, mais pas le taux volumique de renfort.

Le Kevlar se comporte comme s'il était fragilisé suite à son incorporation dans la matrice. En effet, nous avons constaté que le Kevlar seul se comporte beaucoup mieux que le verre, comme l'ont constaté aussi Jang et al<sup>70</sup>, qui utilisent des expériences de chute de masse pour leur test de résistance à l'impact. Ces auteurs constatent également que leurs composites renforcés PEHP subissant une chute de masse d'énergie d'environ 100 J ne se rompent pas mais qu'il y a formation de "bosse" où les fils ont subi une déformation plastique importante et que le délaminage est très apparent.

Dans nos expériences utilisant le Dart-test, il y a eu rupture et cette rupture est caractérisée par des valeurs élevées de la force et la flèche à la rupture ainsi que de l'énergie consommée. La flèche à la rupture correspond à un allongement bien plus important que celui donné par les expériences de traction uniaxiale sur les fibres. Le calcul simple à partir des dimensions de l'échantillon et du percuteur hémisphérique permet de montrer que la flèche à la rupture (de l'ordre de 10 mm, et parfois supérieure) correspond à un allongement d'environ 20 %, alors que la valeur pour les fibres en traction uniaxiale est de 3,1 %. Si on tient compte de l'embuvage et du retrait, la valeur de l'allongement à la rupture du tissu peut aller à 7 %. Néanmoins, comme l'entrelacement entre fils de chaîne et de trame tient jusqu'à la rupture et même après, la valeur prévisible de l'allongement à la rupture est en dessous de 7 %, donc nettement en dessous de la valeur expérimentale. Ce comportement distingue le PEHP du Kevlar et du Verre. Cet allongement supplémentaire serait lié à la déformation plastique du PEHP. La valeur élevée de la flèche à la rupture est une des causes de la grande valeur de

l'énergie absorbée, donc de la grande résistance à l'impact des composites PEHP.

Pour remonter à l'origine de la déformation plastique évoquée, rappelons la morphologie des fibres PEHP étudiée au Chapitre 1 § 3/1. Nos observations en microscopie à force atomique (AFM) montrent que ces fibres possèdent une morphologie fibrillaire, les fibrilles ayant une largeur moyenne de 35 nm. Ces résultats sont comparables à ceux donnés par la littérature<sup>20</sup> utilisant l'observation en microscope à balayage électronique. Le degré de cristallinité d'environ 80 % se décompose en 75 % appartenant au réseau orthorhombique et 5 % au réseau monoclinique, le reste étant constitué par du matériau amorphe plus ou moins ordonné<sup>27</sup>. La transformation martensitique dont le polyéthylène cristallin est le siège s'effectue dans le sens monoclinique-orthorhombique quand on chauffe à  $T < 130^{\circ}\text{C}$ <sup>29,31</sup>. Elle se produit dans le sens inverse quand on exerce une contrainte perpendiculaire à la direction des chaînes<sup>31</sup>, ou une contrainte de cisaillement<sup>32,35</sup>.

Nos expériences de diffraction X à grand angle (voir Chapitre 1 § 3/2) confirment la transformation monoclinique-orthorhombique à  $120^{\circ}\text{C}$  dans le cas des fibres Dyneema utilisées. La transformation orthorhombique-monoclinique correspond essentiellement à un glissement d'une chaîne sur deux dans la maille cristalline<sup>31,35</sup>. (voir figures 20 et 21, pages 41 et 42)

On sait aussi que si l'on porte à  $160^{\circ}\text{C}$  le réseau orthorhombique d'un polyéthylène maintenu à l'état contraint, on a la transformation orthorhombique-hexagonale<sup>29,31-35</sup>, qui correspond essentiellement à une rotation d'une chaîne sur deux de la maille orthorhombique plus une translation, ce qui équivaut à un glissement hélicoïdal.

Cette phase hexagonale est très proche de l'état amorphe<sup>68</sup>. Les interactions entre chaînes étant faibles, l'énergie d'activation des transformations entre phases cristallines est aussi faible<sup>33</sup>.

*Les chaînes peuvent tourner et glisser de façon relativement facile sous l'action de la chaleur ou des contraintes mécaniques.*

L'effet morphologique sur les tissus PEHP (Spectra 1000) ayant subi des impacts balistiques a été étudié par la diffraction X aux grands angles<sup>71</sup>. On observe l'existence des variations importantes de la fraction monoclinique, allant tantôt vers une diminution jusqu'à disparition totale, tantôt vers une augmentation jusqu'à 16 %. Les auteurs<sup>27</sup> expliquent que la fraction monoclinique augmente sous l'effet de l'impact tant que la température n'est pas trop élevée (de l'ordre de 60 à 100°C), puis elle diminue lorsque la température approche celle de la fusion. Ces deux effets contradictoires provoquent une fluctuation quelque peu aléatoire dans les observations. Les auteurs n'excluent pas non plus une transformation de la phase cristalline de départ vers une phase hexagonale « rotateur » où les orientations du plan du zigzag planaire ne sont pas fixes. Toutes ces observations vont dans le sens de la confirmation des phénomènes de rotation et de glissement des chaînes sous l'effet de l'impact transversal, aussi bien dans la phase cristalline que dans la phase amorphe plus ou moins ordonnée. Dans notre étude où les fibres de polyéthylène subissent un impact transversal à une vitesse de 5 m/s, nous pensons qu'il y a aussi rotation, et glissement des chaînes, englobant les transformations orthorhombique-monoclinique et orthorhombique-hexagonal. Nous attribuons à ce phénomène de glissement la valeur importante de l'allongement à la rupture et la déformation plastique décrits plus haut. Ces transformations consomment de l'énergie. La valeur est modeste pour une unité monomérique (de l'ordre de 0,25 à 0,5 kcal/mole de  $C_2H_4$ )<sup>33</sup>, mais pour toutes les chaînes, la valeur est conséquente. Nous pensons que ces transformations de phase contribuent de façon importante aux valeurs élevées de force de rupture et d'énergie absorbée des tissus et composites renforcés PEHP ayant subi un impact transversal.

Enfin, l'interaction fibre-matrice étant faible dans les composites renforcés PEHP, le délaminage important observé suite à l'impact contribue aussi à augmenter la valeur de l'énergie totale absorbée.

Un tissu PEHP traité plasma, bien que permettant un meilleur mouillage de la résine-matrice, voit ses performances diminuées de façon considérable : la cause réside pour une certaine part à la diminution des qualités intrinsèques de la fibre (baisse de la résistance d'environ 10 %), mais

pour une grande part au fait que le délaminage étant bien moins important, l'énergie absorbée diminue de façon conséquente.

### CONCLUSION

Cette étude met en évidence la grande résistance à l'impact transversal des composites renforcés PEHP, comparativement aux homologues de polyaramide et verre. Nous attribuons cette performance à plusieurs causes : les glissements et rotations de chaînes permettant des transformations de phases se produisant dans la microstructure des fibres de PEHP, et le délaminage important fibre-matrice. Ces phénomènes sont soit absents, soit peu importants dans le cas du polyaramide et du verre. Enfin, une autre cause intervient également de façon importante: grande vitesse de propagation des ondes, donc de dissipation d'énergie dans les fibres de PEHP.

### **3 / Mesures de vitesses de propagation d'ondes acoustiques**

La technique<sup>17</sup> a déjà été abordée au Chapitre 1 § 2/3, et appliquée à ce stade au cas du fil multifilamentaire pour en déduire son module<sup>18</sup> dynamique. Ici elle est mise en pratique sur les matériaux souples réalisés sous forme de tissus, ou de non-tissé du type unidirectionnel UD. La mesure du module dynamique appliqué aux textiles sous forme de matériaux souples a été réalisée par plusieurs auteurs. Blyth et Postle<sup>69</sup> essayent de le mesurer et d'en interpréter les résultats, avec quelques difficultés; Ryan et Postle<sup>70</sup> tentent de conforter la théorie en 1981; M.A. Rousselle et Nelson<sup>71</sup> trouvent corrélation avec la notion d'abrasion. Au niveau des conditions opératoires, les échantillons ont nécessité l'emploi d'un matériel couramment utilisé en impression textile: Il s'agit en l'occurrence de cadres plats, et des accessoires qui permettent d'imposer une tension biaxiale constante à l'article. Le schéma du dispositif expérimental présenté page 34 peut dès lors s'adapter aisément au nouveau cas de figure. Les capteurs piézo générateurs A et récepteurs B sont positionnés à une distance  $d$  l'un de l'autre mais cette fois sur

l'éprouvette tendue, selon 3 axes de mesures: L'un en chaîne, l'autre en trame et le dernier en diagonale. Le relevé de mesures s'effectue toujours selon la même démarche que pour le fil, à savoir 5 mesures par test.

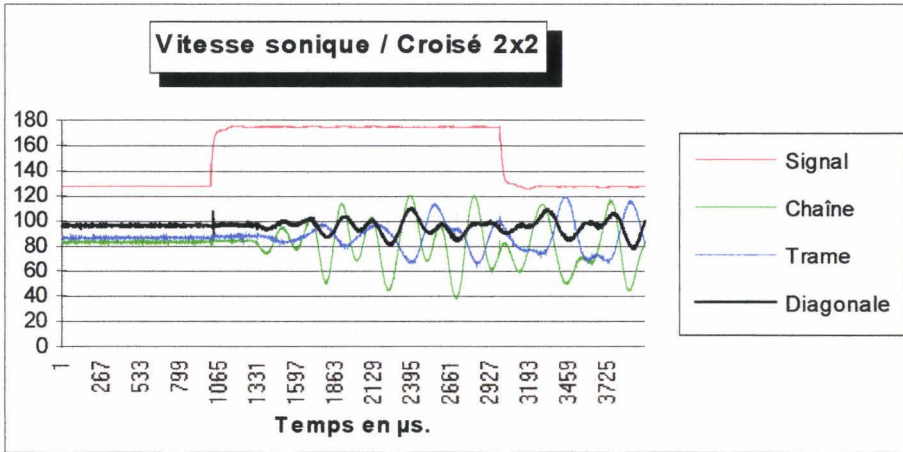


Figure 60 - Vitesse sonique - Exemple de réponse du tissu dans ses 3 directions principales

Pour une direction donnée (en Chaîne par exemple), et sur un même article, l'influence de la distance entre capteurs piézo-électriques a été mesurée au travers de 6 points : 3, 5, 8, 10, 15 et 20 cm. Chacun d'entre eux donne naissance à une valeur du temps de parcours du signal, exprimée en µs, et permet de ce fait l'obtention d'un nuage de points, duquel il est possible ensuite d'extraire les équations des 2 droites de régression correspondantes. La pente de l'une des deux conduit à la connaissance de la vitesse sonique. Le produit des coefficients directeurs issus des équations donne le coefficient de corrélation  $r$ , qui traduit quant à lui l'homogénéité du produit testé. D'un point de vue général,  $r$  donne satisfaction pour tous les échantillons testés: il tourne autour de 0.99. Afin d'illustrer le comportement des articles vis à vis des impulsions et des réponses obtenues dans tous les sens, sous tableur du type EXCEL il y a possibilité de tracer les courbes représentatives sous la configuration "radar". A la page suivante les différents tissus testés présentent ainsi le profil de leur réaction en vitesse sonique, simulant par la même occasion l'attitude de l'éprouvette suite à l'impact d'un projectile. Les résultats rejoignent les conclusions déjà obtenues en Dart-test au Chapitre précédent. A noter néanmoins l'attitude caractéristique du non tissé unidirectionnel, qui se refuse à toute propagation en diagonale: ce qui est

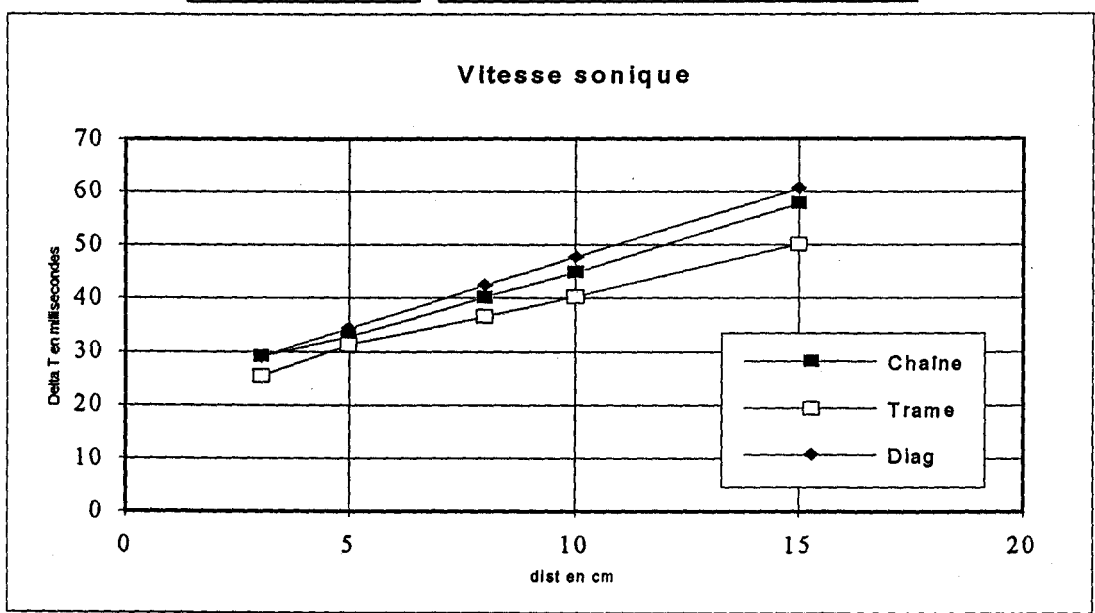


compréhensible. Pour les tissus, par contre, la variation du type d'armure entraîne des disparités similaires à celles déjà mentionnées dans les tests précédents. Cette méthode devrait donc permettre en conséquence de simuler aisément ce qui se passe en réalité lors des tests de résistance au choc.

**Détermination expérimentale des vitesses acoustiques**  
**sur un échantillon de tissu du type :**

**Toile - 1**

Distance entre capteurs en cm		Relevé de valeurs de Delta T exprimées en millisecondes		
Sens du tissu		Chaîne	Trame	Diag
3		29.13	25.4	29.05
5		32.77	31.23	34.3
8		40.11	36.55	42.35
10		44.78	40.26	47.67
15		57.77	50.08	60.6



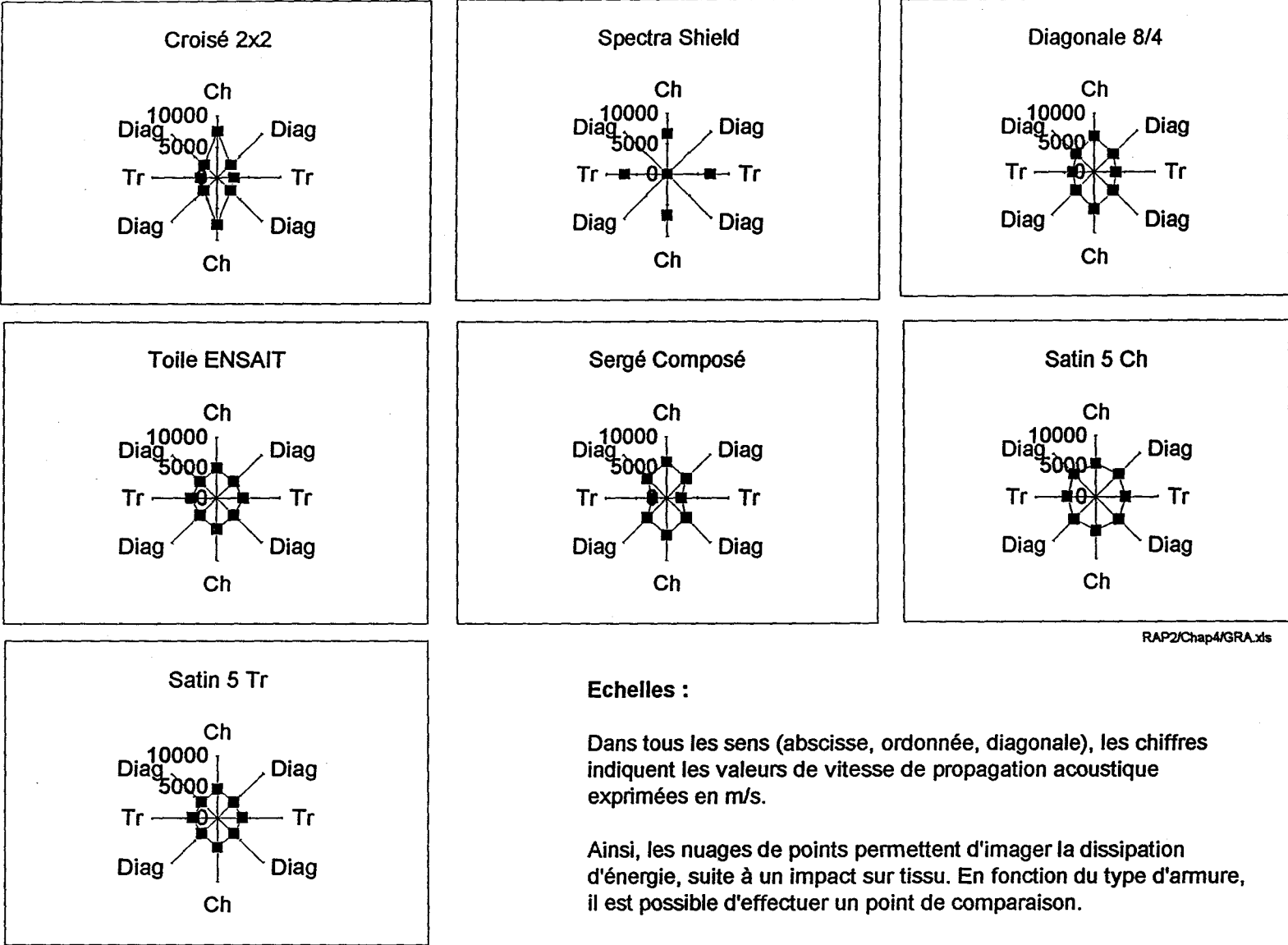
RAP2/Chap4/Ctoile1.xls

**Equations des droites de régression :**

En Chaîne :	$x = 0.41 y - 8.74$	$y = 2.41 x + 21.16$
En Trame :	$x = 0.50 y - 10.05$	$y = 2 x + 20.3$
En Diagonale :	$x = 0.38 y - 8.05$	$y = 2.63 x + 21.20$

**Valeurs des vitesses de propagation :**

Sens	Vitesse en m/s
Chaîne :	4140.94
Trame :	4971.96
Diagonale :	3796.82



RAP2/Chap4/GRA.xls

**Echelles :**

Dans tous les sens (abscisse, ordonnée, diagonale), les chiffres indiquent les valeurs de vitesse de propagation acoustique exprimées en m/s.

Ainsi, les nuages de points permettent d'imager la dissipation d'énergie, suite à un impact sur tissu. En fonction du type d'armure, il est possible d'effectuer un point de comparaison.

Figure 61 - Vitesse sonique - Différents profils de réponse des tissus

Type d'armure	Ch	Diag	Tr
Croisé 2x2	7533	2943	2607
Spectra Shield	6692		6991
Diagonale 8/4	6143	4404	3642
Toile ENSAIT	4972	3797	4141
Sergé Composé	5891	4476	2325
Satin 5 Ch	5409	5178	4764
Satin 5 Tr	4661	3529	3832

RAP2/Chap4/VS.xls

Tableau 19 - Vitesse Sonique / Relevé de mesures comparatives.

Les mesures du tableau ci-dessus contribuent à faire comprendre pourquoi l'armure toile n'est pas la meilleure dans la résistance à l'impact. Dans la mesure où il y a ici aussi un classement à effectuer, et si l'on ne s'en tient jamais dans un premier temps qu'aux deux seuls paramètres que sont la chaîne et la trame, il ressort du graphe ci-dessous que les résultats semblent rejoindre ceux de l'impact. Il est vrai que toutes les armures n'ont pas été testées (*en fait, par manque de matière d'oeuvre*).

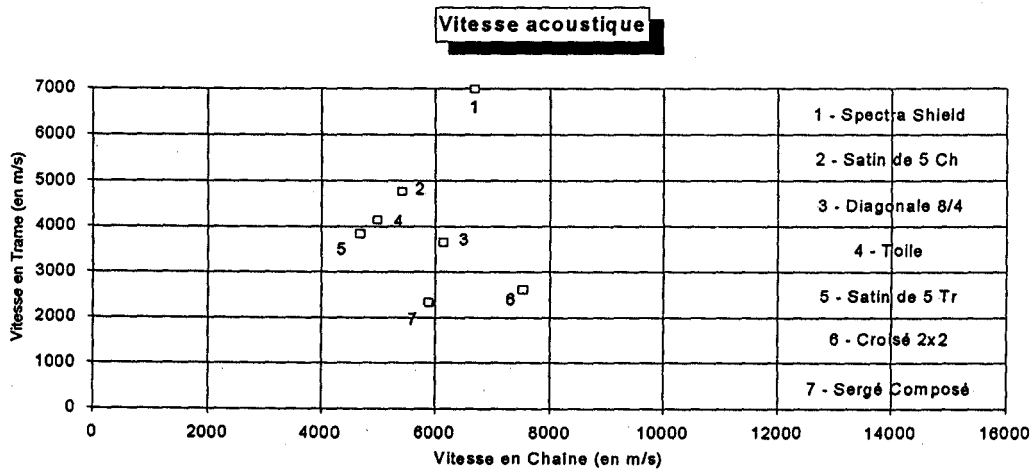


Figure 62 - Vitesse sonique / Influence du type d'armures.

La propagation de l'onde acoustique semble propice dans le matériau qui offre le moins d'ondulations générées par l'entrelacement des fils de chaîne et de trame, dû au type d'armure tissée. Cette réflexion tend à rejoindre les schémas de la page 96, relatifs au pourcentage de points d'attache des différentes contextures, dans la mesure où la dissipation d'énergie est reliée à la vitesse sonique et constitue un des facteurs de l'absorption d'énergie lors de l'impact.

## 5 / Calcul<sup>72</sup> de simulation numérique de la pénétration d'échantillons composites par projectiles (programme AUTODYN)

Les calculs numériques ont été réalisés au sein du Laboratoire Mécanique et Matériaux rattaché au Département de Génie Civil - I.U.T. A Université Claude Bernard Lyon I. Ils se rapportent à des essais effectués suivant la norme NFT 51-118 "Essai de choc multiaxial instrumenté". Les matériaux testés sont des composites à base de Polyéthylène à Haute Performance avec matrice en DGEBA + D 400.

### Principe de modélisation :

Le logiciel AUTODYN 2D de Century Dynamics est un code de calcul explicite aux différences finies. Le programme interactif permet l'analyse de réponse dynamique en grande déformation des solides non linéaires. Les processeurs utilisés sont du type : Lagrange, Euler, ALE et Shell.

AUTODYN 2D fournit des solutions pour la dynamique non-linéaire, l'interaction fluide-structure, les problèmes de grandes déformations et grands déplacements,...

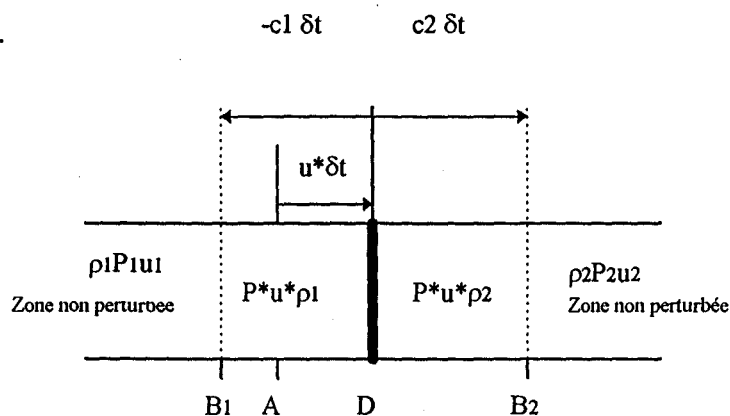
Les équations de mouvement de deux corps pouvant entrer en collision sont données sous forme de tenseur cartésien par :

$$\sigma_{ij,j} + \rho f_j = \rho \dot{u}_j$$

La relation non-linéaire déformation-déplacement peut s'écrire ainsi :

$$\varepsilon_{ij} = u_{i,j} + u_{j,i} + u_{k,i} \cdot u_{k,j}$$

Si l'on considère deux corps 1 et 2 entrant en collision, avant le contact, les caractéristiques de chaque corps ne sont pas affectés, mais dès que le contact commence, il n'en est plus de même. Dans la zone de transition, il y a conservation de l'énergie, de la masse et de la quantité de mouvement.



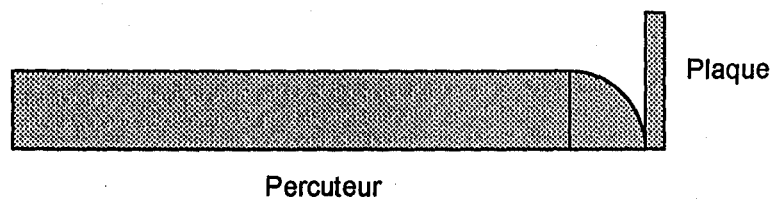
Les différences finies discrétisent spatialement le problème à l'aide de quadrilatères. Les zones de glissement et les surfaces de contact sont gérées directement par le mode de calcul. Chaque matériau est défini par une loi de comportement, une équation d'état, un critère de rupture ou d'endommagement, et un paramètre d'érosion. Dans le cas des composites, c'est un critère de rupture directionnel qui est utilisé. La relation  $\sigma - \varepsilon$  donne dans ce cas :

$$[\sigma]^n = [\sigma]^{n-1} + [S].[\varepsilon].\Delta t$$

Pour le critère de rupture, les données nécessaires sont les contraintes et les déformations à rupture:  $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \tau_{12}, \varepsilon_{11}, \varepsilon_{22}, \varepsilon_{12}$

Le problème étant axisymétrique, seule une partie de la structure est modélisée.

Le percuteur est en acier. Son maillage est réalisé par 70\*10 éléments. La vitesse du percuteur est considérée comme constante et égale à 5 m/s. La plaque est modélisée à partir de 20\*3 éléments. Elle est supposée parfaitement encastée aux bords.



Les caractéristiques mécaniques et géométriques sont rassemblées dans le tableau suivant. Il traite du cas d'une armure non traitée, enduite de résine du type DGEBA + D 400: c'est l'échantillon référencé 505 NT / D 400.

Epaisseur en mm	1.5
Masse volumique en kg/m <sup>3</sup>	1400
Coefficient de Poisson	0.3
Module d'Young en MPa	11000
Module de cisaillement en MPa	3000
Sigma 11 à rupture en MPa	2700
Epsilon à rupture	0.06

B7

L'orientation des 4 couches respecte la séquence [0°, 45°, 0°, 45°].

**Résultats & Conclusions :**

Les profils de déformations durant l'essai, ainsi que les courbes Force-Déplacement se trouvent 0 la page suivante.

	F max. en N	D à Fmax. en mm
505 T/ D 400	2801	8,62
Autodyn 2D	3500	7

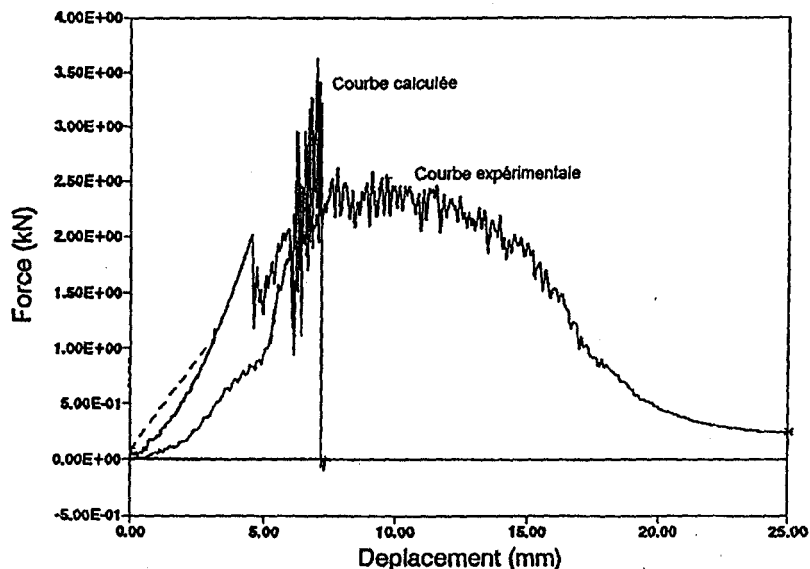


Figure 63 - Test de perforation Autodyn

Les écarts observés peuvent trouver une explication dans :

- les incertitudes concernant les propriétés mécaniques des matériaux, notamment au niveau de leurs rigidités et de leurs caractéristiques à la rupture,
- la prise en compte par Autodyn du matériau réel comme un matériau globalement homogène du fait des données fournies,
- les incertitudes concernant les conditions aux limites des encastrements de la plaque.

La valeur calculée du déplacement D à Fmax est égale à 7 mm, alors que la valeur expérimentale est supérieure. La différence peut provenir, comme nous avons discuté antérieurement, de la déformation plastique du PEHP, due au glissement et à la rotation des chaînes.

Il y a de plus une impossibilité de connaître le comportement post-pic du matériau. Il est donc nécessaire d'avoir une meilleure identification des propriétés des matériaux ainsi qu'un calage par rapport au montage réalisé. Ces conditions entraînent la mise en place d'un programme plus conséquent que celui mené ici. A titre indicatif, le temps de calcul pour un cas particulier (changement des conditions d'appuis, d'une des propriétés mécaniques,...) est de 6 heures.

## 6 / Conclusion

Première question, à laquelle il est possible d'apporter une réponse : Pourquoi le PEHP est-il un excellent matériau dans le domaine de la résistance à l'impact ?

Nos études ont fourni les explications suivantes :

- Le PEHP permet une excellente dissipation d'énergie grâce à une vitesse élevée de propagation d'onde longitudinale. Cette vitesse élevée donne du même coup une valeur élevée du module, lors de la réponse du matériau à une brève impulsion ou à un impact, ce qui augmente la performance mécanique du matériau.

- le PEHP permet de par sa constitution (faible interaction latérale entre chaînes) une déformation plastique liée au glissement et à la rotation des chaînes, et aux transformations de phases.

Seconde question : Pourquoi telle armure répond plus favorablement à l'impact qu'une autre ?

Il est possible d'en trouver une partie de la réponse dans la valeur des vitesses de propagation des impulsions (onde sonore ou impact), dans les différentes directions de la structure étudiée. L'énergie se dissipe d'autant mieux que cette vitesse est élevée, mais ceci est à considérer pour toutes les directions. Ainsi, les structures du type unidirectionnel permettent les vitesses les plus élevées, mais dans une seule direction; alors que le tissu qui permet une dissipation relativement régulière dans toutes les directions, ne fournit

pas de valeurs élevées des vitesses à cause du grand nombre de points d'intersection. D'où l'intérêt d'autres types d'armures relevé par les mesures.

Une autre partie de la réponse réside dans les caractéristiques mécaniques de la structure tissée: moins de points de liages signifie aussi moins de frottement et d'endommagement des caractéristiques mécaniques des fils.

En définitive, si l'on se place :

*Au niveau des textiles non enduits, soit des tissus*

Globalement, les résultats montrent l'intérêt d'autres types d'armures que la toile, usuellement utilisée en industrie (par tradition ?) ceci sans apporter aucune difficulté supplémentaire d'un point de vue technique: il s'agit entre'autre de la diagonale. L'irrégularité des "flottés" et le nombre de points de liage inférieur provoquent visiblement moins de cisaillement sur les fils, et plus de relief favorable à l'enduction. Tout comme pour la traction, la même constatation subsiste pour la résistance au choc.

*Au niveau des textiles enduits et des Composites*

Les produits réalisés présentent des forces et des faiblesses par rapport à leurs homologues à base de fibre de verre et d'aramide. La grande force du PEHP réside dans sa capacité d'absorption de grandes quantités d'énergie. Sa faiblesse, outre la limite relativement basse de température d'utilisation, se situe dans le petit module de flexion obtenu. Dans ce type de structure, il en résultera deux possibilités d'utilisation du PEHP :

On pourra chercher à privilégier un effet de "fusible", où l'absorption d'énergie lors de chocs sera maximale, mais le composite perdra dans ce cas son intégrité par délaminage. Préférentiellement on utilisera alors des tissus à base de PEHP sans traitement de surface spécifique.

Globalement, les résultats des divers tests montrent que les résines époxydes conviennent à ce type de composites. Les modules de flexion des stratifiés obtenus demeurent relativement faibles, et imposent pour obtenir des matériaux rigides la nécessité d'employer le PEHP au titre de complément vis à vis des fibres traditionnelles, soit sous forme de tissus hybrides ou de structures "sandwich".



## **CHAPITRE 5**

### **Conclusion Générale**

## **SOMMAIRE**

**Conclusion générale**

**Liste des Figures**

**Liste des Tableaux**

**Références bibliographiques**

**Annexes**

## Conclusion Générale

La fibre de PEHP est devenu en un temps record un produit industriel, qui pénètre de nombreux secteurs d'applications, notamment grâce à sa légèreté et sa grande ténacité. L'un d'entre-eux concerne le vêtement de protection balistique.

Notre étude montre, que c'est visiblement la structure chimique et la morphologie fibrillaire du matériau qui lui confèrent de telles propriétés.

Après impact, un examen microscopique des fibres permet de révéler une séparation en fibrilles, ainsi que des déformations plastiques importantes. La séparation des fibres en fibrilles lors du choc consomme de l'énergie, ce qui contribue de façon notable à l'énergie totale absorbée.

Quant à la déformation plastique observée, elle doit avoir pour cause un allongement irréversible d'un certain nombre de fibres.

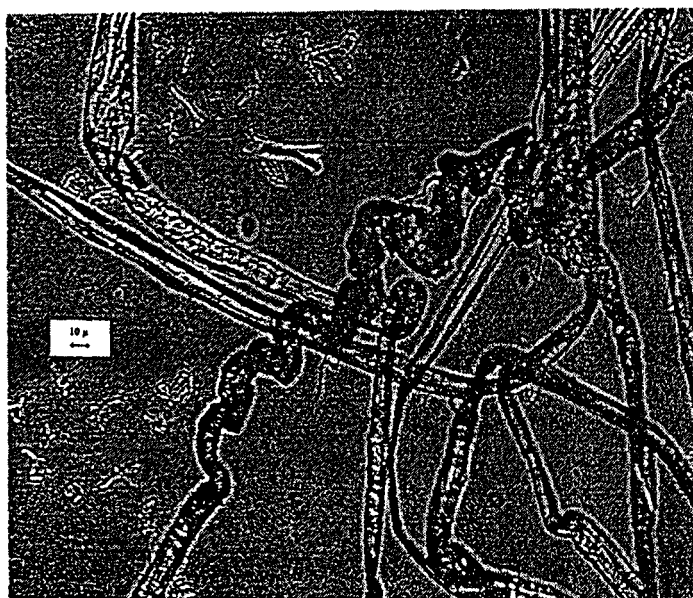


Figure 64 - Déformation plastique de fibres suite à l'impact

Cette modification s'explique au travers de glissements et de rotations de chaînes, et de changements de phase, qui se produisent dans la microstructure par l'action conjuguée des contraintes mécaniques et

thermiques occasionnées par le choc. Des essais de diffraction aux rayons X confirment la transformation monoclinique-orthorhombique.

*Les chaînes peuvent tourner sur elles-même et glisser de façon relativement facile, sous l'action de la chaleur et de contraintes mécaniques.*

Un dépôt de résine sur ce type de matériau lui permet par ailleurs de pénétrer le domaine très vaste du composite. Une décohésion entre le tissu et la matrice lors d'un choc a pour effet de provoquer une consommation supplémentaire d'énergie. Dans le cas des fibres de PEHP, la faible interaction fibre-matrice provoque une décohésion.

Pour ce qui est des différentes méthodes d'analyses utilisées pour caractériser les produits, il est possibles d'entrevoir de réels espoirs, et en particulier dans le sens d'une simulation, qui permet d'espérer un rapprochement de plus en plus efficace, de ce que nous offre la réalité. A titre d'exemple, les mesures de vitesses de propagation d'ondes acoustiques longitudinales devraient prospérer dans le domaine de la métrologie textile.

En terme de perspectives immédiates pour ce matériau, et dans la poursuite logique de ces travaux, il nous faut mentionner que des recherches s'orientent actuellement, en collaboration avec le C.R.E.L (Centre de Recherches et d'Etudes de la Logistique de la Police Nationale) Le thème fédérateur porte sur la réalisation d'un vêtement de protection anti-arme blanche. L'axe de recherche concerne ici également la confection d'armures, mais dans le domaine du tissu double-face, et d'en analyser le comportement au choc toujours, mais avec un percuteur du type pointe d'épée.

## **Liste des Figures**

Figure N° 1 : Fibres techniques / Caractéristiques.

Figure N° 2 : Structure en « Shish-Kebab ».

Figure N° 3 : Diagramme schématique du procédé de filage à l'état de gel.

Figure N° 4 : Non-Tissé unidirectionnel (0-90).

Figure N° 5 : Appareil Vibroskop (Zweigle).

Figure N° 6 : Appareil Vibroskop (Zweigle). Détail de la tête de travail : éprouvette sous tension.

Figure N° 7 : Dévidoir pour fil (Zweigle).

Figure N° 8 : Banc d'essai de Régularimétrie (Zellweger Uster).

Figure N° 9 : Diagramme des variations de masse.

Figure N° 10 : Banc de traction Zwick.

Figure N° 11 : Courbe de traction :  $F \text{ (cN)} = k.f(L \text{ en } \%)$ .

Figure N° 12 : Vitesse sonique : Déplacement

Figure N° 13 : Vue longitudinale d'un faisceau de fibres.

Figure N° 14 : **MEB** - PEHP vierge - Gross : x 4000.

Figure N° 15 a : **MEB** - PEHP étiré puis relâché - Gross : x 2000.

Figure N° 15 b : **MEB** - PEHP étiré puis relâché - Gross : x 8000.

Figure N° 16 : **AFM** - Tête de travail.

Figure N° 17 : **AFM** - Structure fibrillaire du PEHP.

Figure N° 18 : **AFM** - Formation de « bosses » après traction.

Figure N° 19 : **RX** - Diffraction obtenue de plans successifs d'atomes.

Figure N° 20 : **RX** - Structure cristalline du PEHP / Système orthorhombique.

Figure N° 21 : **RX** - Système monoclinique.

Figure N° 22 : **RX** - Influence de la température.  
de haut en bas : 30°C, 60, 90, 100, 110, 120, 130, 140.

Figure N° 23 : **DSC** - Tête de travail.

Figure N° 24 : **DSC** - Exemple de thermogramme.

Figure N° 25 : **DSC** - Essai sur fibre élémentaire.

Figure N° 26 : **Tissage** : Armure toile ou Taffetas.

Figure N° 27 : **Tissage** : Armure Sergé de 3.

Figure N° 28 : **Tissage** : Armure Sergé de 4.

Figure N° 29 : **Tissage** : Armure Sergé de 5.

Figure N° 30 : **Tissage** : Armure Croisé 2 x 2.

Figure N° 31 : **Tissage** : Armure Satin de 5.

Figure N° 32 : **Tissage** : Armure Satin de 4.

Figure N° 33 : **Tissage** : Métier à lance Fatex.

Figure N° 34 : **Tissage** : Principe mécanique

Figure N° 35 : **Tissage** : Sélection de duites.

Figure N° 36 : **Tissage** : Insertion trame.

Figure N° 37 : **Tissage** : Répartition des différentes armures sur Tissu.

Figure N° 38 : **Tissage** : Planification des armures

Figure N° 39 : **Tissage** : Caractéristiques des fibres et Tissus.

Figure N° 40 : **Enduction** : Foulard.

Figure N° 41 : Courbes DSC.

Figure N° 42 : **Traction** : Courbes  $F$  (en N) =  $f$ (Allgt en %).

Figure N° 43 : **Traction** : Courbes  $F$  (en N) =  $f$ (Allgt en %).

Figure N° 44 : Positionnement par rapport au point « idéal ».

Figure N° 45 : Classement dynamométrique définitif

Figure N° 46 : Dispersion dynamométrique en fonction de la nature des fibres.

Figure N° 47 : Profils de réponse des tests sur tissus non enduits.

Figure N° 48 : **Impact** : Machine hydraulique Zwick Rel 1853.

Figure N° 49 : **Impact** : Schéma de l'installation.

Figure N° 50 : **Impact** : Tête de travail équipée d'un percuteur hémisphérique.

Figure N° 51 : **Impact** : Exemple de résultat d'un essai.

Figure N° 52 : **Impact** : Influence de la vitesse.

Figure N° 53 : **Dart Test** : Ruptures ductiles.

Figure N° 54 : **Dart Test** : Réponse des échantillons non-imprégnés.

Figure N° 55 a et b : **Dart Test** : Réponse des échantillons enduits « souples »

Figure N° 56 a et b : **Dart Test** : Réponse des échantillons enduits « semi rigides »

Figure N° 57 a et b : **Dart Test** : Réponse des échantillons enduits « rigides »



Figure N° 58 : **Dart Test.** : Influence du type de résine.

Figure N° 59 : **Dart Test.** : Réponse des échantillons enduits multi-couches.

Figure N° 60 : **Vitesse sonique** : Exemple de réponse du tissu dans ses 3 directions principales

Figure N° 61 : **Vitesse sonique** : Différents profils de réponse des tissus.

Figure N° 62 : **Vitesse sonique** : Influence du type d'armures.

Figure N° 63 : Test de perforation Autodyn

Figure N° 64 : Déformation plastique de fibres suite à l'impact.

**Liste des Tableaux**

Tableau N° 1 : **Régularimètre Zellweger Uster** - Réglages de base - Différents échantillons testés.

Tableau N° 2 : Relevé de mesures expérimentales en vitesse sonique.

Tableau N° 3 : **Tissage** - Répartition des fils de chaîne.

Tableau N° 4 : **DSC** - Conditions opératoires optimales.

Tableau N° 5 : **Enduction** - % des constituants.

Tableau N° 6 : **Enduction** - Influence du traitement de surface.

Tableau N° 7 : **Enduction** - Caractéristiques des stratifiés.

Tableau N° 8 : **Enduction** - Taux de cristallinité obtenus en DSC.

Tableau N° 9 : **Traction** - Tissus non traités.

Tableau N° 10 a : **Traction** - Echantillons imprégnés.

Tableau N° 10 b : **Traction** - Echantillons imprégnés.

Tableau N° 11 : **Traction** : Influence fibre - Echantillons non traités.

Tableau N° 12 : **Dart Test** - Réponse des échantillons non imprégnés.

Tableau N° 13 : **Dart Test** - Influence de l'enduction.

Tableau N° 14 : **Dart Test** - Echantillons commerciaux.

Tableau N° 15 : **Dart Test** - Relevé de mesures N° 1.

Tableau N° 16 : **Dart Test** - Relevé de mesures N° 2

Tableau N° 17 : **Dart Test** - Déformations enregistrées.

Tableau N° 18 : **Dart Test** - Déformations enregistrées.

Tableau N° 19 : **Vitesse sonique** : Relevés de mesures comparatives

**Références Bibliographiques**

## Références bibliographiques

- [1] : Ir. R. Kirschbaum, DSM Research BV - J.L.J. Van Dingenen, Dyneema Vof  
P.O. Box 599, 6130 AN Sittard, The Netherlands  
« Advances in gel spinning technology & DYNEEMA fiber Applications »
- [2] : J.L.J Van Dingenen, **Features**, Technical Textiles International, 1992, 24
- [3] : A.Keller and M.J.Machin, *J. Macromol. Sci. Phys.*, 1967, B1-1, 41
- [4] : A.J.Pennings, J.M.A.A Van der Mark, H.D.Booij, *Kolloid Z.Z. Polym.*, 1970, 236,  
99
- [5] : J.M. Andrews and I.M. Ward, *J. Mater. Sci.*, 1970, 5, 411
- [6] : P. Smith and P.J. Lemstra. *Makromol. Chem.*, 1979, 180, 2983.
- [7] : P. Smith and P.J. Lemstra. *J. Mater. Sci.*, 1980, 15, 505.
- [8] : I.M. Ward and D.L.M Cansfield - « Advances in Fibre Science » - *High Performance Fibres* / Ed. The Textile Institute
- [9] : M. Kunz, M. Dreschler et M. Möller. *Polymer*. 1995, 36, 1331
- [10] : "DYNEEMA : Propriétés et Applications" - Documents DSM High Performance  
Fibers (Heerlen, The Netherlands)
- [11] : F. Monfort: Aspects scientifiques de l'industrie lainière - DUNOD Paris 1960 -  
4.3.3.2, 91
- [12] : Recueil de normes - **Textiles** - Terminologie et méthodes d'essais - tome 1,  
1975, **NF G 01** - 001, page 104
- [13] : Recueil de normes - **Textiles** - Terminologie et méthodes d'essais - tome 1,  
1975, **NF G 07** - 077, page 314

- [14] : L'INDUSTRIE TEXTILE N° 983 - Octobre 1969 - La notion de filabilité et le contrôle de régularité, 480
- [15] : USTER® STATISTICS 1989 N° 36 Décembre 1989
- [16] : Recueil de normes - **Textiles** - Terminologie et méthodes d'essais - tome 1, 1975, NF G 07 - 008, page 255
- [17] : C.F. Zorowski et T. Murayama: *Textile Res. J.*, Oct 1967, 852-860
- [18] : W.H. Charch and W.W. Moseley, *Textile Res. J.*, Juil. 1959, 526
- [19] : J.W. Ballow and J.S. Silverman, *Textile Res. J.*, 1944, 14, 282-292
- [20] : Ch. Oudet, H.H. Kausch, *J. Mater. Sci. Letters*, 1991, 10, 1061-1065
- [21] : J.B. Donnet et E. Custodero - *L'actualité chimique* - Mars- Avril 1992 - 157
- [22] : L. Porte / Spectra 2000 - La microscopie à force atomique - n°155 Mars 91 30.
- [23] : J. Klein, Conférence au Palais de la Découverte, Octobre 1989 Application de la microscopie tunnel en technologie
- [24] : Nanoscope StandAlone AFM / documents Digital Instruments
- [25] : S.N. Magonov, K. Quarnström, V. Elings, H. J. Cantow - *Polymer Bulletin*, 1991, 25, 689-694
- [26] : S. K. Mukhopadhyay, *Textile Progress*, 19, 45
- [27] : C.R. Desper, S.H. Cohen and A.O. King, *J. Appl. Polym. Sci.*, 1993, 47, 1129-1142
- [28] : D.L. Tzou, K. Schmidt-Rohr and H.W. Spiess, *Polymer.*, 1994, 35, 4728-4733
- [29] : A.J. Pennings and A. Zwijnrenburg, *J. Polym. Sci., Polym. Phys Ed.*, 1979, 17, 1011-1032

- [30] : S. Ottani, B.E. Wagner and R.S. Porter, *Polymer.Communications*, 1990, 31, 370-372
- [31] : Y. Takahashi, Ishida and M. Furukasa, *J. Polym. Sci., Polym. Phys Ed.*, 1988, 26, 2267-2277
- [32] : M.E. Vickers and H. Fisher, *Polymer*, 1995, 36, 2667-2670
- [33] : T. Yemni and R.L. Mc Cullough, *J. Polym. Sci.*, 1979, 11, 1385-1411
- [34] : W. Wu, P.G. Simpson et W.B. Black: *J. of Polym. Sci.*, 1980, 18, 751-765
- [35] : Ir. Els Verdonck : Thèse de doctorat : « The interphase in composite materials: interactions between polyethylene fibres and an epoxy matrix », Université de Bruxelles, Décembre 1993, 42-47
- [36] : G. Camilléri - *T.U.T* - 3° Trimestre 1992, 5,
- [37] : I.T.F - *T.U.T* - 4° Trimestre 1993, 10,
- [38] : Recueil de normes - **Textiles** - Terminologie et méthodes d'essais - tome 1, 1975, **NF G 00 - 012**, 24
- [39] : Recueil de normes - **Textiles** - Terminologie et méthodes d'essais - tome 1, 1975, **NF G 00 - 005**, page 21
- [40] : Recueil de normes - **Textiles** - Terminologie et méthodes d'essais - tome 1, 1975, **NF G 00 - 012**, page 23
- [41] : Recueil de normes - **Textiles** - Terminologie et méthodes d'essais - tome 1, 1975, **NF G 00 - 012**, page24
- [42] : Recueil de normes - **Textiles** - Terminologie et méthodes d'essais - tome 1, 1975, **NF G 01 - 001**, page 25
- [43] : Ch. Labriffe - *Manuel de Tissage* - Bibliothèque Professionnelle, 1923, page 311

[44] : Recueil de normes - **Textiles** - Terminologie et méthodes d'essais - tome 1, 1975, **NF G 01** - 001, page 26-27

[45] : Recueil de normes - **Textiles** - Terminologie et méthodes d'essais - tome 1, 1975, **NF G 01** - 001, page 26

[46] : Prospectus **FATEX**

[47] : S. Gauger - Cours ENSAIT - *Préparation au Tissage*

[48] : T.P. "Matériaux Macromoléculaires & Composites" **INSA** Polyester insaturé - page 142

[49] : Notices Jeffamines **TEXACO\*** - *Performance Chemicals* - D 400 & D 2000 POLYOXYPROPYLENEDIAMINE [CAS 9046-10-0]

[50] : Notices Jeffamines **TEXACO\*** - *Performance Chemicals* - T 403 POLYOXYPROPYLENETRIAMINE [CAS 39423-51 -3]

[51] : J.B. Gaillard - "Etude cinétique d'un système epoxy/amine par différentes techniques d'analyse." DEA Chimie organique et macromoléculaire - **USTL** (1994)

[52] : Simonet - Techniques de l'ennoblissement des Textiles - Edition de "L'Industrie Textile", 1982

[53] : V. Gournay et B.Vantorre - Recherche bibliographique sur le traitement Plasma - **ENSAIT** (1994)

[54] : Antarius Andreas Johannes Maria Peij - Thèse de doctorat, Technische Universität Eindhoven "High Performance Polyethylen Fibers in structural Composites" (1993)

[55] : Bernard, Brunel, Neyton - "Etudes théoriques et expérimentales des caractéristiques mécaniques des matériaux composites - Mémoire de fin d'études - **ENSAIT** (1979)



- [56] : Recueil de normes - **Textiles** - terminologie et méthodes d'essais - tome 2, 1975 **NF G 07-001** Janvier 1973, page 1
- [57] : W.E. Warren - *Polymer Composite*, August 1992, 13, 278-284
- [58] : D.C Prevorsek, H.B. Chin, Y.D. Kwon, and J.E. Field, *J. Appl. Polym. Sci., Applied Polym. Symposium*, 1991, 47, 45-66
- [59] : P. D.C Prevorsek, Y.D. Kwon and H.B. Chin, *Polym. Eng. and Sci.*, 1990, 34, 141-152
- [60] : P. D.C Prevorsek, C.H. Harpell, Y.D. Kwon, H.L. Li and S. Young, « Ballistic Armor Material from Spectra Fibers, The 33 rd International SAMPE Symposium (March 1988)
- [61] : P. K.F.M.G.J. Scholle, M.J.N. Jacobs, H.A.A. Omlou, G.J.M. Loete and G.H.A. Janse, 9 th Int. Conf. SAMPE European Chapter, June 14-16, 1988, Milano, page 253
- [62] : P. E.H.M. Van Gorp, K.F.M.G.J. Scholle, 28 th Int. Man-Made Fibers Congress (I.C.T), 20-22 Sep 1989, Dornbirn, Austria.
- [63] : A.A.J.M. Peijs, Thèse de Doctorat : « High-Performance Fibres in Structural Composites? Promises, Reality and Applications in Hybrid Composites », Université Eindhoven (Déc. 1993)
- [64] : P. R.H. Zee, C.J. Wang, A. Mount, B.Z. Jang and C.Y. Hsieh, *Polym. Composites*, 1991, 12, 196-202
- [65] : P. B.Z. Jang, L.C. Chen, L.R. Hwang, J.E. Hawkes and R.H. Zee, *Polym. Composites*, 1990, 11, 144-157
- [66] : Recueil de normes - **Plastiques** - terminologie et méthodes d'essais **NF T 51-118** Décembre 1985, page 170-180

[67] : S.L. Kessler, G.C. Adams, S.B. Driscoll, D.R. Ireland - ASTM STP 936 / "Instrumented Impact Testing of Plastics and Composite Materials".

[68] : H. Sckönherr, G.J. Vansco and A.S. Argon, *Polymer*, 1995, 36, 2115-2121

[69] : G. Blyth and R. Postle: *Textile Res. J.*, Oct 1979, 601-608

[70] : A. Ryan and R. Postle: *Textile Res. J.*, Nov 1981, 732-740

[71] : M.A. Rousselle and M.L. Nelson: *Textile Res. J.*, Apr 1980, 211-217

[72] : D. Genin, P. Arnaud, P. Hamelin, *Textile Composites in Building Construction*, 1992, Part 2, 101-110 © PLURALIS 1992

## ANNEXES

Annexe N° 1 : Tests de Régularité sur fils multifilamentaires YARNTESTER.

Annexe N° 2 : Essais Microscopiques.

Annexe N° 3 : Diffraction aux Rayons X.

Annexe N° 4 : Tissage.

Annexe N° 5 : Détermination du retrait et de l'embuvage MAILLEMETRE.

Annexe N° 6 : Analyse par microcalorimétrie différentielle à balayage.

Annexe N° 7 : Tests de Traction uniaxiale sur Tissus.

Annexe N° 8 : Tests de Résistance à l'impact DART-TEST.

Annexe N° 9 : Mesure de vitesses de propagation d'ondes acoustiques sur tissus.

Annexe N° 10 : Calcul de simulation numérique de la pénétration d'échantillons composites par projectiles. Programme AUTODYN



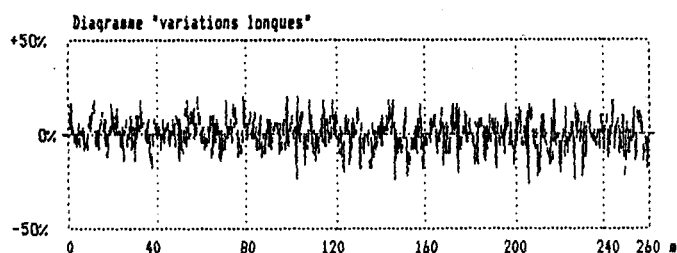
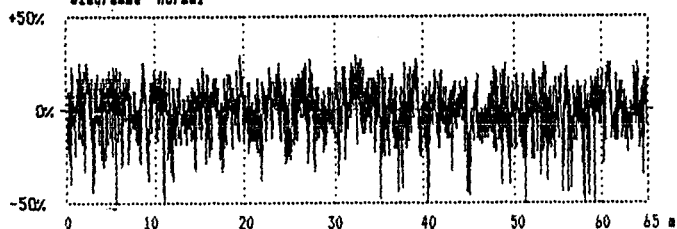
**Tests de Régularité massique  
sur Fils multifilamentaires.  
YARNTESTER**

ESSAI du 10/04/96 B.001/Mesure.003

Résultats détaillés du Vectran -

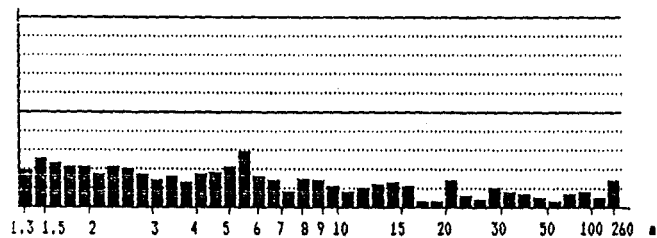
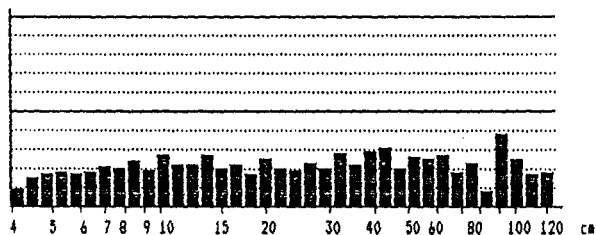
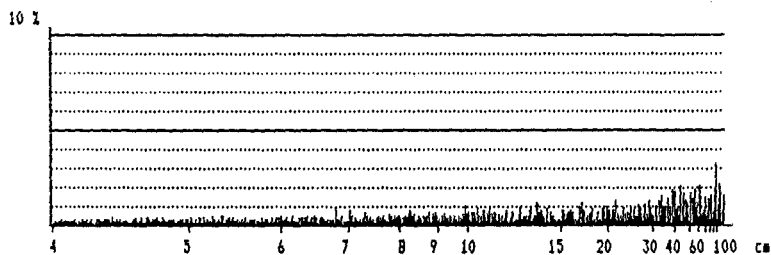
REGULARITE	bobine	CV(Z)	U(Z)	FINS	SRGS	NEPS (/km)
	16-	11.26	8.88	122.1	0.0	0.0

Régularisation de la bobine No 16- Vectran  
Diagramme "normal"



Spectrogramme de la bobine No 16- Vectran

5 MAX 3,00 I  
3,28 I 91,02 cm



ESSAI du 10/04/96 B.001/Mesure.004

Résultats détaillés du Technora -

REGULARITE	bobine	CV(%)	U(%)	FINS	GRDS	NEPS (/km)
	16-	10.89	9.38	0.0	0.0	0.0

Régularigramme de la bobine No 16- Technora  
Diagramme "normal"

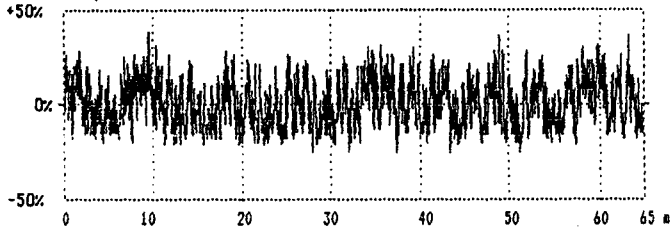
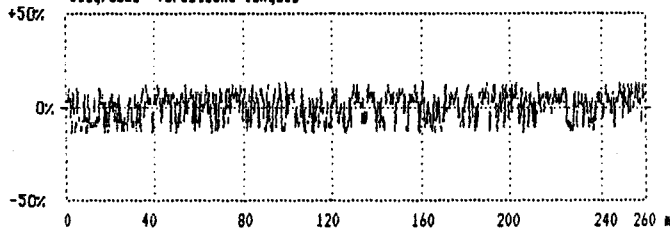


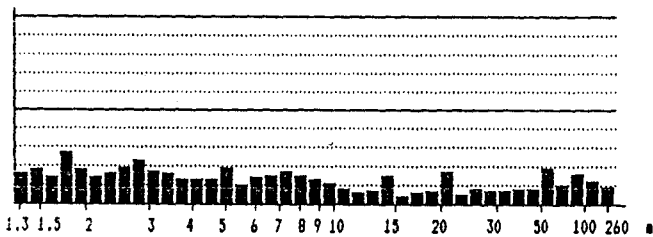
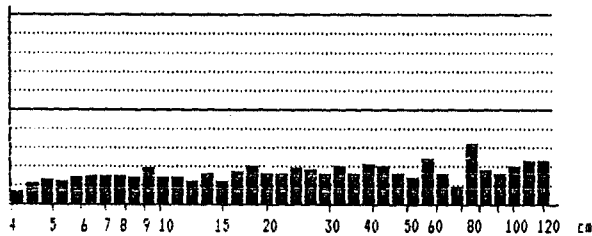
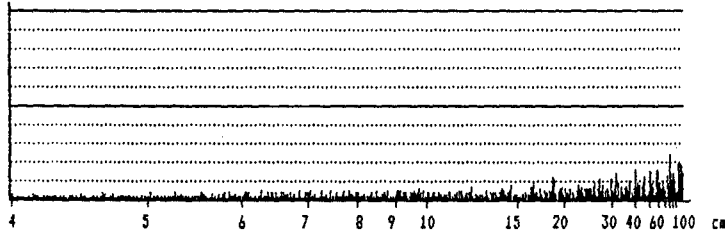
Diagramme "variations longues"



Spectrogramme de la bobine No 16- Technora

3 MAX 3.00 %

10 %

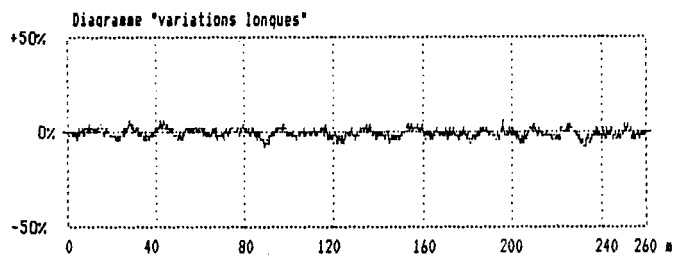
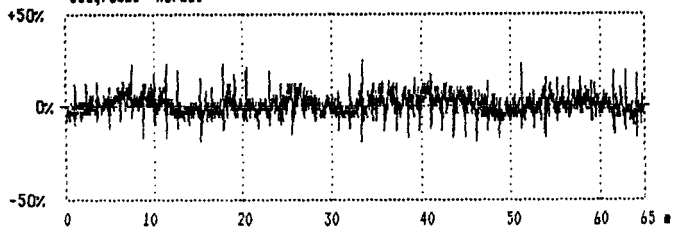


ESSAI du 10/04/96 B.001/Mesure.005

Résultats détaillés du Dynesma -

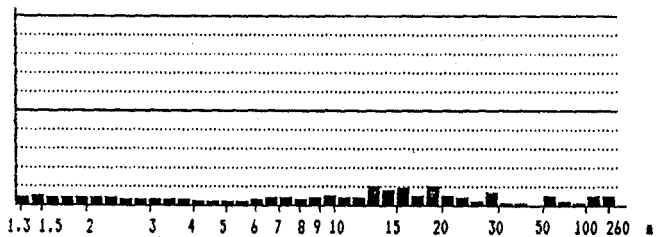
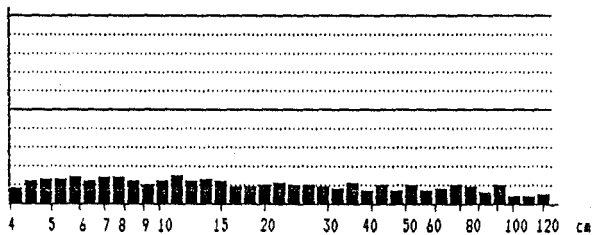
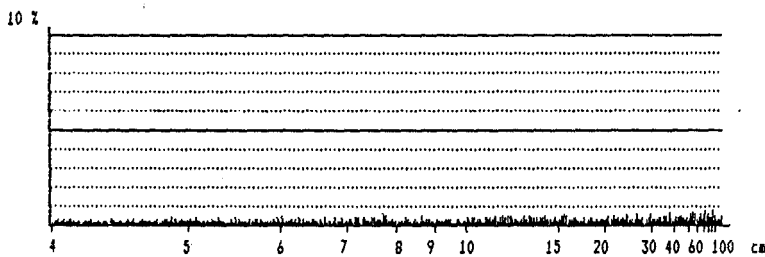
REGULARITE	bobine	CV(%)	U(%)	FINS	BROS	NEPS (/km)
	16-	4.14	3.20	0.0	0.0	0.0

Régularigramme de la bobine No 16- Dynesma  
Diagramme "normal"



Spectrogramme de la bobine No 16- Dynesma

5 MAX 3.00 %





## **Essais Microscopiques.**

**CENTRE COMMUN DE MICROSCOPIE ELECTRONIQUE-UFR DE BIOLOGIE-LILLE I**

Loïc BRUNET Tél. 20.43.41.03 - Fax 20.43.68.49

**ECHANTILLONS                      REF.                      GROSS.                      NOTES**

éch. non traité 10/01/1996	E 0001	4000	aspérités	4
	E 0002	6000	autres aspérités	
	E 0003	8000	aspérités	
	E 0004	3000	grosse aspérité	

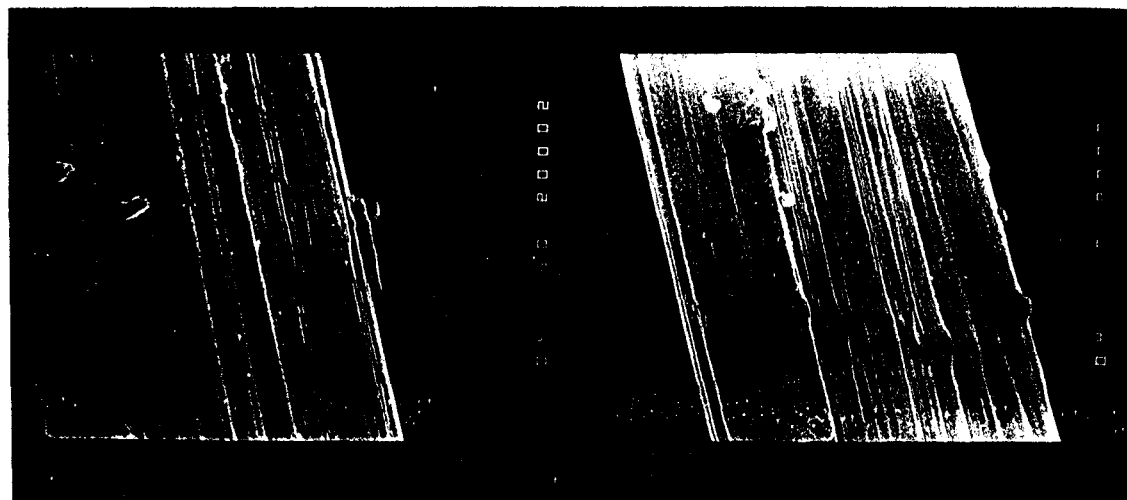
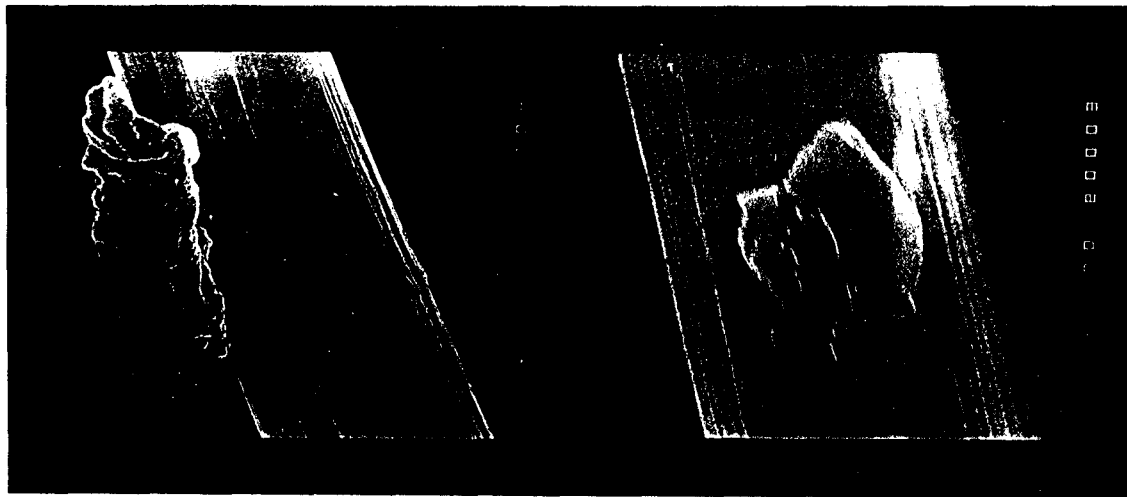
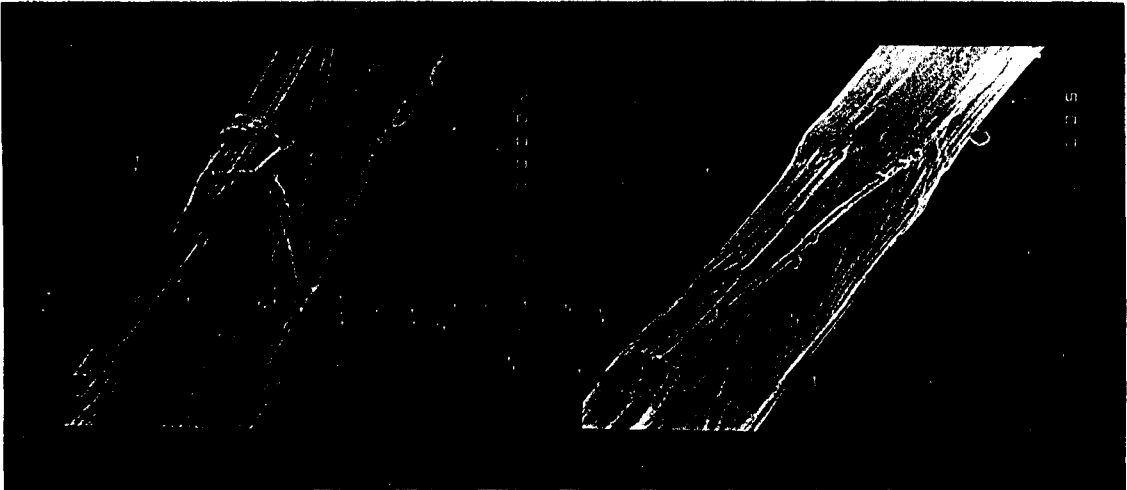
éch. étiré 10/01/1996	E 0005	2000	zone effilée	7
	E 0006	2000	idem (cf photo recadrée)	
	E 0007	8000	même zone que la précédente, aggrandie	

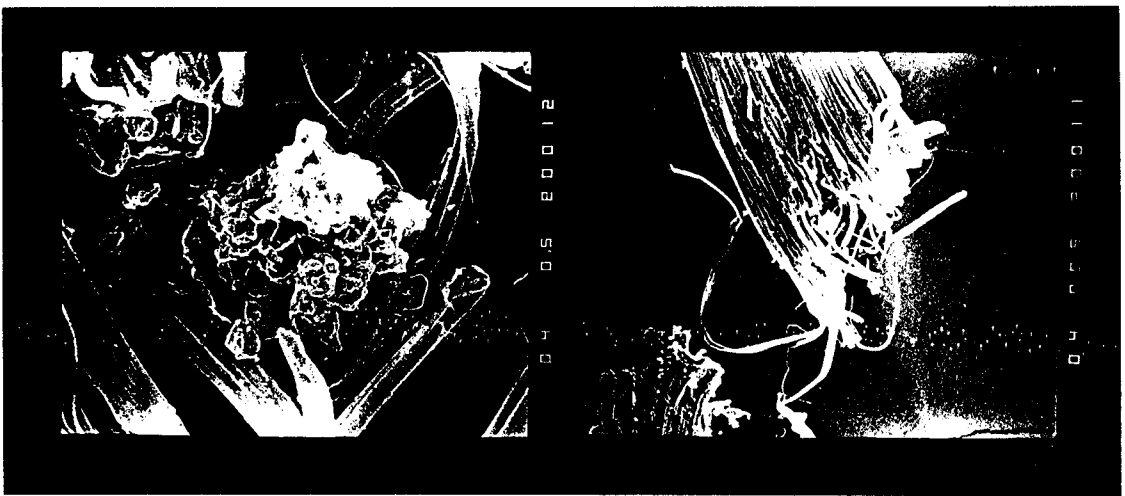
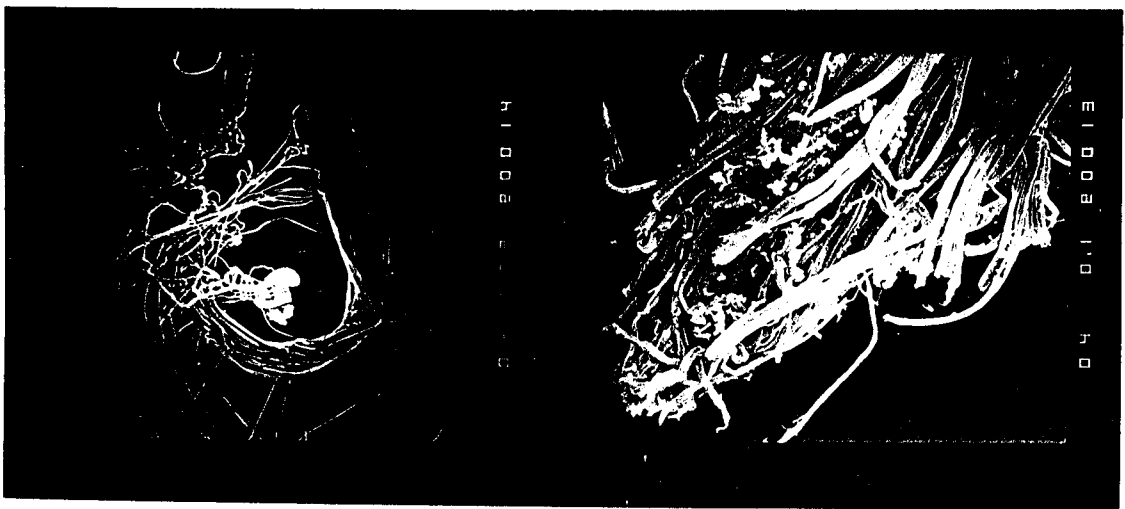
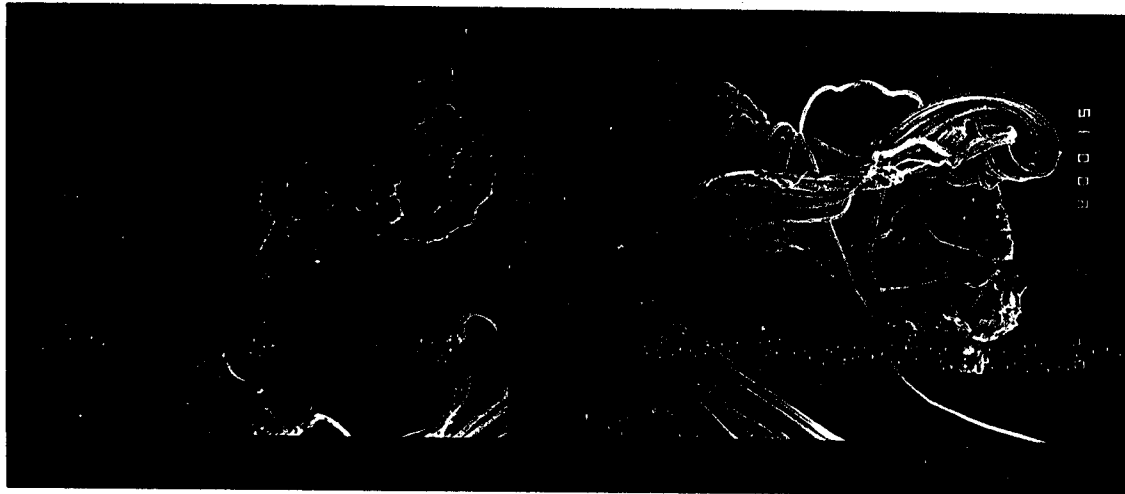
après rupture 10/01/1996	E 0008	500	vue générale	10
	E 0009	500	boucle	
	E 0010	3000	profil de rupture	

tissé + résine 10/01/1996	E 0011	50	vue d'une extrémité	13
	E 0012	500	même photo aggrandie	
	E 0013	100	autre extrémité	

tissé sans résine 10/01/1996	E 0014	20	vue de deux extrémités en "crochet"	16
	E 0015	100	gros plan d'une extrémité	
	E 0016	100	gros plan de l'autre extrémité	

ECHELLE	
grossissement	micron(s) par cm
20	500,00
50	200,00
100	100,00
500	20,00
3000	3,33
4000	2,50
5000	2,00
6000	1,67
8000	1,25

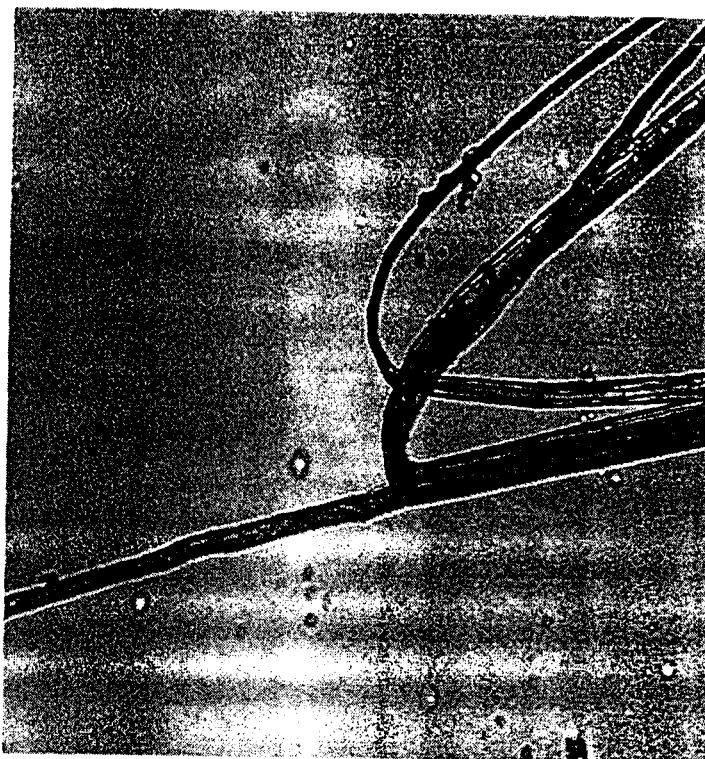




545e2.tif



430.tif



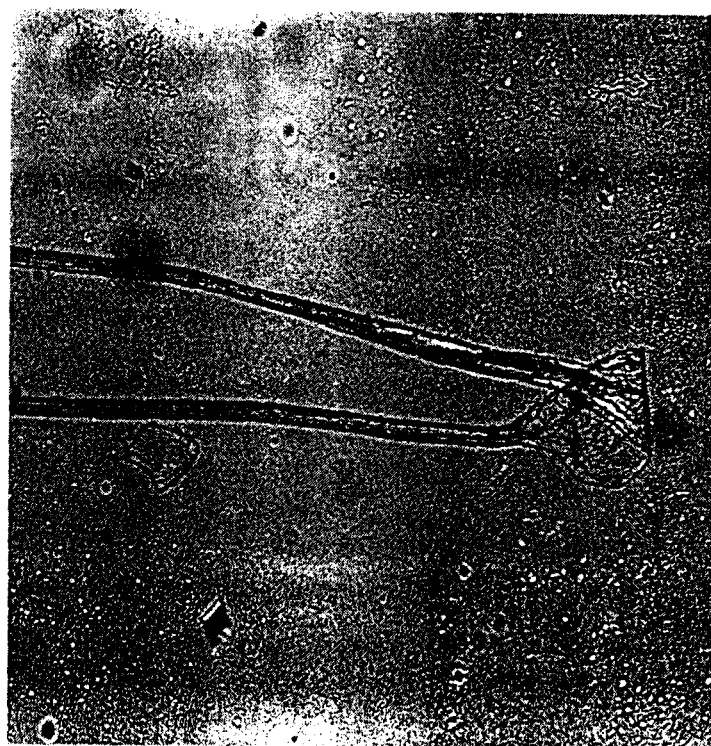
Clichés photographiques issus d'un examen en microscopie optique de fibres, ayant subi un endommagement suite à un impact. Grossissement : x 125

545e.tif



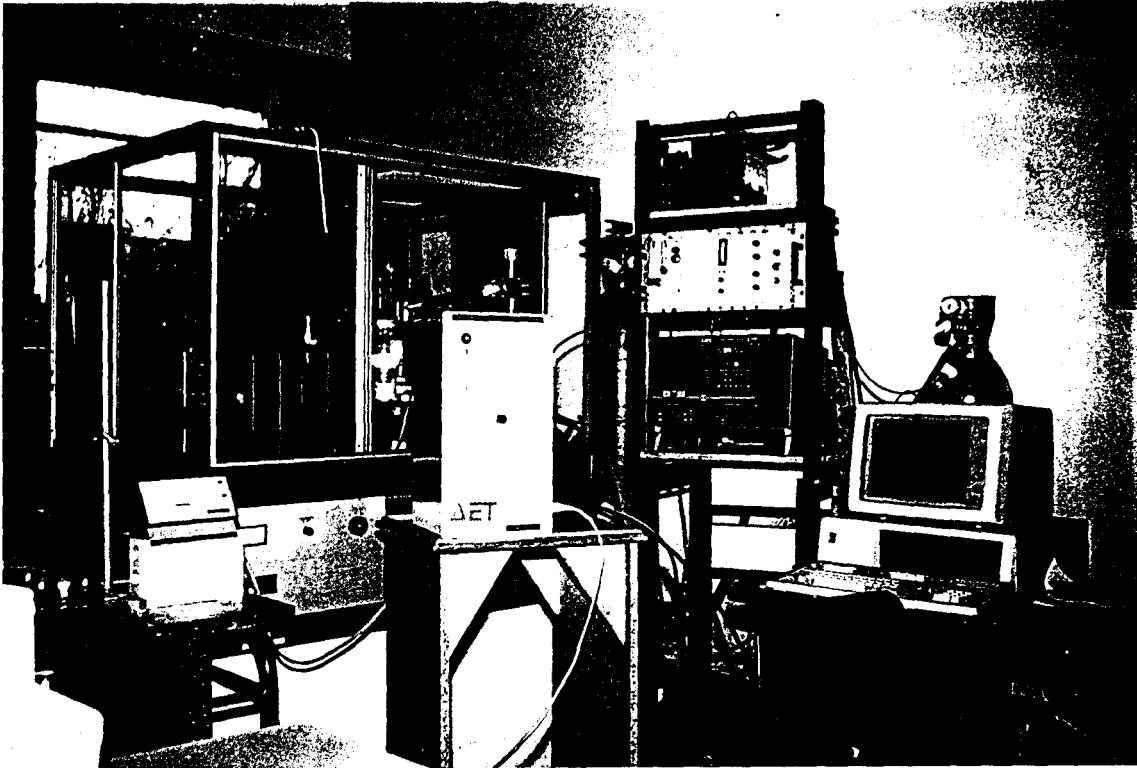
20 μ

← 545e3.tif

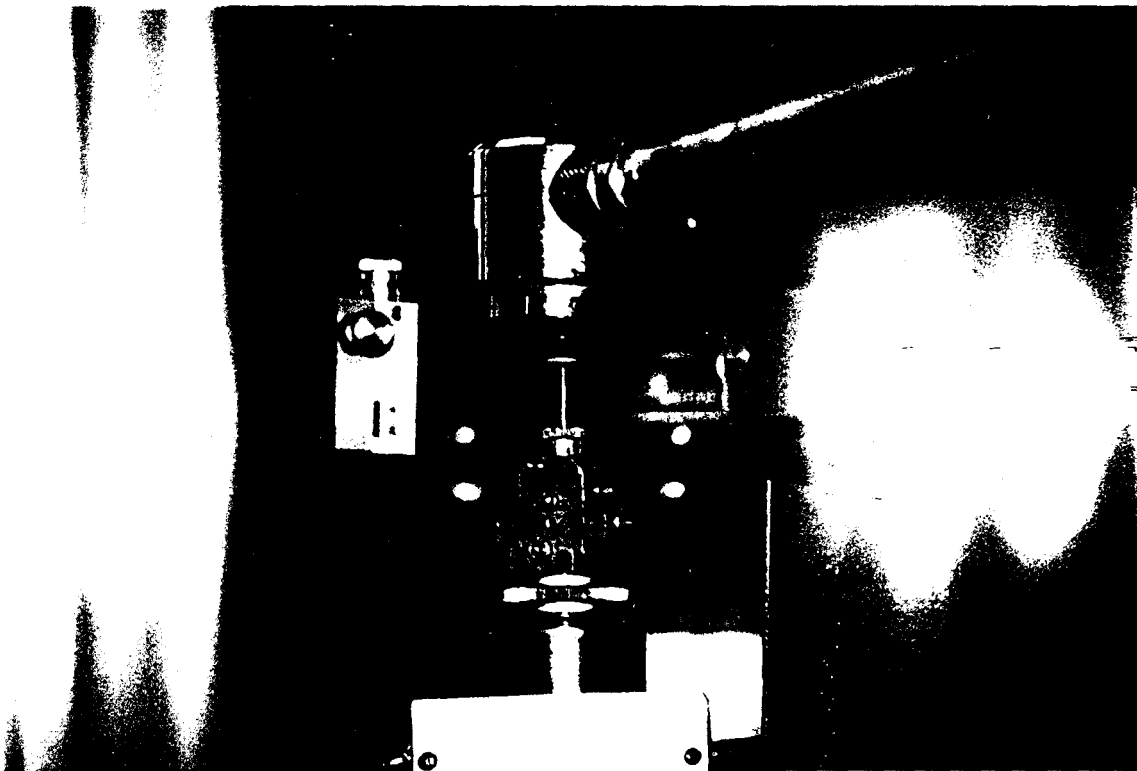




## Diffraction aux Rayons X.



Rayons X : Détecteur multi-canal CPS 120 d'INEL



Tête goniométrique d'analyse équipée du système de chauffage. H.T

**TISSAGE**



## NOMBRE DE POINTS DE LIAGE PAR ARMURE COMPATIBILITE ENTRE ELLES

	Nb de levées sur nb de duites	Nb de levées sur 120 duites	Catégories de compatibilité
SERGE DE 6	1/6	20	C
CROISE 2*2	1/4	30	A-B
SATIN 5 CHAINE	1/5	24	B-C
SATIN 5 TRAME	2/5	48	D
SERGE COMPOSE	1/3	40	A-D
DIAGONALE 12/6	1/3	40	A-D
DIAGONALE 8/4	3/8	45	A-D
SATINE	1/4	30	A-B
SERPENTINE	1/4	30	A-B

**Catégorie A** = entre 30 et 40 levées sur 120 duites

**Catégorie B** = entre 24 et 30 levées sur 120 duites

**Catégorie C** = entre 20 et 24 levées sur 120 duites

**Catégorie D** = entre 40 et 48 levées sur 120 duites

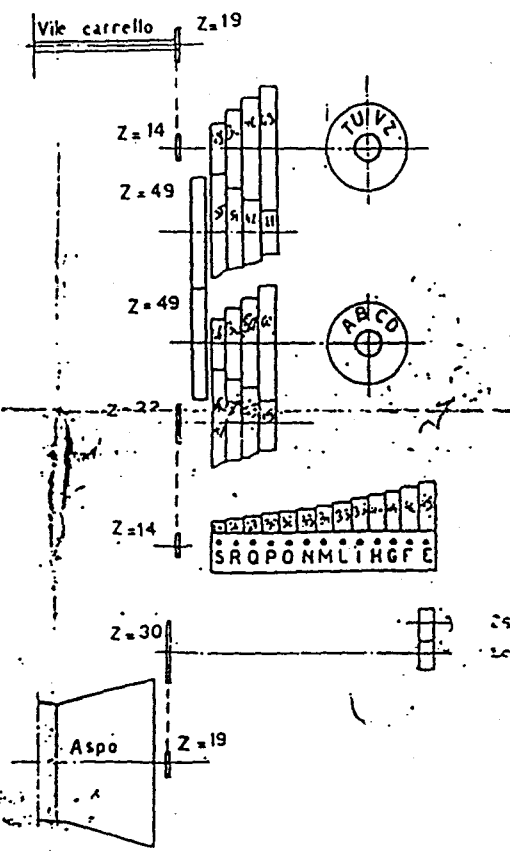
## FEUILLE D'OURDISSAGE

Section n°	largeur (cm)
1	2,778
2	5,556
3	8,334
4	11,112
5	13,89
6	16,668
7	19,446
8	22,224
9	25,002
10	27,78
11	30,558
12	33,336
13	36,114
14	38,892
15	41,67
16	44,448
17	47,226
18	50,004
19	52,782
20	55,56
21	58,338
22	61,116
23	63,894
24	66,672
25	69,45
26	72,228
27	75,006
28	77,784
29	80,562
30	83,34
31	86,118
32	88,896

Section n°	largeur (cm)
33	91,674
34	94,452
35	97,23
36	100,008
37	102,786
38	105,564
39	108,342
40	111,12
41	113,898
42	116,676
43	119,454
44	122,232
45	125,01
46	127,788
47	130,566
48	133,344
49	136,122
50	138,9
51	141,678
52	144,456
53	147,234
54	150,012
55	152,79
56	155,568
57	158,346
58	161,124
59	163,902
60	166,68
61	169,458
62	172,236
63	175,014
64	177,792

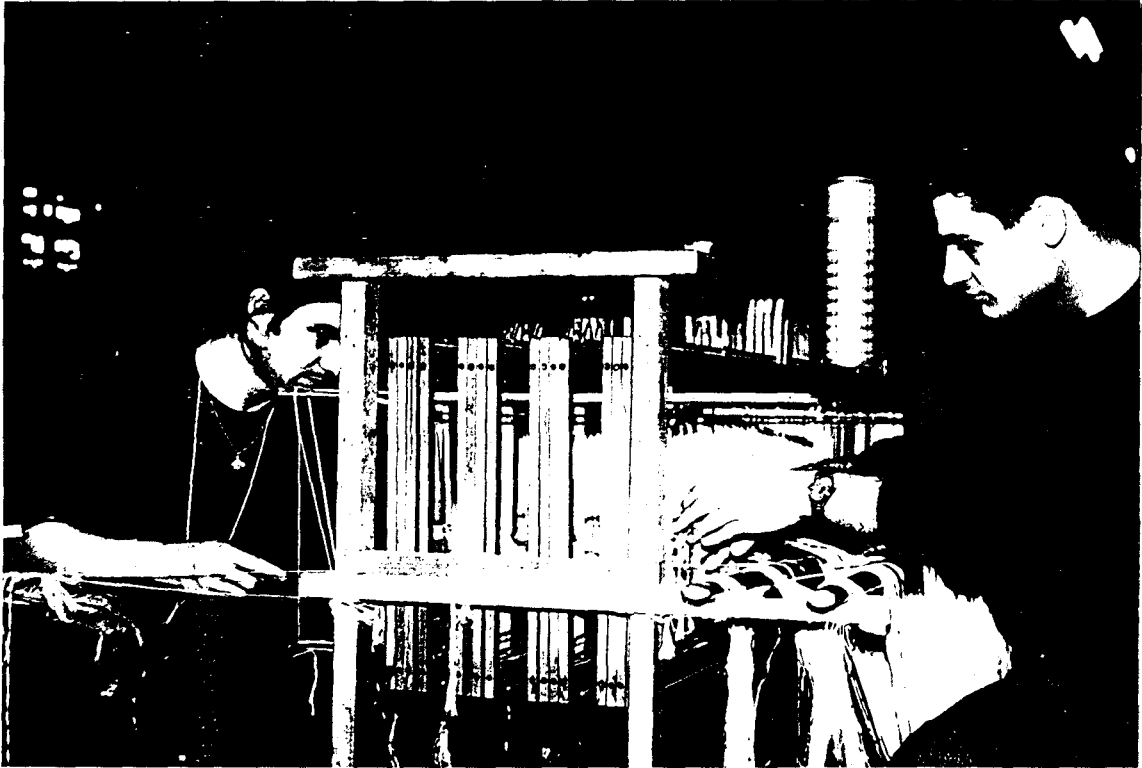
AEZ	0.077	AIV	0.305	AHV	0.523	DMZ	0.765	BIT	1.159	CRV	1.790	CPI	2.935	DRU	5.407
AFZ	0.084	CEZ	0.305	BGV	0.527	BPV	0.774	BLU	1.158	CFU	1.820	DET	2.958	DQT	5.473
AGZ	0.087	BSZ	0.322	ATU	0.550	AQU	0.775	CHV	1.162	BST	1.836	DRV	3.004	DRT	5.695
AHZ	0.096	ALV	0.331	AHT	0.551	DNZ	0.787	BTU	1.193	CGU	1.899	DFU	3.054	DSU	5.849
AIZ	0.101	CFZ	0.336	DPZ	0.565	ARU	0.805	CIV	1.222	CPT	1.917	CQU	3.096	DST	6.461
ALZ	0.110	AMV	0.341	CQZ	0.572	DOZ	0.811	BNU	1.229	CSV	1.936	XGU	3.188		
AMZ	0.113	CGZ	0.351	AIT	0.579	BEU	0.812	BLT	1.258	DHV	1.950	DFT	3.217		
ANZ	0.117	ANV	0.352	BHV	0.581	AQT	0.815	BOU	1.268	CGT	2.001	CRU	3.222		
AOZ	0.120	AOV	0.363	DCZ	0.589	ART	0.848	BNT	1.296	DIV	2.052	DSV	3.249		
APZ	0.128	APV	0.385	CRZ	0.596	BQV	0.860	CLV	1.327	CHU	2.092	CQT	3.262		
AQZ	0.143	CHZ	0.387	ALU	0.597	DPZ	0.865	BNT	1.325	GTU	2.201	DGT	3.358		
ARZ	0.148	CFZ	0.407	BIY	0.611	ASU	0.871	SPU	1.357	CHT	2.204	CRT	3.394		
BEZ	0.154	AEU	0.418	AMV	0.615	BET	0.881	CMV	1.367	DLV	2.227	CSU	3.486		
ASZ	0.161	AQV	0.430	ALT	0.623	BFU	0.882	BOT	1.377	DMV	2.293	DBU	3.511		
BPZ	0.168	ART	0.440	ANU	0.633	BRV	0.895	CNV	1.408	CTT	2.318	CST	3.672		
ECZ	0.175	CEZ	0.442	CSZ	0.644	AST	0.918	DOV	1.453	DMY	2.364	DLU	3.693		
BHZ	0.193	ARV	0.447	AMT	0.648	BGU	0.921	OPT	1.467	CLU	2.389	DHT	3.698		
BIZ	0.203	CMZ	0.454	BHZ	0.649	CEV	0.930	BQU	1.501	DOY	2.438	DET	3.890		
BLZ	0.221	AFU	0.455	AQU	0.653	BFT	0.958	CPV	1.548	CMU	2.460	DLU	4.009		
BMZ	0.227	BEV	0.465	BLV	0.663	DQZ	0.961	DEV	1.560	CLT	2.511	DMU	4.129		
AEV	0.232	CNZ	0.469	ANT	0.667	BSV	0.968	BRU	1.562	CNU	2.536	DLT	4.223		
BNZ	0.239	AGU	0.474	DIZ	0.643	DRZ	1.000	BQT	1.631	CMT	2.592	DNU	4.255		
BOZ	0.241	AFT	0.479	BMV	0.689	BGT	1.001	CEU	1.674	IRV	2.598	DHT	4.349		
AFV	0.252	COZ	0.483	AOT	0.688	CFV	1.011	BSU	1.696	COB	2.615	DOU	4.382		
BPZ	0.257	ASV	0.484	APU	0.696	BHU	1.014	DPV	1.697	ENT	2.671	DNT	4.482		
AGV	0.263	AGT	0.500	BNV	0.704	CGV	1.055	BRT	1.698	COT	2.755	DOT	4.623		
BQZ	0.286	BFV	0.505	BOV	0.726	BTU	1.067	CQV	1.720	GPU	2.787	DPU	4.676		
AHV	0.290	CFZ	0.515	APT	0.733	DSZ	1.082	CET	1.763	DEU	2.808	DPT	4.926		
BRZ	0.298	DEZ	0.519	BLZ	0.741	BHT	1.102	DGV	1.771	DQV	2.886	DQO	5.196		

Dimensione  
di progetto = 0,215

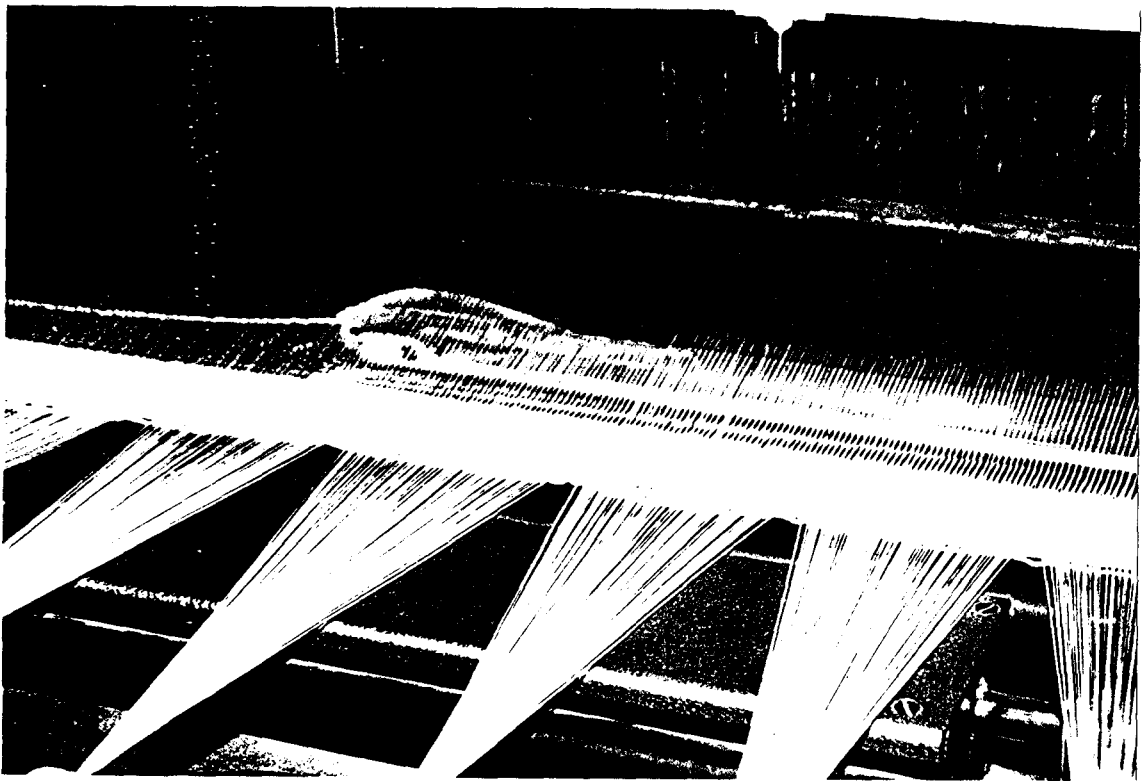


$$\text{déplacement du pignon de mise} = \frac{\text{Nombre de filets} \times \text{coef}(7,78)}{\text{Numero Métrique du fil} \times \text{Densité}}$$

N. Part	DENOMINAZIONE	Materiali	Dimensioni	Fig. n.°
	ORDITOIO A SEZIONI MOD. 601			
AREZZO		cambio monoblocco		
SCALA		N.° T.4821		
DATA 18-1-61				
Modificazioni				

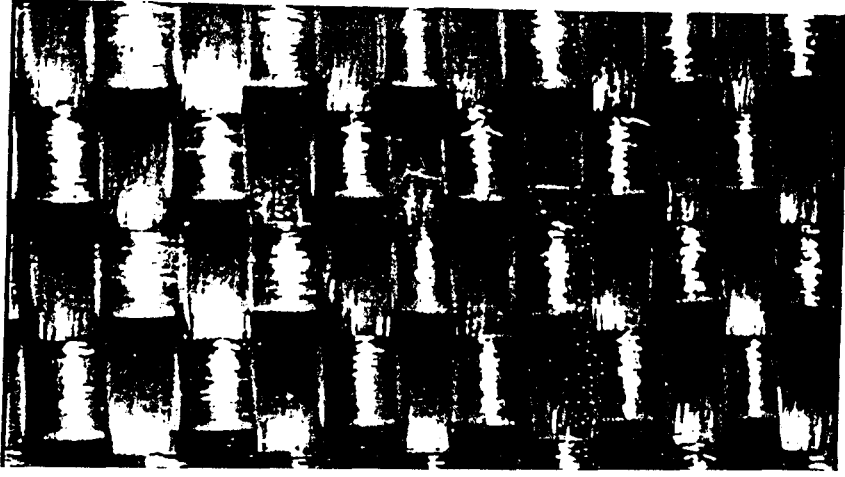


TISSAGE : Opération de rentrage.

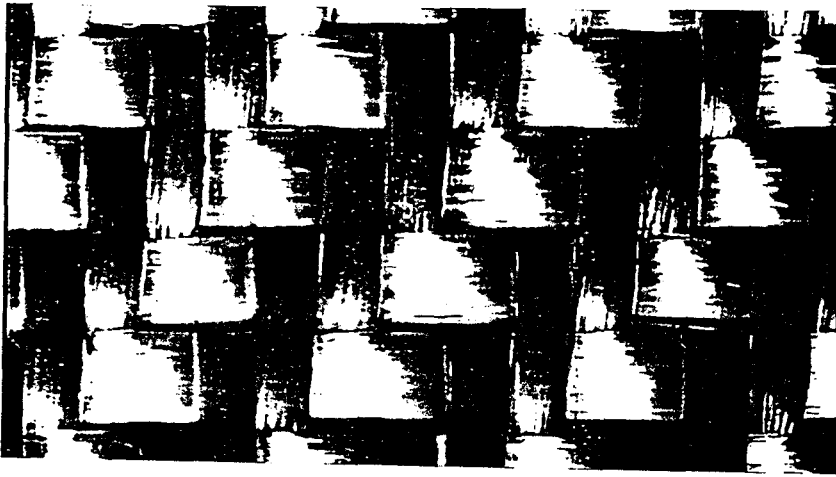


Insertion de la trame par la lance, avec vue sur le peigne battant.

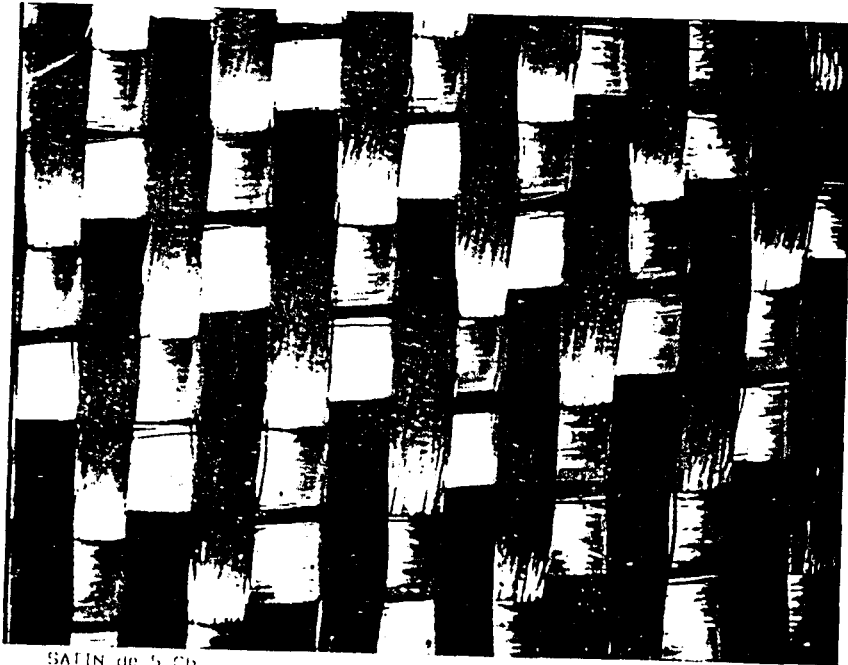
Toile



Croisé 2x2



Satin de 5 Ch



**Détermination du retrait et de l'embuvage**  
**MAILLEMETRE**

## MAILLEMETRE

### 1 / PRINCIPE et MODE OPERATOIRE

Le principe consiste à mesurer les variations de longueurs de fils de chaîne et de trame, que subissent les fils en étant tissés. A cet effet, on mesure la longueur d'un fil sur le tissu, puis sa nouvelle longueur hors tissu, après effilochage. Une tension constante est appliquée au matériau de telle sorte que les ondulations occasionnées par les points de liage soient supprimées.

L'appareil est constitué d'un support guide incliné, comportant à sa partie supérieure une pince fixe et une règle graduée sur sa face latérale. A l'intérieur du support, un chariot roule librement sur deux rails. Il comporte une pince munie d'un repère qui se déplace face à la graduation. Des charges additionnelles peuvent être ajoutées en fonction du titrage du matériau testé.

Le fil à mesurer, dont les extrémités sont maintenues dans les pinces, est soumis à la tension exercée par le poids du chariot et les charges qu'il reçoit.

### 2 / EXPLOITATION DES RESULTATS

L'embuvage ou le retrait  $E$  représentent la différence entre la longueur  $L$  d'un fil respectivement de chaîne ou de trame extrait d'un tissu et la longueur  $Lo$  de la portion du tissu d'où il a été extrait. Ils sont donnés par la formule :

$$E = \frac{L - Lo}{Lo} \times 100$$

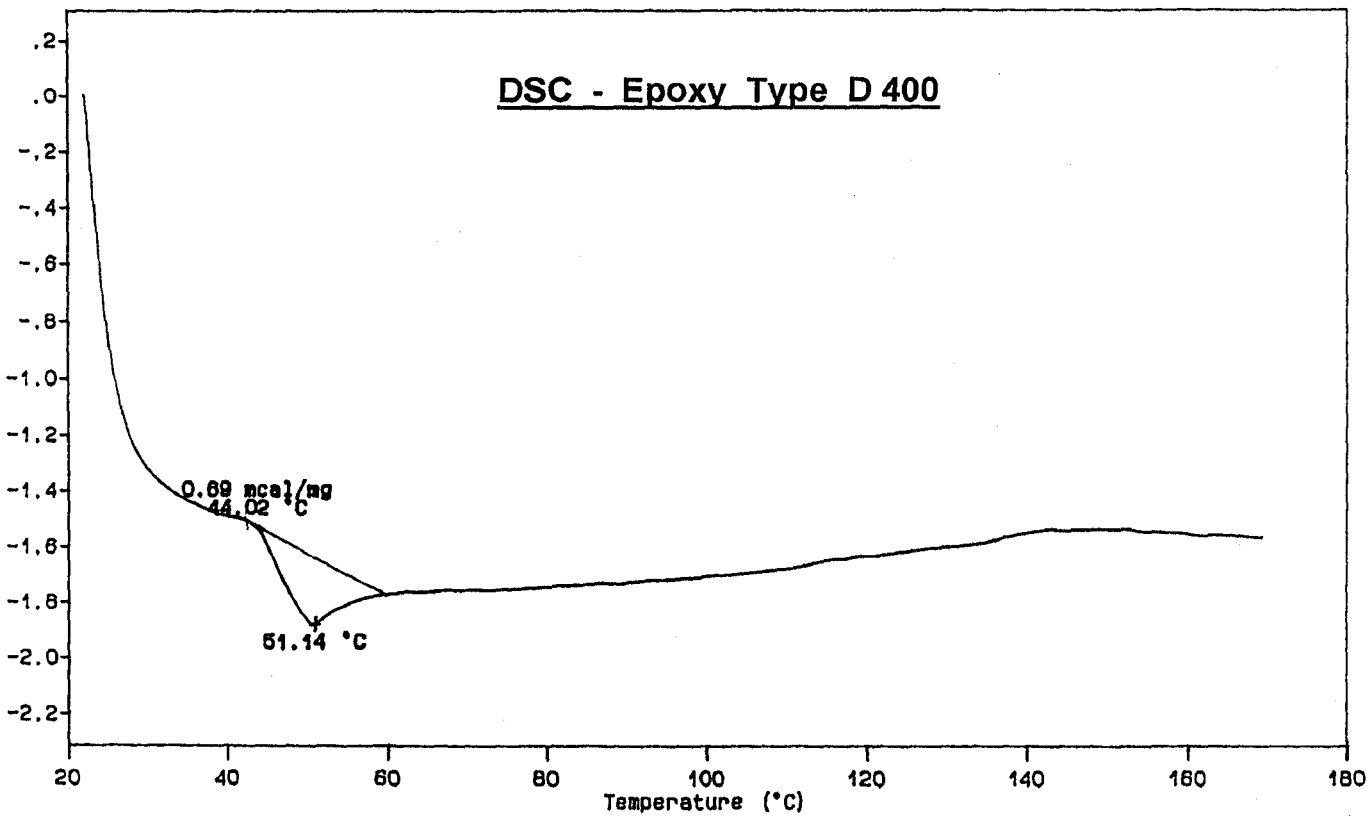
Armure	Diagonale 12/6		Diagonale 8/4		Satin 5 Tr		Toile	
Test	Embuvage	Retrait	Embuvage	Retrait	Embuvage	Retrait	Embuvage	Retrait
1	3.55	2.59	3.26	2.23	2.73	2.69	3.55	2.80
2	3.31	2.60	3.70	2.22	2.73	2.97	3.55	2.77
3	3.31	2.86	3.50	2.27	3.01	2.74	3.85	2.70
Moyenne	3.39	2.68	3.49	2.24	2.82	2.80	3.65	2.76
Ecart type	0.11	0.12	0.18	0.02	0.13	0.12	0.14	0.04
CV %	3.34	4.66	5.16	0.96	4.68	4.35	3.87	1.52



**Analyse par microcalorimétrie  
différentielle à balayage**



DSC - Epoxy Type D 400



DSC ( PL )

Poids d'échantillon : 17.5 mg

Gaz : N2

**Test de Traction uniaxiale  
sur Tissus.**

## ECHANTILLONS NON ENDUITS

### DIAGONALE 12/6

	CHAINE		TRAME	
	Fmax en N	All. à Fmax en %	Fmax en N	All. à Fmax en %
1.00	3641.80	8.90	3452.70	6.50
2.00	3367.60	8.50	2496.00	5.60
3.00	4039.40	7.90	3470.50	6.40
4.00	4229.00	8.00	2896.50	5.90
5.00	4064.70	7.70	3125.20	6.10
<b>Moyenne</b>	<b>3868.50</b>	<b>8.20</b>	<b>3088.18</b>	<b>6.10</b>
Ecart-trype	316.21	0.44	365.47	0.33
CV %	8.17	5.34	11.83	5.39

### DIAGONALE 8/4

	CHAINE		TRAME	
	Fmax en N	All. à Fmax en %	Fmax en N	All. à Fmax en %
1.00	2875.30	6.80	3152.00	6.10
2.00	2484.20	6.70	3107.00	6.30
3.00	3470.50	7.80	2504.30	5.80
4.00	2725.40	7.20	2896.80	6.00
5.00			2763.00	6.20
<b>Moyenne</b>	<b>2888.85</b>	<b>7.13</b>	<b>2884.62</b>	<b>6.08</b>
Ecart-trype	363.65	0.43	236.87	0.17
CV %	12.59	6.07	8.21	2.83

### SATIN DE 5 TRAME

	CHAINE		TRAME	
	Fmax en N	All. à Fmax en %	Fmax en N	All. à Fmax en %
1.00	3658.30	8.60	3378.00	7.90
2.00	2945.20	8.00	3422.70	7.60
3.00	2980.90	7.60	3606.40	7.90
4.00	2705.20	7.60	3140.10	8.50
5.00	2721.40	8.20	3054.30	7.50
<b>Moyenne</b>	<b>3002.20</b>	<b>8.00</b>	<b>3320.30</b>	<b>7.88</b>
Ecart-trype	387.69	0.38	222.99	0.35
CV %	12.91	4.74	6.72	4.43

### TOILE

	CHAINE		TRAME	
	Fmax en N	All. à Fmax en %	Fmax en N	All. à Fmax en %
1.00	3475.10	7.60	1453.30	5.30
2.00	3136.50	7.30	1402.70	5.10
3.00	3599.30	7.50	1534.10	5.50
4.00	3848.50	7.50	1441.20	5.70
5.00	2585.50	6.60		
<b>Moyenne</b>	<b>3328.98</b>	<b>7.30</b>	<b>1457.83</b>	<b>5.40</b>
Ecart-trype	488.40	0.36	55.24	0.22
CV %	14.67	4.98	3.79	4.14

## ECHANTILLONS ENDUITS SOUPLES

### DIAGONALE 12/6

	CHAINE		TRAME	
	Fmax en N	All. à Fmax en %	Fmax en N	All. à Fmax en %
1.00	3043.30	6.60	2163.20	6.70
2.00	3151.70	7.20	2044.50	6.30
3.00	3276.80	7.20	2417.40	6.50
4.00	3284.30	6.90	2460.80	6.60
5.00			2524.60	6.50
<b>Moyenne</b>	<b>3189.03</b>	<b>6.98</b>	<b>2322.10</b>	<b>6.52</b>
Ecart-trype	99.26	0.25	185.28	0.13
CV %	3.11	3.57	7.98	2.03

### DIAGONALE 8/4

	CHAINE		TRAME	
	Fmax en N	All. à Fmax en %	Fmax en N	All. à Fmax en %
1.00	3011.20	7.60	2295.40	6.00
2.00	2932.30	7.20	2600.70	7.20
3.00	3423.70	8.90	2411.70	7.00
4.00	3110.70	7.60	2381.60	6.80
5.00			2489.30	6.80
<b>Moyenne</b>	<b>3119.48</b>	<b>7.83</b>	<b>2435.74</b>	<b>6.76</b>
Ecart-trype	186.67	0.64	103.23	0.41
CV %	5.98	8.20	4.24	6.03

### SATIN DE 5 TRAME

	CHAINE		TRAME	
	Fmax en N	All. à Fmax en %	Fmax en N	All. à Fmax en %
1.00	3122.60	7.30	1662.50	6.50
2.00	3248.10	7.40	1426.40	7.30
3.00	2931.40	6.80	2442.00	7.20
4.00	3287.30	7.10	1349.90	7.30
5.00	3403.90	7.20	2678.30	7.00
<b>Moyenne</b>	<b>3198.66</b>	<b>7.16</b>	<b>1911.82</b>	<b>7.06</b>
Ecart-trype	180.03	0.21	608.71	0.30
CV %	5.63	2.88	31.84	4.26

### TOILE

	CHAINE		TRAME	
	Fmax en N	All. à Fmax en %	Fmax en N	All. à Fmax en %
1.00	3835.10	9.80	1726.20	4.60
2.00	3151.80	8.30	1830.70	4.90
3.00	3699.40	9.50	1635.90	6.50
4.00	3600.70	9.30	1947.60	6.40
5.00	3928.30	10.30	1668.50	6.60
<b>Moyenne</b>	<b>3643.06</b>	<b>9.44</b>	<b>1761.78</b>	<b>5.80</b>
Ecart-trype	301.89	0.66	127.57	0.86
CV %	8.29	7.01	7.24	14.91

## ECHANTILLONS ENDUITS SEMI RIGIDE

### DIAGONALE 12/6

	CHAINE		TRAME	
	Fmax en N	All. à Fmax en %	Fmax en N	All. à Fmax en %
1.00	4401.40	9.00	2381.60	6.00
2.00	5155.80	8.40	2301.20	6.20
3.00	4364.20	8.40	2326.30	6.20
4.00	4450.80	8.60	2534.50	6.20
5.00	3932.30	8.60	2351.20	5.90
<b>Moyenne</b>	<b>4460.90</b>	<b>8.60</b>	<b>2378.96</b>	<b>6.10</b>
Ecart-trype	393.78	0.22	82.21	0.13
CV %	8.83	2.55	3.46	2.07

### DIAGONALE 8/4

	CHAINE		TRAME	
	Fmax en N	All. à Fmax en %	Fmax en N	All. à Fmax en %
1.00	3410.70	8.50	1867.40	6.60
2.00	2803.50	7.90	1816.70	6.10
3.00	2754.50	7.80	1633.20	6.10
4.00	3082.00	8.80	1931.50	7.30
5.00	3209.60	8.50		
<b>Moyenne</b>	<b>3012.68</b>	<b>8.30</b>	<b>1812.20</b>	<b>6.53</b>
Ecart-trype	247.37	0.38	111.06	0.49
CV %	8.21	4.64	6.13	7.54

### SATIN DE 5 TRAME

	CHAINE		TRAME	
	Fmax en N	All. à Fmax en %	Fmax en N	All. à Fmax en %
1.00	3549.50	7.60	1769.00	7.10
2.00	3179.80	6.90	1702.40	7.20
3.00			1913.20	7.10
4.00			1676.40	6.50
5.00			1854.20	7.10
<b>Moyenne</b>	<b>3364.65</b>	<b>7.25</b>	<b>1783.04</b>	<b>7.00</b>
Ecart-trype	261.42	0.35	100.10	0.25
CV %	7.77	4.83	5.61	3.61

### TOILE

	CHAINE		TRAME	
	Fmax en N	All. à Fmax en %	Fmax en N	All. à Fmax en %
1.00	3311.30	8.90	1731.90	7.80
2.00	3290.20	9.20	1521.80	6.90
3.00	3439.50	9.40	1643.10	7.60
4.00	3478.90	8.70	1778.10	7.70
5.00	3386.70	9.20	1579.70	5.80
<b>Moyenne</b>	<b>3381.32</b>	<b>9.08</b>	<b>1650.92</b>	<b>7.16</b>
Ecart-trype	80.84	0.25	105.52	0.75
CV %	2.39	2.73	6.39	10.47

**TABLEAU RECAPITULATIF DES TESTS DE TRACTION  
UNIAXIALE SUR EPROUVETTES DE TISSUS ET COMPOSITES**

RESINE	TISSUS	Chaîne		Trame	
		A à Fmax. (%)	F max. (N)	A à Fmax. (%)	F max. (N)
SANS	Diagonale 12/6	8.20	3869	6.10	3088
	Diagonale 8/4	7.13	2889	6.08	2885
	Satin 5 Tr	8.00	3002	7.88	3320
	Toile	7.30	3329	5.40	1458
SOUPLE	Diagonale 12/6	6.98	3189	6.52	2322
	Diagonale 8/4	7.83	3119	6.76	2436
	Satin 5 Tr	7.16	3199	7.06	1912
	Toile	9.44	3643	5.80	1762
SEMI RIGIDE	Diagonale 12/6	8.60	4461	6.10	2379
	Diagonale 8/4	8.30	3013	6.53	1812
	Satin 5 Tr	7.25	3365	7.00	1783
	Toile	9.08	3381	7.16	1651
RIGIDE	Diagonale 12/6	7.08	3991	5.70	2552
	Diagonale 8/4	6.44	2709	6.55	2572
	Satin 5 Tr	6.24	2697	6.56	2390
	Toile	7.10	3233	7.34	1834

TAB10

## ECHANTILLONS ENDUITS RIGIDE

### DIAGONALE 12/6

	CHAINE		TRAME	
	Fmax en N	All. à Fmax en %	Fmax en N	All. à Fmax en %
1.00	4375.30	7.70	2832.80	6.30
2.00	3726.60	6.70	2638.50	6.00
3.00	3659.90	6.20	2303.60	5.30
4.00	4201.00	7.70	2499.50	5.50
5.00			2486.60	5.40
<b>Moyenne</b>	<b>3990.70</b>	<b>7.08</b>	<b>2552.20</b>	<b>5.70</b>
Ecart-type	304.68	0.65	176.11	0.38
CV %	7.63	9.18	6.90	6.75

### DIAGONALE 8/4

	CHAINE		TRAME	
	Fmax en N	All. à Fmax en %	Fmax en N	All. à Fmax en %
1.00	3033.00	7.20	2459.80	6.20
2.00	2650.90	6.10	3209.60	6.80
3.00	2679.20	6.40	2628.60	6.30
4.00	2474.30	6.20	1988.30	6.90
5.00	2703.00	6.30		
<b>Moyenne</b>	<b>2709.35</b>	<b>6.44</b>	<b>2571.58</b>	<b>6.55</b>
Ecart-type	181.30	0.39	436.76	0.30
CV %	6.69	6.10	16.98	4.64

### SATIN DE 5 TRAME

	CHAINE		TRAME	
	Fmax en N	All. à Fmax en %	Fmax en N	All. à Fmax en %
1.00	2487.20	6.10	2372.20	6.40
2.00	3006.80	6.60	2503.60	7.00
3.00	2779.70	6.80	2458.50	6.70
4.00	2437.20	5.80	1973.70	5.70
5.00	2771.60	5.90	2640.80	7.00
<b>Moyenne</b>	<b>2696.50</b>	<b>6.24</b>	<b>2389.76</b>	<b>6.56</b>
Ecart-type	234.46	0.39	252.05	0.48
CV %	8.70	6.30	10.55	7.38

### TOILE

	CHAINE		TRAME	
	Fmax en N	All. à Fmax en %	Fmax en N	All. à Fmax en %
1.00	3411.70	7.30	2041.00	8.60
2.00	2849.40	7.00	1827.60	7.30
3.00	3482.10	7.50	1660.20	7.10
4.00	3560.90	7.00	1636.80	6.60
5.00	2859.50	6.70	2003.00	7.10
<b>Moyenne</b>	<b>3232.72</b>	<b>7.10</b>	<b>1833.72</b>	<b>7.34</b>
Ecart-type	349.34	0.28	187.45	0.67
CV %	10.81	3.88	10.22	9.14

## SELECTION DES RESULTATS LES PLUS

PERFORMANTS / Critère de base : Armure

	Chaîne	Trame	Classement vis à vis du Module
Diag 12/6	Rigide	Sans	
Diag 8/4	Sans	Sans	
Satin 5 Tr	Rigide	Sans	
Toile	Sans	Souple	

Arm1

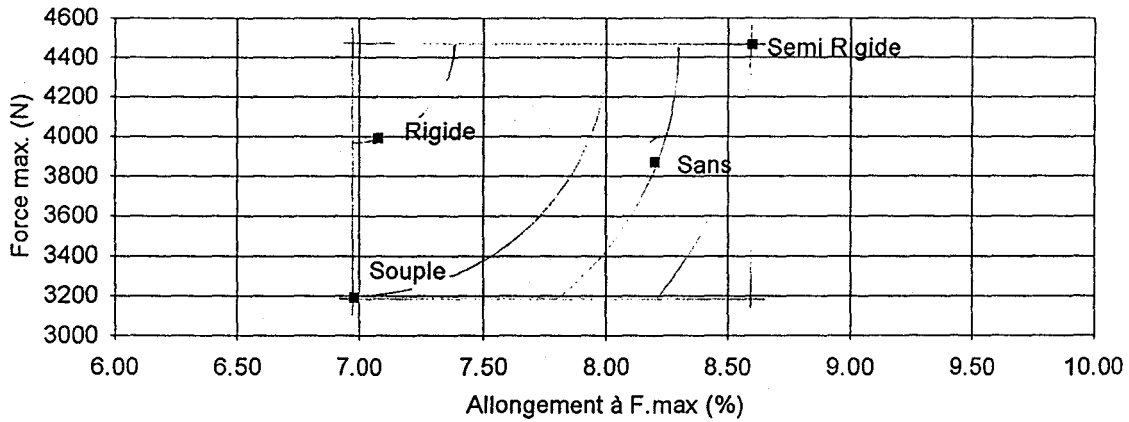
	Chaîne	Trame	Classement vis à vis de l'Energie
Diag 12/6	Semi Rigide	Sans	
Diag 8/4	Semi Rigide	Rigide	
Satin 5 Tr	Sans	Sans	
Toile	Souple	Rigide	

Arm2

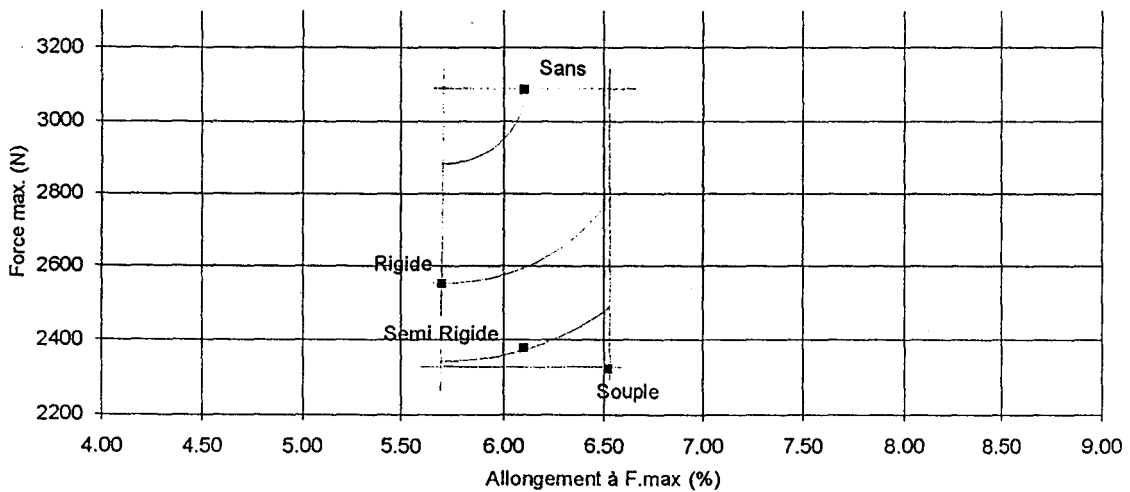


## Armure : DIAGONALE 12/6

### Nuage de points en Chaîne des Diag. 12/6 (A'C)



### Nuage de points en Trame des Diag. 12/6 (A'T)

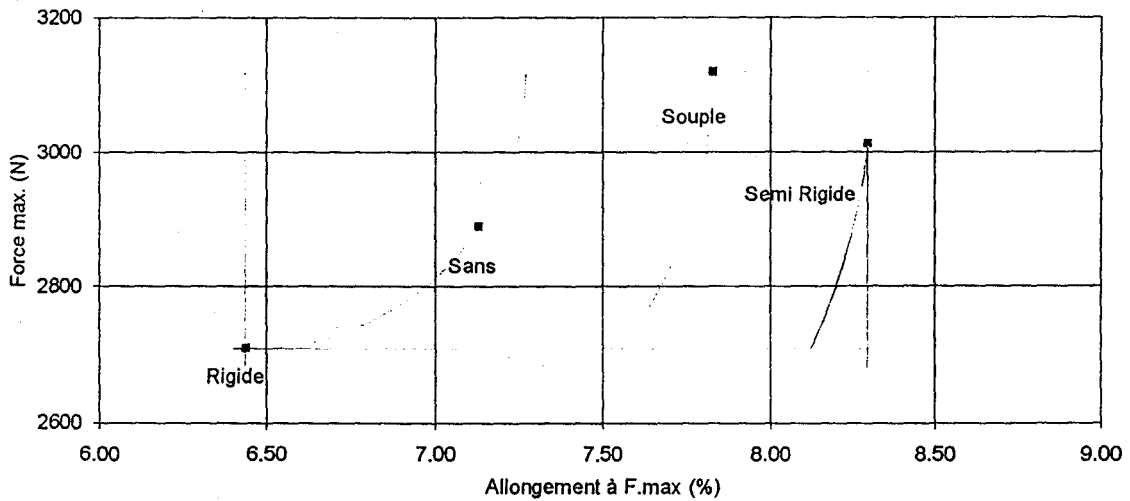


#### Remarque :

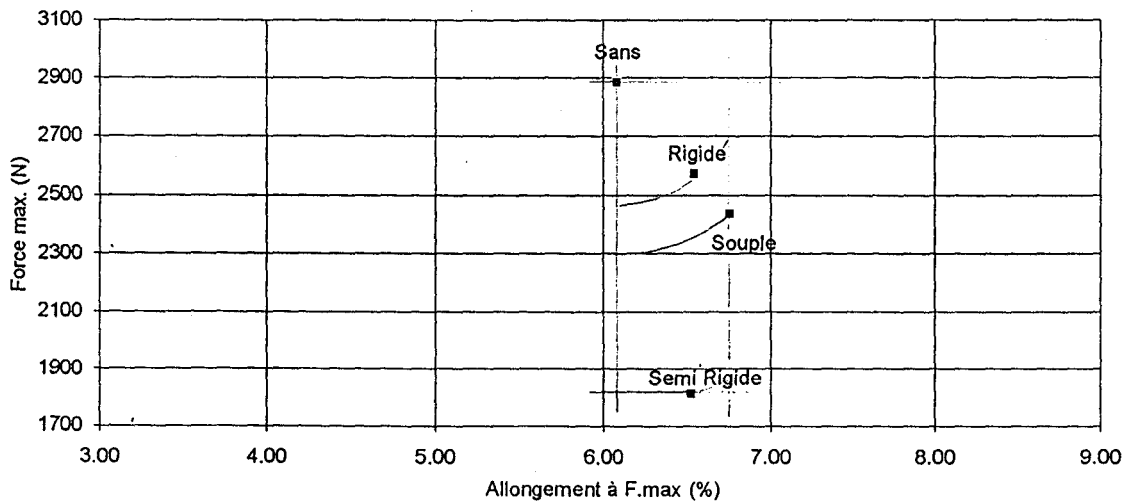
Les échelles ont été choisies de telle sorte que les diminutions de Force Max/min soient compatibles en valeur absolue, aux augmentations d'allongement Max/min

## Armure : DIAGONALE 8/4

**Nuage de points en Chaîne des Diag. 8/4 (B'C)**



**Nuage de points en Trame des Diag. 8/4 (B'T)**

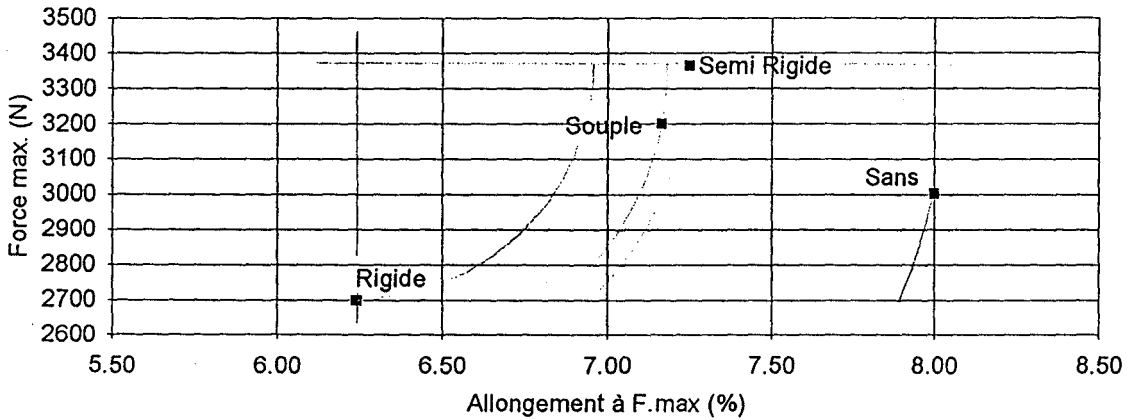


### Remarque :

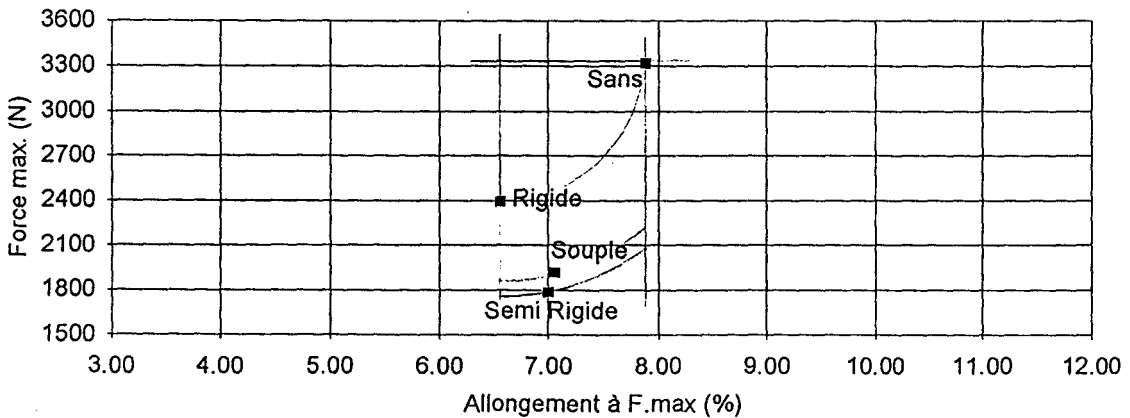
Les échelles ont été choisies de telle sorte que les diminutions de Force Max/min soient compatibles en valeur absolue, aux augmentations d'allongement min/Max

## Armure : SATIN 5 Tr

**Nuage de points en Chaîne des Satin 5 Tr (C'C)**



**Nuage de points en Trame des Satin 5 Tr (C'T)**

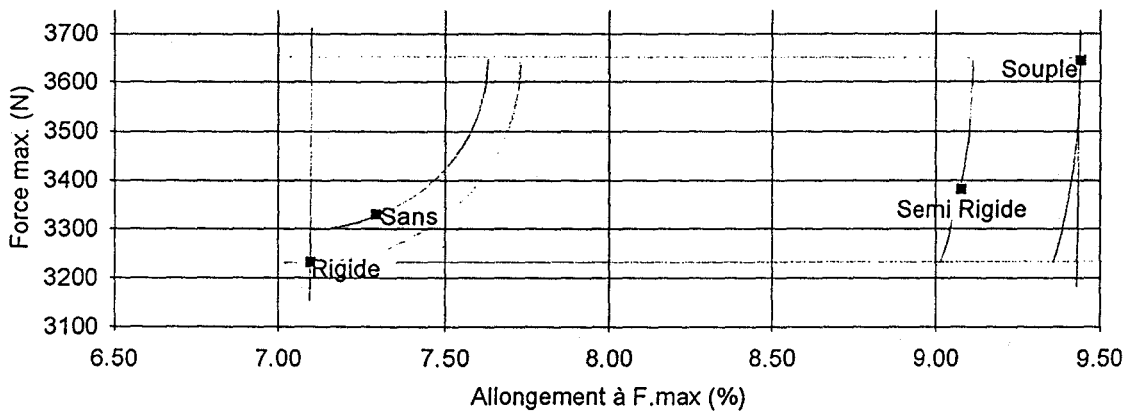


### Remarque :

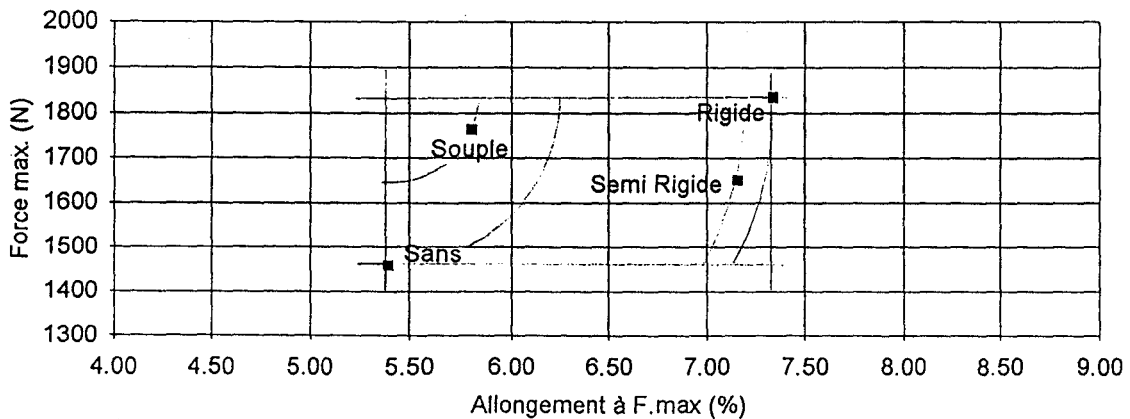
Les échelles ont été choisies de telle sorte que les diminutions de Force Max/min soient compatibles en valeur absolue, aux augmentations d'allongement min/Max

## Armure : TOILE

### Nuage de points en Chaîne des Toiles (D'C)



### Nuage de points en Trame des Toiles (D'T)

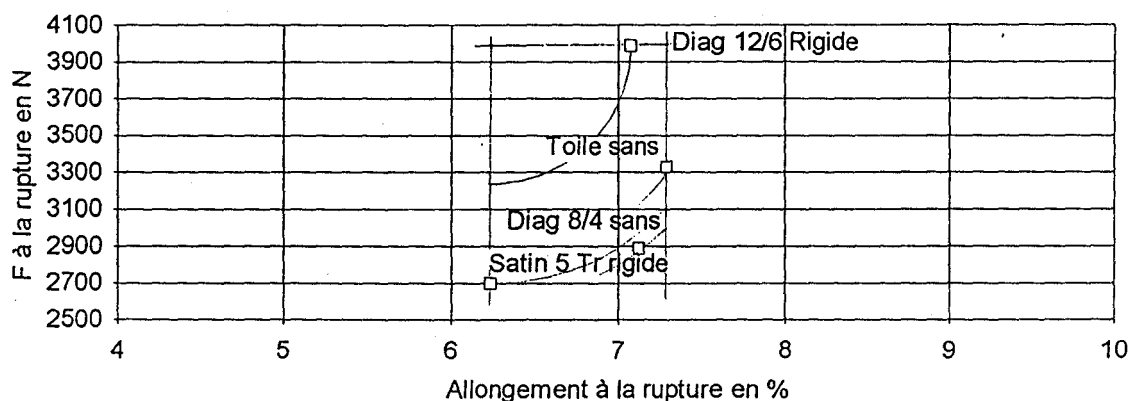


#### Remarque :

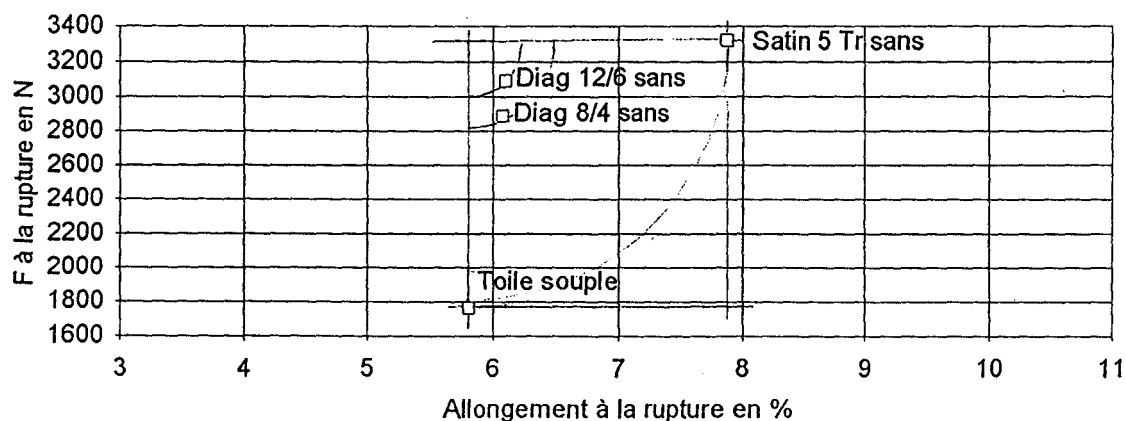
Les échelles ont été choisies de telle sorte que les diminutions de Force Max/min soient compatibles en valeur absolue, aux augmentations d'allongement min/Max

## La meilleure Armure : en terme de Module.

### The Best / Chaîne (Module)



### The Best / Trame (Module)

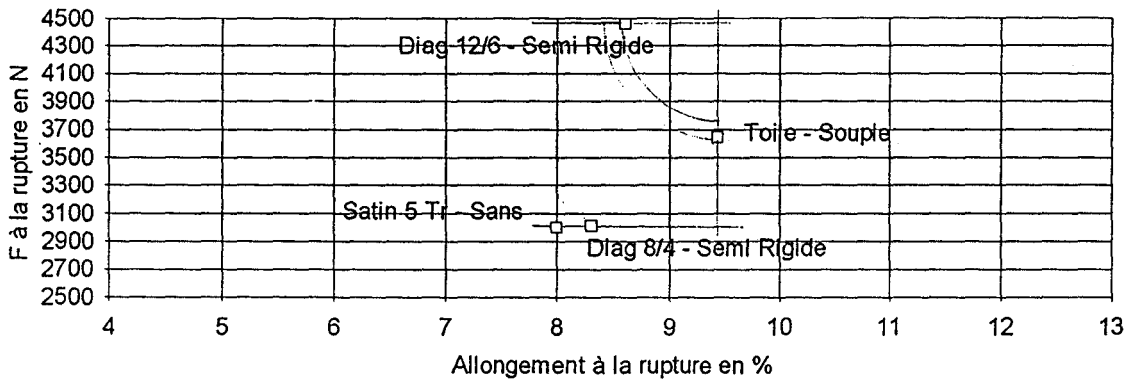


#### Remarque :

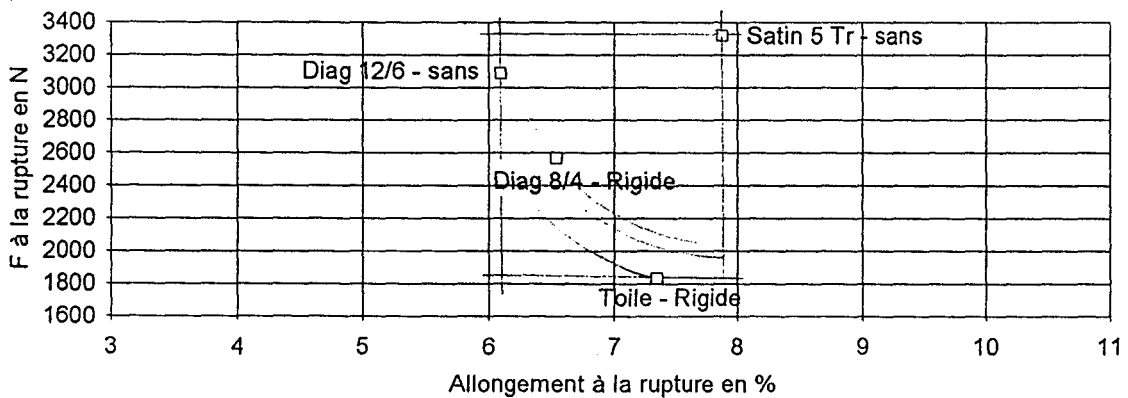
Les échelles ont été choisies de telle sorte que les diminutions de Force Max/min soient compatibles en valeur absolue, aux augmentations d'allongement min/Max

## La meilleure Armure : en terme d'Energie.

### The Best / Chaîne (Energie)



### The Best / Trame (Energie)



#### Remarque :

Les échelles ont été choisies de telle sorte que les diminutions de Force Max/min soient compatibles en valeur absolue, aux augmentations d'allongement min/Max

## SELECTION DES RESULTATS LES PLUS

PERFORMANTS / Critère de base : Enduction

	Chaîne	Trame	Classement vis à vis du Module
Sans	Toile	Diag 12/6	
Souple	Satin 5 Tr	Diag 12/6	
Semi Rigide	Diag 12/6	Diag 12/6	
Rigide	Diag 12/6	Diag 12/6	

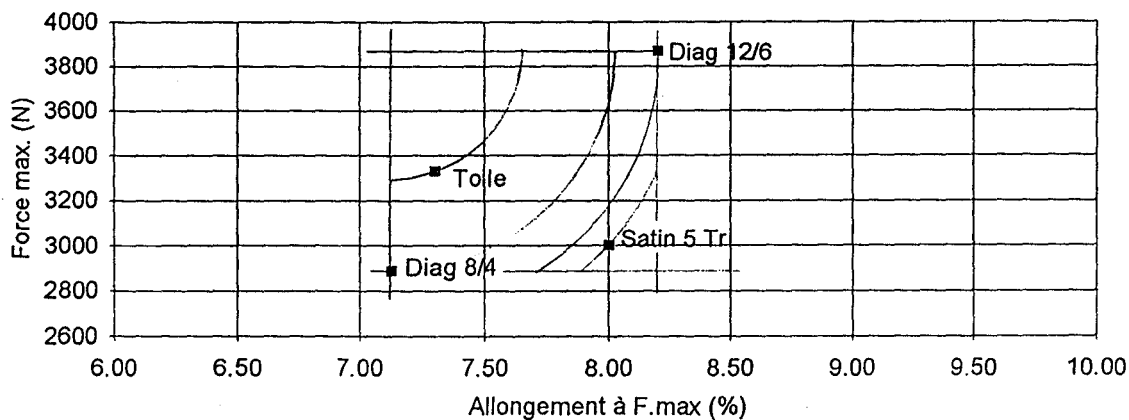
End1

	Chaîne	Trame	Classement vis à vis de l'Energie
Sans	Diag 12/6	Satin 5 Tr	
Souple	Toile	Diag 8/4	
Semi Rigide	Diag 12/6	Diag 12/6	
Rigide	Diag 12/6	Diag 8/4	

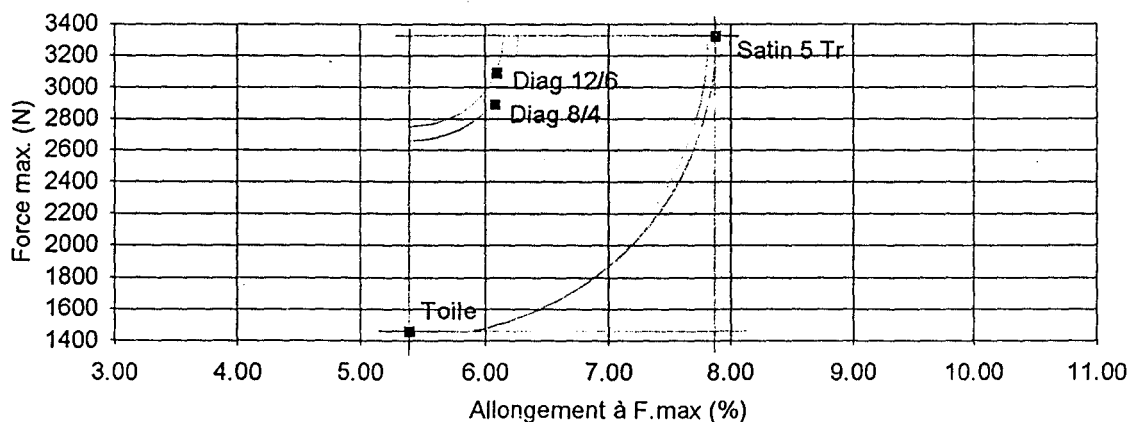
End2

## Echantillons : non enduits

### Nuage de points en Chaîne des tissus non traités (AC)



### Nuage de points en Trame des tissus non traités (AT)



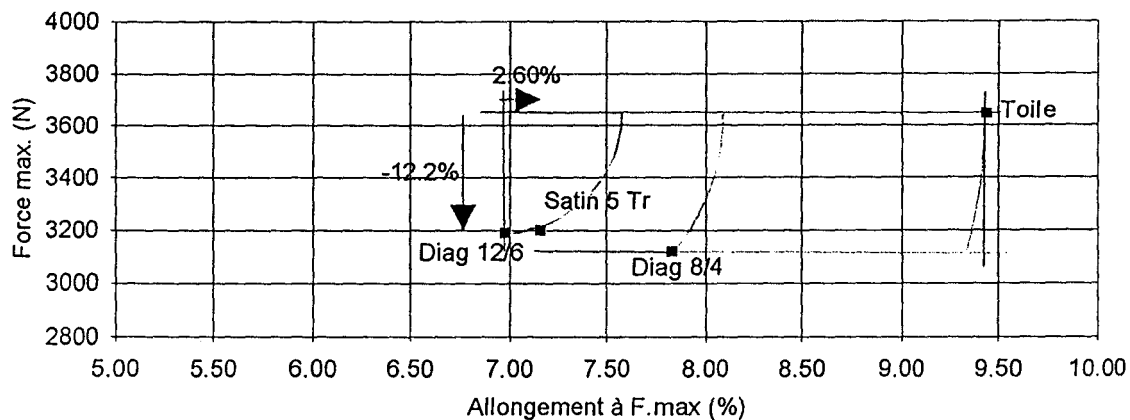
#### Remarque :

Les échelles ont été choisies de telle sorte que les diminutions de Force Max/min soient compatibles en valeur absolue, aux augmentations d'allongement Max/min

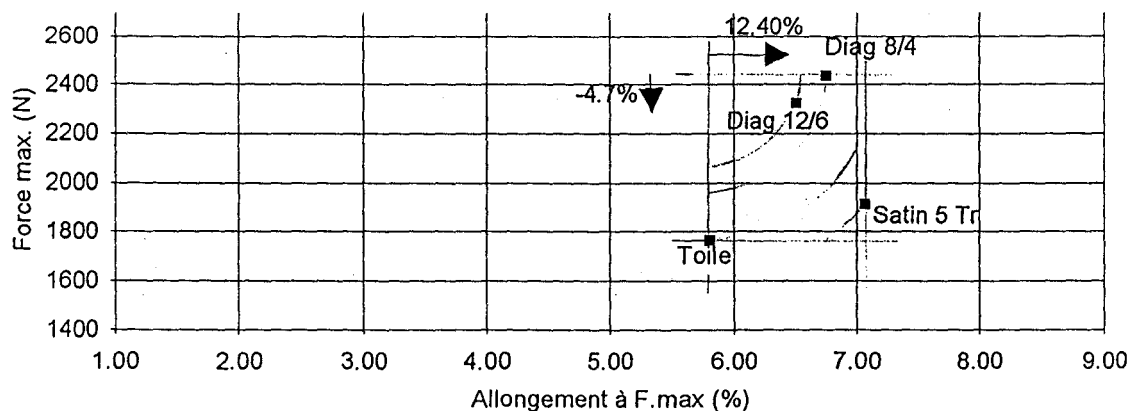


## Composites : Souples

### Nuage de points en Chaîne des tissus enduits souple (BC)



### Nuage de points en Trame des tissus enduits souple (BT)

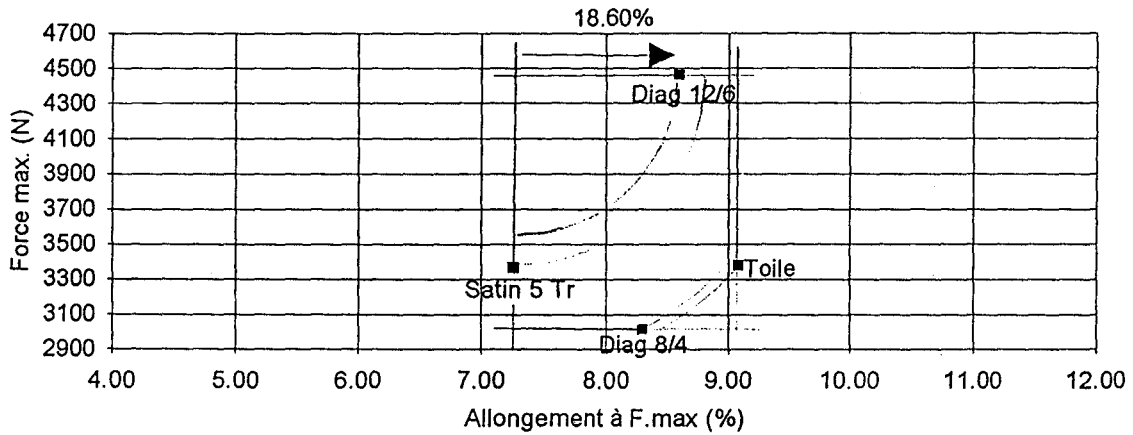


#### Remarque :

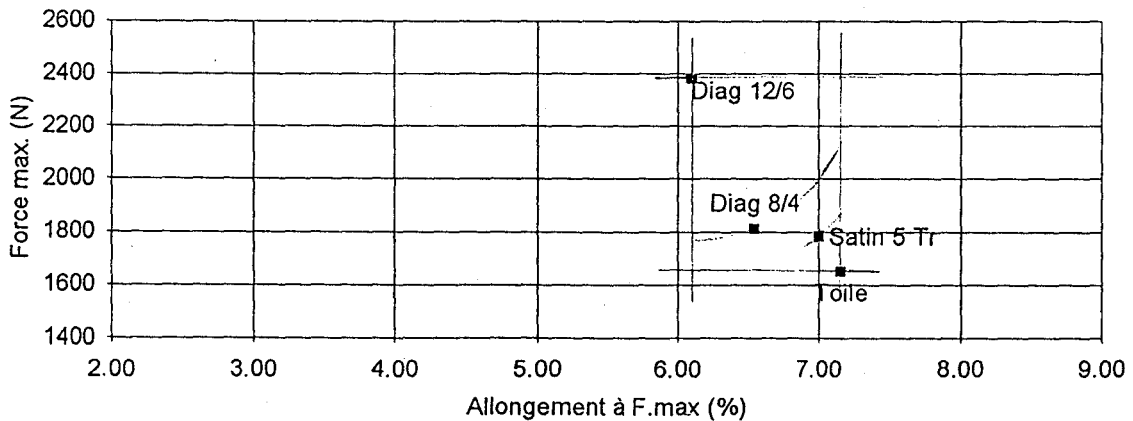
Les échelles ont été choisies de telle sorte que les diminutions de Force Max/min soient compatibles en valeur absolue, aux augmentations d'allongement Max/min

## Composites : Semi Rigides

### Nuage de points en Chaîne des tissus enduits Semi Rigide (CC)



### Nuage de points en Trame des tissus enduits semi rigide (CT)

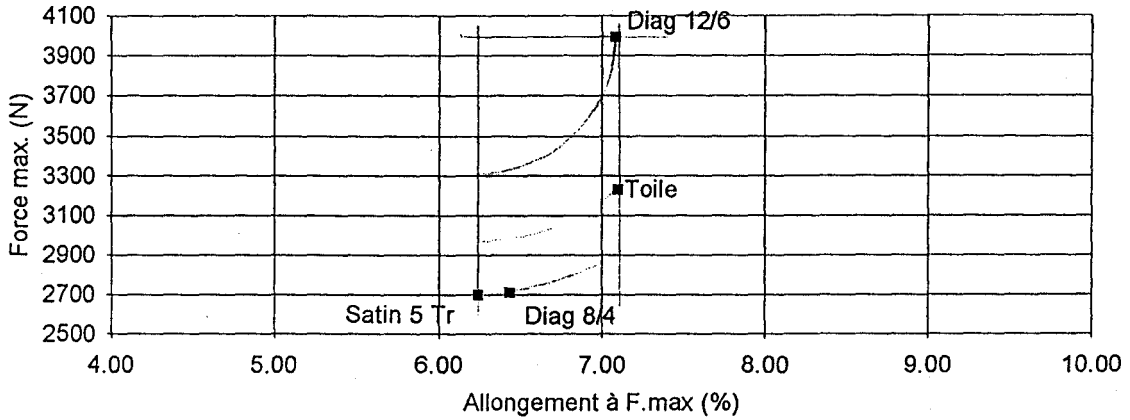


#### Remarque :

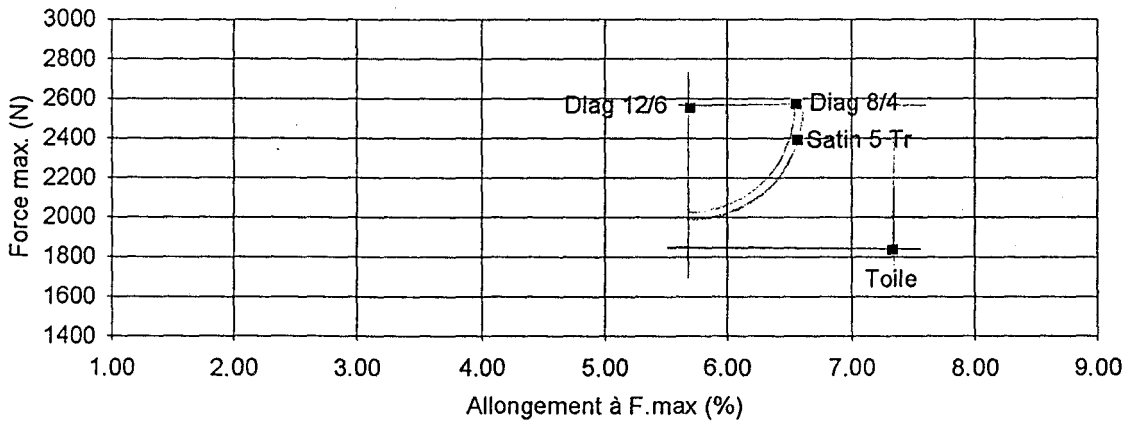
Les échelles ont été choisies de telle sorte que les diminutions de Force Max/min soient compatibles en valeur absolue, aux augmentations d'allongement Max/min

## Composites : Rigides

### Nuage de points en Chaîne des tissus enduits rigides (DC)



### Nuage de points en Trame des tissus enduits Rigide (DT)

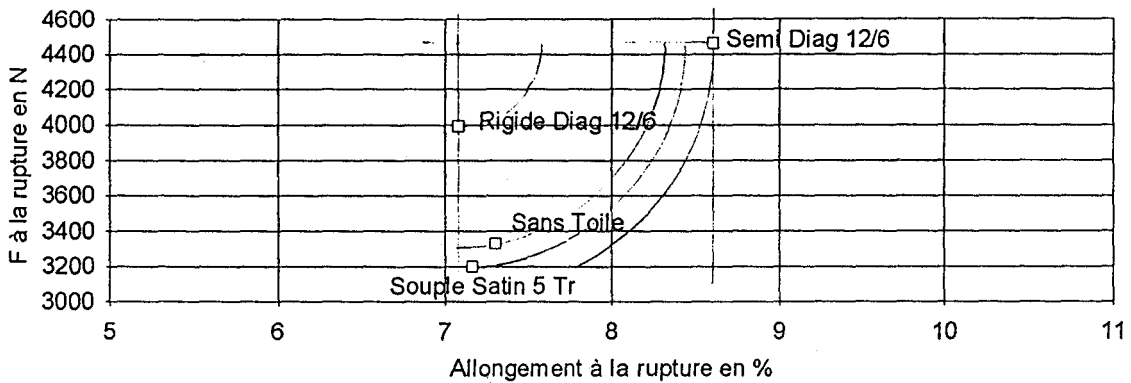


#### Remarque :

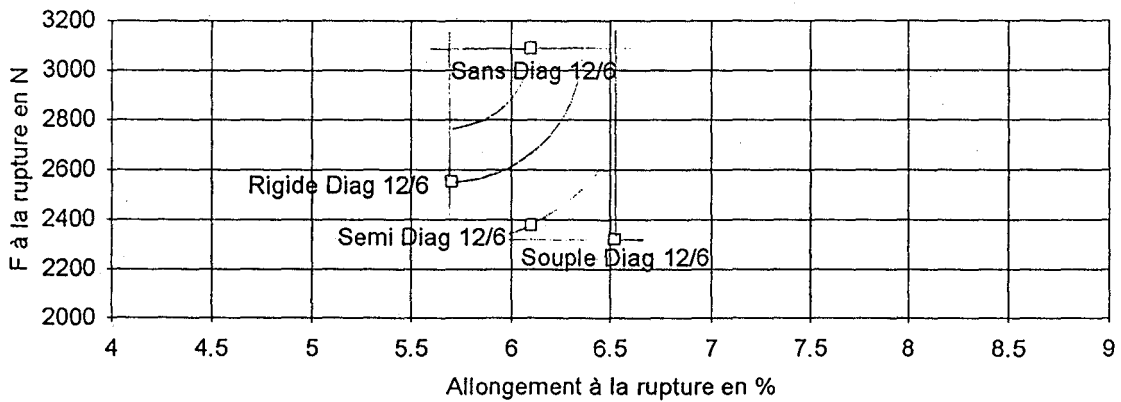
Les échelles ont été choisies de telle sorte que les diminutions de Force Max/min soient compatibles en valeur absolue, aux augmentations d'allongement Max/min

## Le meilleur Composite : en terme de Module.

### The Best / Chaîne (Module)



### The Best / Trame (Module)

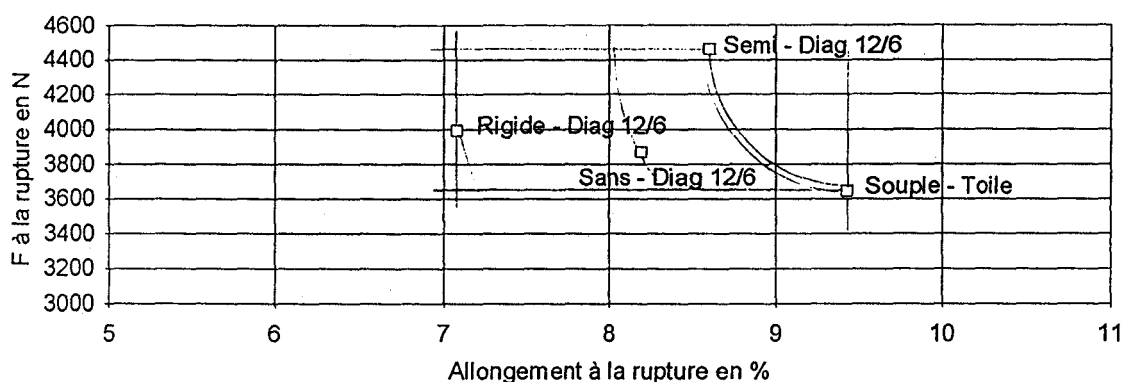


#### Remarque :

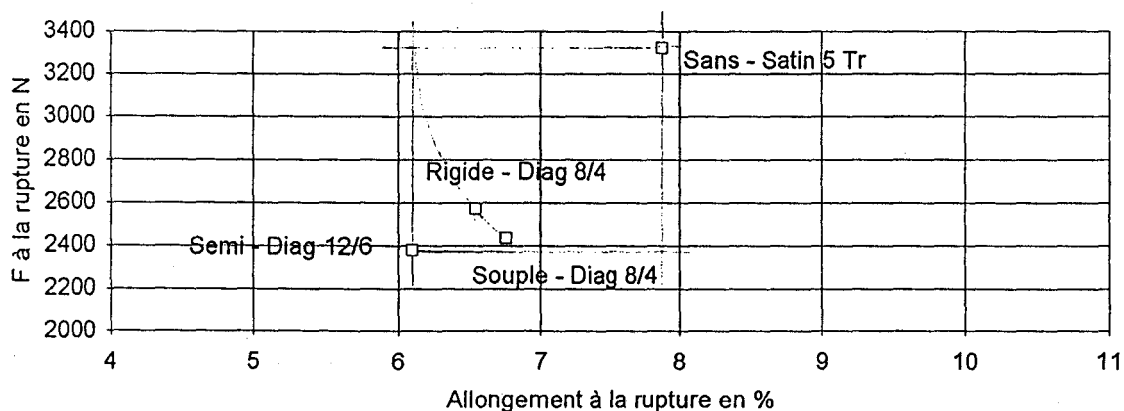
Les échelles ont été choisies de telle sorte que les diminutions de Force Max/min soient compatibles en valeur absolue, aux augmentations d'allongement min/Max

## Le meilleur Composite : en terme d'Energie.

### The Best / Chaîne (Energie)



### The Best / Trame (Energie)



#### Remarque :

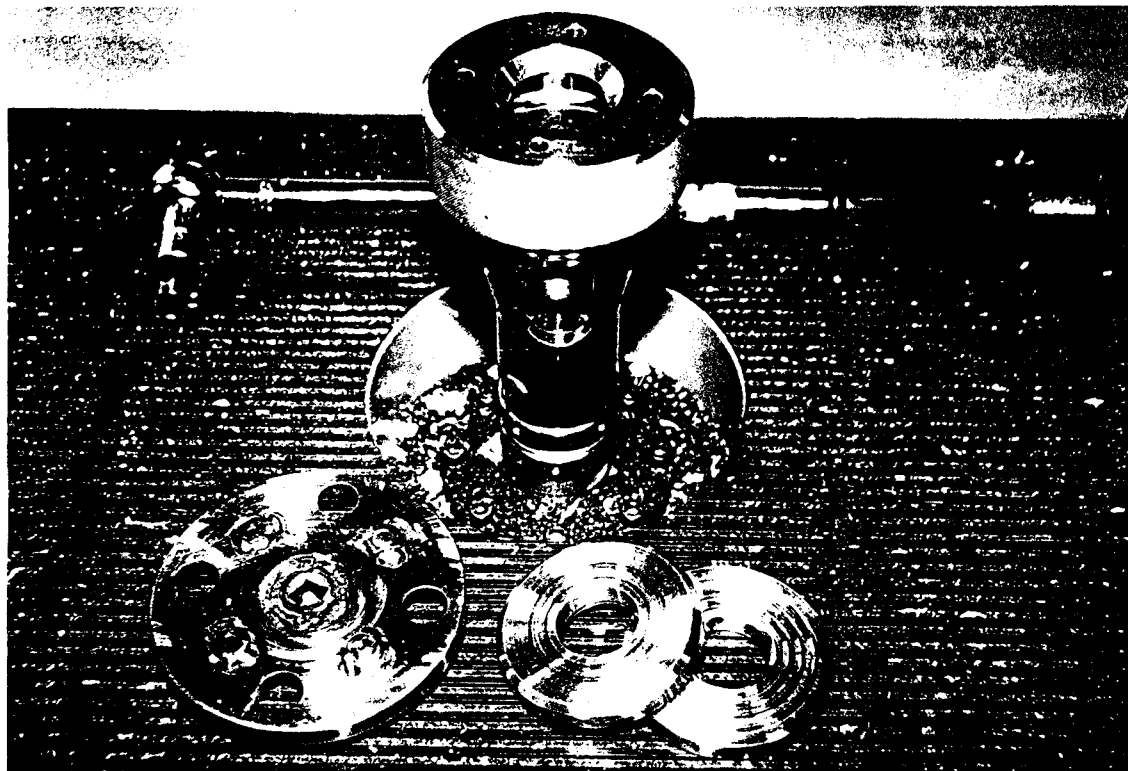
Les échelles ont été choisies de telle sorte que les diminutions de Force Max/min soient compatibles en valeur absolue, aux augmentations d'allongement min/Max

## TRACTION UNIAXIALE DES ECHANTILLONS COMMERCIAUX

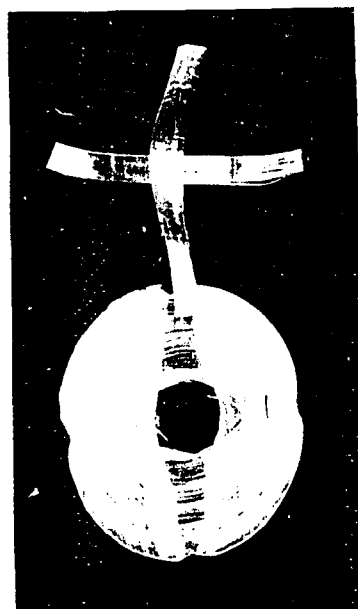
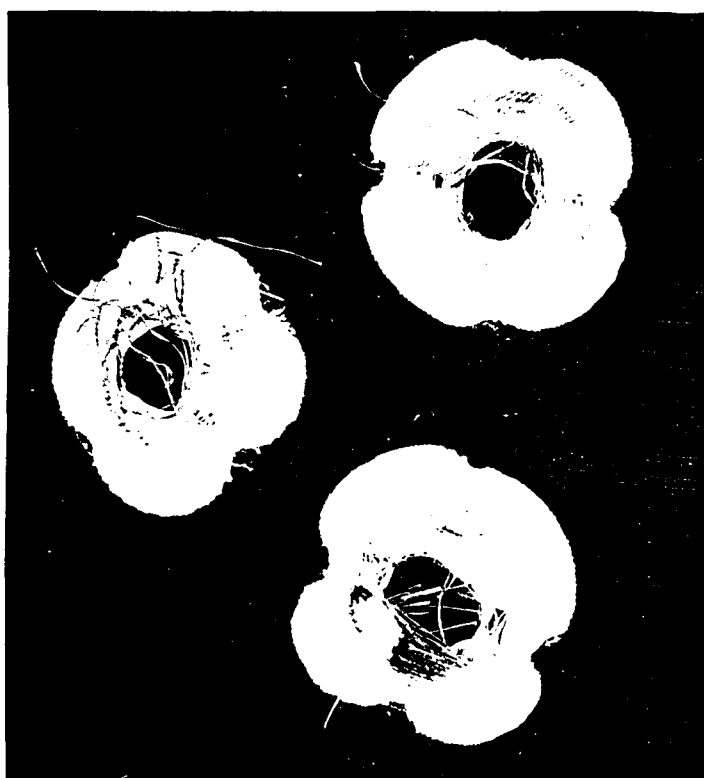
Fibre	Type de Tissu	F en N	A en mm	A en %
Verre	<b>Toile</b>	448.30	2.80	1.56
	Réd. 12x11 f/cm	363.00	2.80	1.56
	Masse : 175 g/m <sup>2</sup>	373.40	2.60	1.44
	100% points d'attache	398.10	3.00	1.67
		377.90	3.00	1.67
	X =	392.14	2.84	1.58
	Ecart type =	30.31	0.15	0.08
	CV % =	7.73	5.27	5.27
KEVLAR	<b>Satin de 4</b>	2112.50	5.90	3.28
	Réd. 6.6x6.6 f/cm	2971.20	8.30	4.61
	Masse : 175 g/m <sup>2</sup>	2453.50	7.30	4.06
	50% points d'attache	3001.40	7.60	4.22
		3025.70	8.50	4.72
	X =	2712.86	7.52	4.18
	Ecart type =	367.58	0.92	0.51
	CV % =	13.55	12.26	12.26
Dyneema	<b>Sergé de 4</b>	4635.90	13.90	7.72
	Réd. 16x16 f/cm	3694.90	13.90	7.72
	Masse : 145 g/m <sup>2</sup>	4610.80	14.30	7.94
	50% points d'attache	3953.70	13.40	7.44
		4059.50	13.60	7.56
	X =	4190.96	13.82	7.68
	Ecart type =	372.53	0.31	0.17
	CV % =	8.89	2.21	2.21
Dyneema traité	<b>Sergé de 4</b>	2230.60	8.00	4.44
	Réd. 16x16 f/cm	3355.80	10.90	6.06
	Masse : 145 g/m <sup>2</sup>	3334.10	10.60	5.89
	50% points d'attache	3582.10	11.40	6.33
		2973.70	9.20	5.11
	X =	3095.26	10.02	5.57
	Ecart type =	474.21	1.25	0.69
	CV % =	15.32	12.44	12.44
Dyneema	<b>Toile</b>	4025.30	18.60	10.33
	Réd. 17.5x17.5 f/cm	3506.50	17.00	9.44
	Masse : 175 g/m <sup>2</sup>			
	X =	3765.90	17.80	9.89
	Ecart type =	259.40	0.80	0.44
	CV % =	6.89	4.49	4.49
Dyneema traité	<b>Toile</b>	3522.70	15.70	8.72
	Réd. 17.5x17.5 f/cm	3201.00	14.70	8.17
	Masse : 175 g/m <sup>2</sup>	3035.60	15.10	8.39
		2931.10	13.40	7.44
		3927.10	16.30	9.06
	X =	3429.10	14.85	8.36
	Ecart type =	362.18	0.98	0.55
	CV % =	10.56	6.62	6.54

B1

**Test de Résistance à l'Impact.  
Dart-Test.**

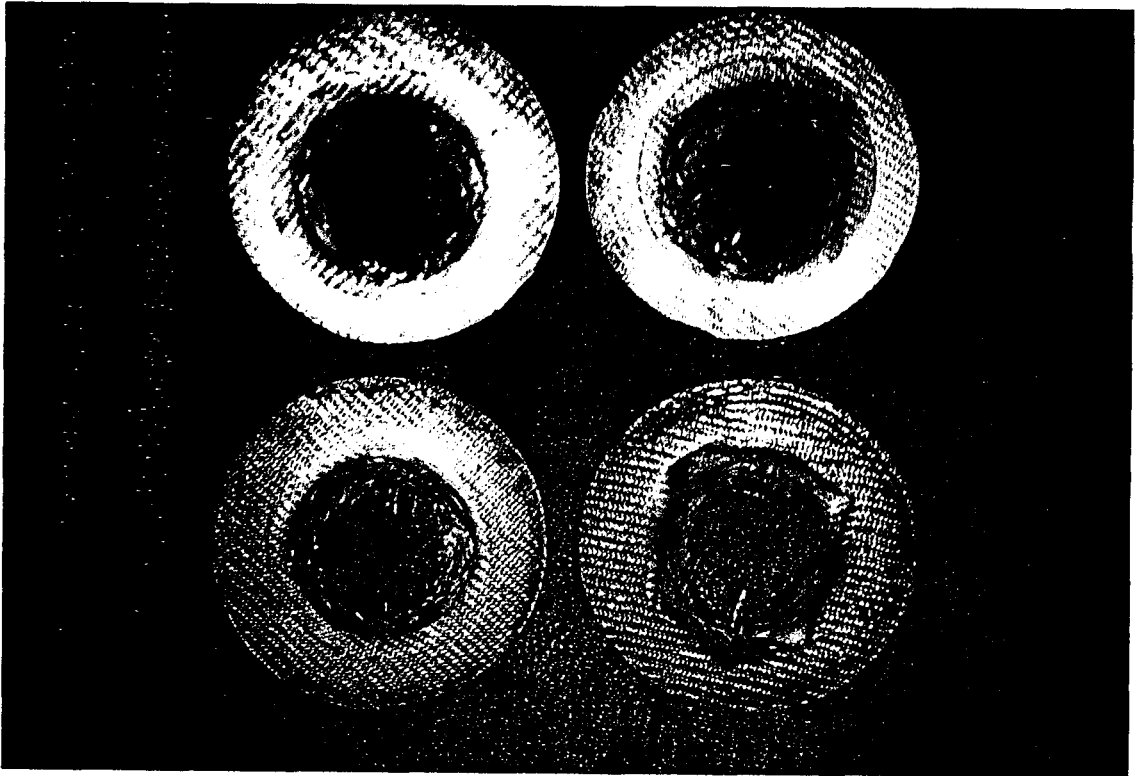


Dart-Test : Tête de travail, et de maintien des éprouvettes.



Echantillons après impact : à gauche tissus ayant subi un glissement, à droite échantillon du type unidirectionnel ayant subi un délaminage.





Dart-Test : Matériaux compositex à base de Kevlar, Verre  
et PEHP après impact.



Coupe transversale caractéristique des  
épreuves composites multicouches

---

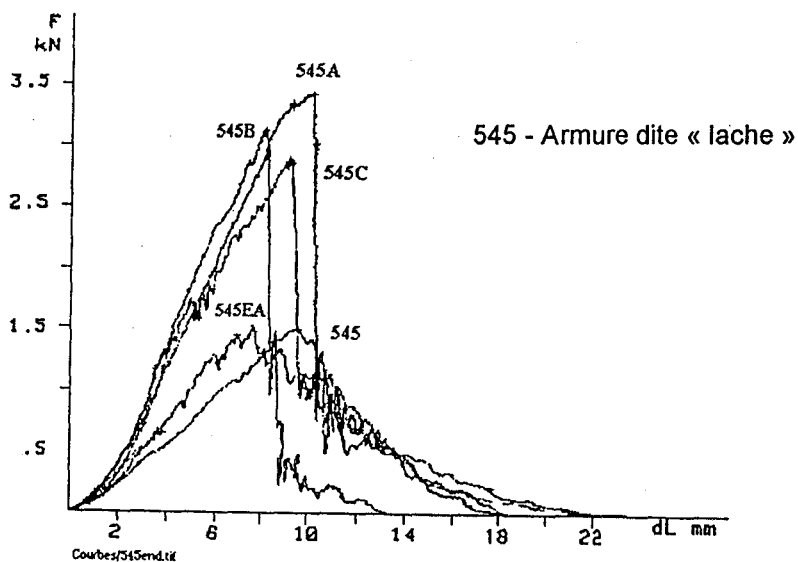
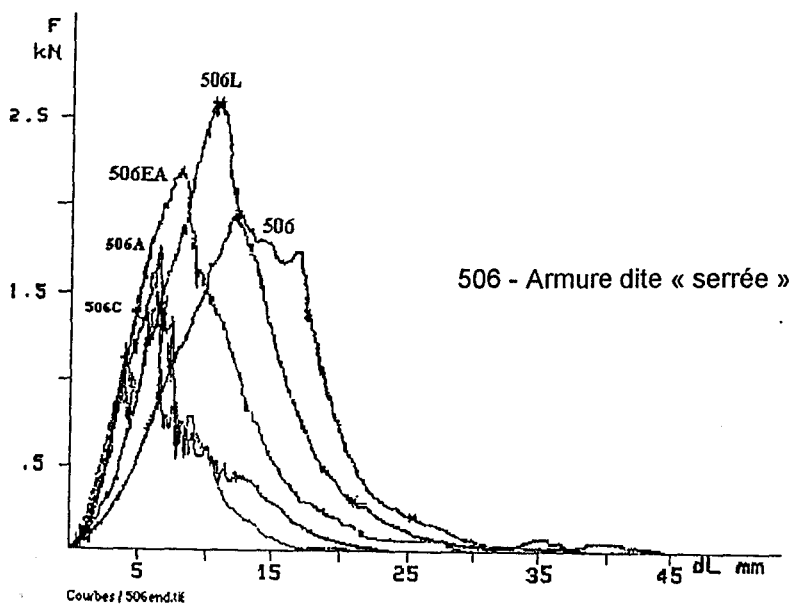
## RESULTATS DES TESTS D'IMPACT

	SANS IMPREGNATION		ENDUCTION SOUPLE		SEMI RIGIDE		RIGIDE	
	D en mm	F en N	D en mm	F en N	D en mm	F en N	D en mm	F en N
Diag. 12/6	10.80	1863.08	7.04	2736.54	6.50	1995.10	4.14	2636.22
Diag. 8/4	10.10	1719.34	6.24	2698.24	7.28	2442.76	6.58	2778.53
Satin 5T	10.70	2035.03	6.26	2499.00	6.98	2071.66	5.50	3962.40
Satin 5C	10.62	1968.56	5.18	1727.55	7.30	2195.14	7.86	2329.48
Toile	9.67	1832.61	6.23	1774.43	6.00	1677.92	11.00	2856.45
Sergé Comp.	10.32	1465.40	6.92	1966.22	7.34	1957.60	5.63	1735.33
Croisé 2*2	10.50	1273.26	6.88	2001.02			4.90	1428.70
Satiné	9.82	1161.56	5.00	1647.46	4.92	1475.58	5.63	1699.23
Serpentine	9.48	1138.86	6.03	2566.40	6.24	1982.18	6.70	2295.90
Sergé de 6	10.08	918.88	6.14	2642.74			8.50	2428.72

**Caractéristiques des échantillons ci-dessous :**

Référence 506 : Croisé 3x1 Dyneema SK 66 440 dTex, 16 fils/cm 145 g/m<sup>2</sup>

Référence 545 : Satin de 4 Dyneema SK 60 1320 dTex, 7 fils/cm. 190 g/m<sup>2</sup>

***Nomenclature des enductions :***

A : Epoxy dure

B : Epoxy Semi rigide

C : Epoxy Souple

EA : Polyuréthane milieu aqueux

L : Laminé

**Choc multiaxial  
armure 506 sergé de 4**

**Références:** sergé de 4

**non enduit**

essai	Fmax en N	D[Fmax] en mm	I[Fmax] en Nm	I[ <u>tot</u> ] en Nm
1	1819,3	8,6	7,6	23,1
2	1385,7	9,7	7,4	13,4

moyenne : 1602,50 9,15 7,50 18,25

variance : 94004,48 0,61 0,02 47,05

écart type : 306,60 0,78 0,14 6,86

ductilité : 0,59

Remarque : rupture des fils,

**enduit D400**

essai	Fmax en N	D[Fmax] en mm	I[Fmax] en Nm	I[ <u>tot</u> ] en Nm
1	3647,5	20,5	48,9	84,2
2	3548,5	18,3	41,3	70

moyenne : 3598,00 19,40 45,10 77,10

variance : 4900,50 2,42 28,88 100,82

écart type : 70,00 1,56 5,37 10,04

ductilité : 0,42

Remarque : glissement des échantillons,

**enduit D400+D2000**

essai	Fmax en N	D[Fmax] en mm	I[Fmax] en Nm	I[ <u>tot</u> ] en Nm
1	3181,2	9,7	17,2	40,4
2	3338,9	9,9	17,5	33,1

moyenne : 3260,05 9,80 17,35 36,75

variance : 12434,64 0,02 0,04 26,65

écart type : 111,51 0,14 0,21 5,16

ductilité : 0,53

Remarque : rupture des fils,

**enduit D2000+T403**

essai	Fmax en N	D[Fmax] en mm	I[Fmax] en Nm	I[ <u>tot</u> ] en Nm
1	3631,8	11,4	22	79,1
2	3338,9	9,9	17,5	33,1

moyenne : 3485,35 10,65 19,75 56,10

variance : 42895,20 1,13 10,13 1058,00

écart type : 207,11 1,06 3,18 32,53

ductilité : 0,65

Remarque : glissement des échantillons dans les mors,

## Choc multiaxial armure 514 toile

Références: toile 514

### non enduit

essai	Fmax en N	D[Fmax] en mm	l[Fmax] en Nm	l[tot] en Nm
1	4314	10,5	21,7	52
2	4753,4	11,5	27	29,2
3	4899,9	13,6	31,7	39,2

moyenne : 4655,77 11,87 26,80 40,13

variance : 92968,90 2,50 25,03 130,61

écart type : 304,91 1,58 5,00 11,43

ductilité : 0,33

Remarque : extraction des fils , pas de rupture,

### enduit PES

essai	Fmax en N	D[Fmax] en mm	l[Fmax] en Nm	l[tot] en Nm
1	4157,7	8,3	15,5	29,8
2	4978	10,4	24,3	35,8
3	5388,2	11,8	30,1	41,5
4	5173,3	11,8	28,7	39,3
5	5466,3	12,6	33,3	43,6

moyenne : 5032,70 10,98 26,38 38,00

variance : 275693,66 2,87 47,45 29,35

écart type : 525,07 1,69 6,89 5,42

ductilité : 0,31

Remarque : rupture des fils,

### enduit D400

essai	Fmax en N	D[Fmax] en mm	l[Fmax] en Nm	l[tot] en Nm
1	4577,6	10,5	22	30,4
2	5231,9	12,2	29,6	39,1
3	3913,6	9,4	16,5	24,6
4	5564	14,2	38	50,9
5	6394	15,3	48,4	59,8

moyenne : 5136,22 12,32 30,90 40,96

variance : 895254,22 6,07 161,23 209,09

écart type : 946,18 2,46 12,70 14,46

ductilité : 0,25

Remarque : rupture des fils,

**Choc multiaxial  
armure 514 toile**

**enduit D400+D2000**

essai	Fmax en N	D[Fmax] en mm	I[Fmax] en Nm	I[tot] en Nm
1	5075,7	10,1	23,9	31,2
2	5202,6	11,7	29,6	38,6
3	5749,5	11,3	30,5	40,9
4	4587,4	9,5	19,8	30,9
5	5144	11,2	25,9	32,9

moyenne : 5151,84 10,76 25,94 34,90

variance : 171056,33 0,85 19,01 20,85

écart type : 413,59 0,92 4,36 4,57

ductilité : 0,26

Remarque : rupture des fils,

**enduit D2000+T403**

essai	Fmax en N	D[Fmax] en mm	I[Fmax] en Nm	I[tot] en Nm
1	5427,2	13,2	36,2	44,9
2	5554,2	12,9	33,5	43,7
3	4743,7	9,6	21	28,4
4	4147,9	8,2	15	23,3
5	6306,2	15,4	51,3	67,9

moyenne : 5235,84 11,86 31,40 41,64

variance : 677364,37 8,48 200,15 304,03

écart type : 823,02 2,91 14,15 17,44

ductilité : 0,25

Remarque : rupture des fils,

**Choc multiaxial  
armure 516 sergé de 6**

Références: sergé de 6

non enduit

essai	Fmax en N	D[Fmax] en mm	I[Fmax] en Nm	I[tot] en Nm
1	1862,8	7	6,8	16,5
2	1823,7	7,4	7,4	16,3
3	1823,7	7,6	7,4	16,7
4	2081,1	7,8	7,3	19,4
5	2049,8	8,6	8,3	17,3

moyenne : 1928,22 7,68 7,44 17,24

variance : 16070,66 0,35 0,29 1,60

écart type : 126,77 0,59 0,54 1,26

ductilité : 0,57

Remarque : extraction des fils , pas de rupture,

enduit PES

essai	Fmax en N	D[Fmax] en mm	I[Fmax] en Nm	I[tot] en Nm
1	2536,6	8,7	12,7	28,9
2	2985,8	8,1	13,1	32,7
3	2702,6	6,9	9,5	32,6
4	2966,3	7,6	10,8	32
5	2634,3	9,6	15,1	29,1

moyenne : 2765,12 8,18 12,24 31,06

variance : 40604,27 1,07 4,68 3,61

écart type : 201,51 1,03 2,16 1,90

ductilité : 0,61

Remarque : rupture des fils,

enduit D400

essai	Fmax en N	D[Fmax] en mm	I[Fmax] en Nm	I[tot] en Nm
1	3376,5	8,1	13,1	21,4
2	3610,8	8,8	15,5	30,4
3	3669,4	9,4	16,2	28,7
4	4343,3	10,5	21,7	35,1
5	3132,3	7,4	10,7	19,8

moyenne : 3626,46 8,84 15,44 27,08

variance : 205655,69 1,42 16,93 40,81

écart type : 453,49 1,19 4,11 6,39

ductilité : 0,43

Remarque : rupture des fils,

**Choc multiaxial  
armure 516 sergé de 6**

**enduit D400+D2000**

essai	Fmax en N	D[Fmax] en mm	I[Fmax] en Nm	I[tot] en Nm
1	4255,4	8,1	15,2	30,5
2	2448,7	5,3	5,3	19,3
3	3054,2	6,3	8,7	14,3
4	3239,7	6,6	9,5	17
5	3034,7	6,3	8,9	16,7

moyenne :        **3206,54**            **6,52**            **9,52**            **19,56**

variance :        432066,20            1,02            12,78            40,54

écart type :      657,32            1,01            3,58            6,37

ductilité : 0,51

Remarque : rupture des fils,

**enduit D2000+T403**

essai	Fmax en N	D[Fmax] en mm	I[Fmax] en Nm	I[tot] en Nm
1	4450,7	9,9	22,6	42,8
2	4108,9	8,6	17,6	40,2
3	3962,4	8,9	17,5	40,1
4	3640,1	9,5	17,9	39,2
5	3513,2	7,7	12,8	48,4

moyenne :        **3935,06**            **8,92**            **17,68**            **42,14**

variance :        140454,92            0,72            12,03            14,05

écart type :      374,77            0,85            3,47            3,75

ductilité : 0,58

Remarque : glissement des échantillons dans les mors,



**Choc multiaxial  
armure 516 laminée sergé de 6**

**Références:** armure 516 laminée

**tête du percuteur sur face laminée**

essai	Fmax en N	D[Fmax] en mm	I[Fmax] en Nm	I[tot] en Nm
1	1853	8,5	8,5	29,9
2	1901,9	8,4	8,6	32,8
3	1823,7	8,5	8,4	32,8
4	1843,3	8,6	8,7	32,6
5	1823,7	8	7,8	27,5

moyenne :        **1849,12**            **8,40**            **8,40**            **31,12**

variance :        1031,75            0,05            0,12            5,61

écart type :      32,12            0,23            0,35            2,37

ductilité : **0,73**

Remarque : glissement des échantillons dans les mors,

**tête du percuteur sur face non laminée**

essai	Fmax en N	D[Fmax] en mm	I[Fmax] en Nm	I[tot] en Nm
1	1745,6	7,2	6,6	17,8
2	1989,7	7,9	8	19,9
3	1716,3	7,9	7,9	17,2
4	1901,9	8,2	8,3	19,2

moyenne :        **1838,38**            **7,80**            **7,70**            **18,53**

variance :        16814,73            0,18            0,57            1,54

écart type :      129,67            0,42            0,75            1,24

ductilité : **0,58**

Remarque : glissement des échantillons dans les mors , extraction de fils,

**Choc multiaxial  
armure 514 laminée toile**

Références: armure 514 laminé

tête du percuteur sur face laminée

essai	Fmax en N	D[Fmax] en mm	I[Fmax] en Nm	I[tot] en Nm
1	5544,4	14,8	46,7	84,5
2	5720,2	14,3	44,3	79,5
3	5397,9	14,5	42,9	83,1
4	5251,6	12,4	36,3	69,5

moyenne :        **5478,53**            **14,00**            **42,55**            **79,15**

variance :        40247,22            1,18            19,82            45,82

écart type :        200,62            1,09            4,45            6,77

ductilité : 0,46

Remarque : extraction des fils , pas de rupture,

tête du percuteur sur face non laminée

essai	Fmax en N	D[Fmax] en mm	I[Fmax] en Nm	I[tot] en Nm
1	4978	13,2	34,5	75,1
2	4792,5	13,6	36,5	78,3
3	4743,7	12,9	32,3	79,7

moyenne :        **4838,07**            **13,23**            **34,43**            **77,70**

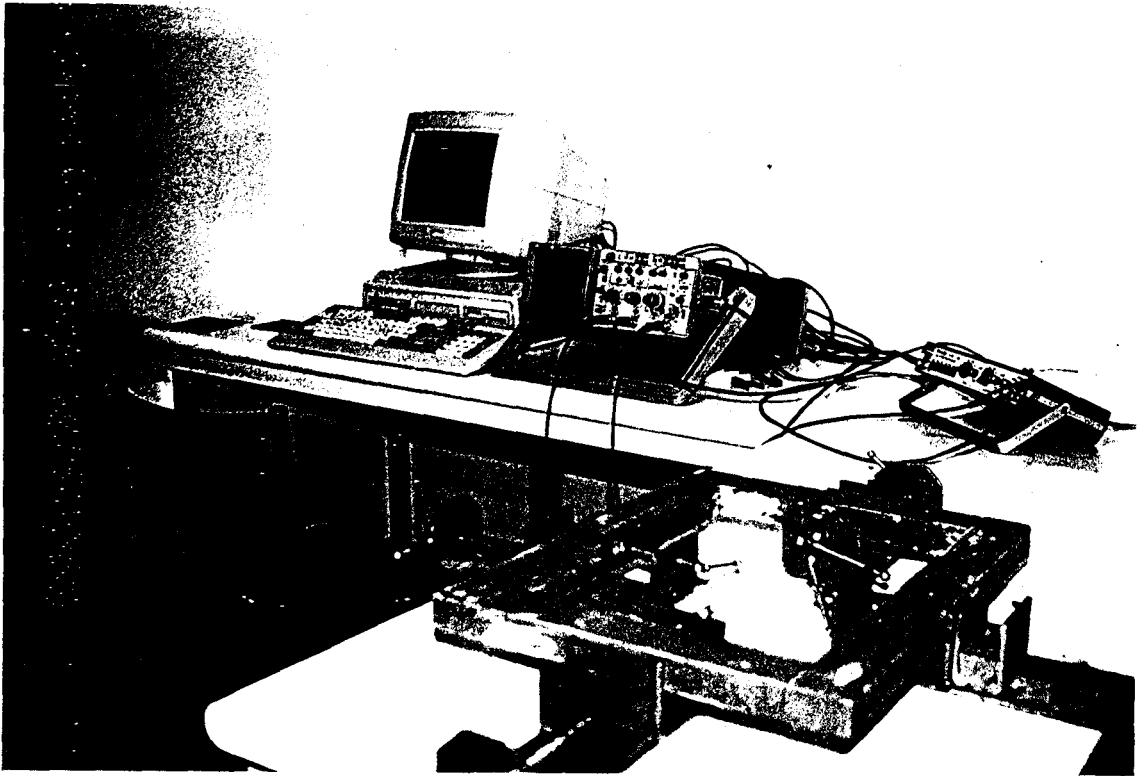
variance :        15281,36            0,12            4,41            5,56

écart type :        123,62            0,35            2,10            2,36

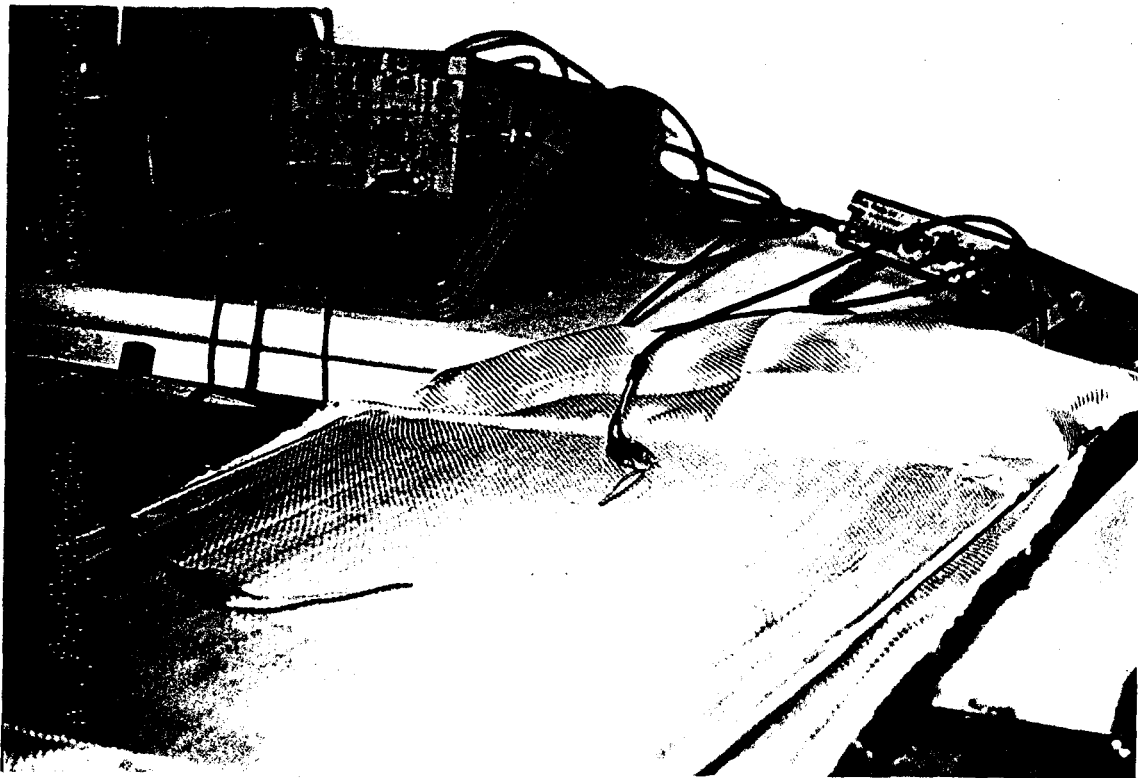
ductilité : 0,56

Remarque : extraction de fils,

**Mesure de vitesses de propagation  
d'ondes acoustiques sur tissus.**



Banc d'essais de mesures de propagation d'ondes sonores  
avec système de tension pour éprouvettes en tissus.



Capteurs piézo-électriques connectés respectivement  
au générateur d'impulsion et à l'oscilloscope.

## BANC D'ESSAI : Vitesse acoustique

Test vitesse sonique

Toile sens diagonale

01/03/1996

x en cm	T en ms	Tend	Tend inv
3.00	29.05	2.98	29.10
5.00	34.30	4.97	34.37
8.00	42.35	8.03	42.27
10.00	47.67	10.05	47.53
15.00	60.60	14.96	60.70
		#N/A	#N/A
		#N/A	#N/A
		#N/A	#N/A

pente 1

a = 0.38

ordonnée 1

b = -8.05

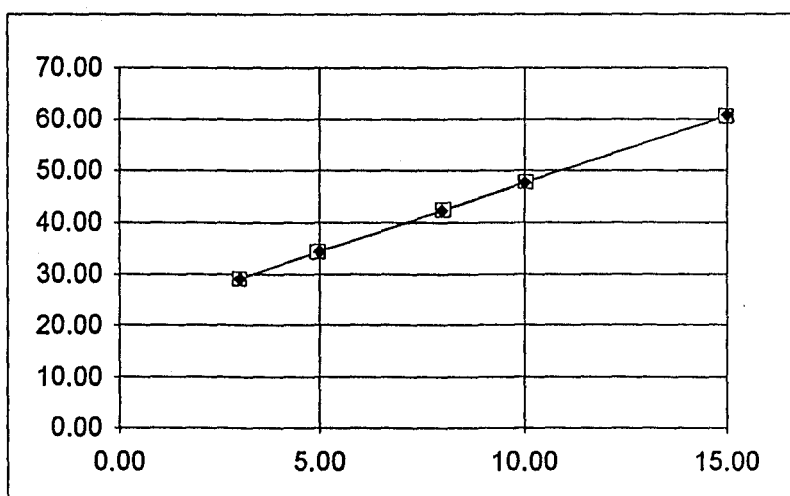
pente 2

a' = 2.63

ordonnée 2

b' = 21.20

Coefficient de Corrélation :

r<sup>2</sup> = 0.999929

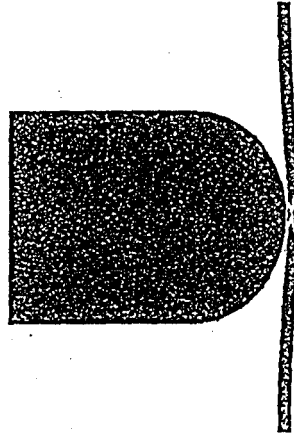
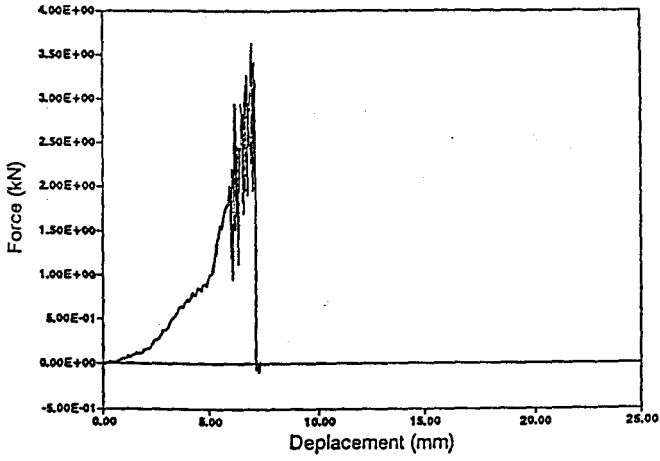
V = 3796.82341 m/s

E = 1.4416E+10 soit

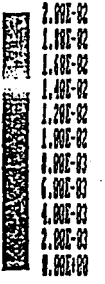
14 GPa

**Calcul de simulation numérique de la pénétration  
d'échantillons composites par projectiles.  
Programme AUTODYN**

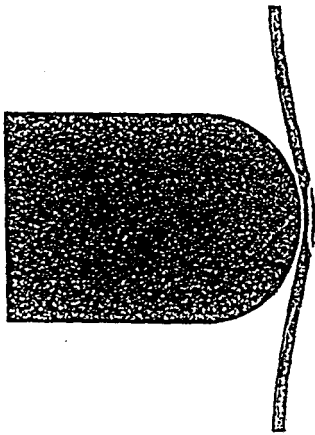
Test de perforation ENSAIT  
505 T / D400



EFFECT.S1N



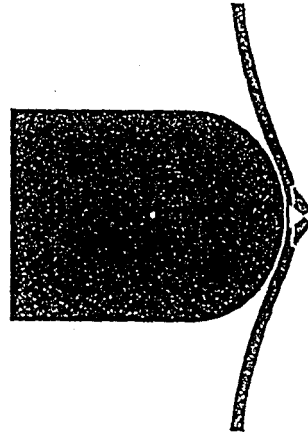
AX (en.mg.ms)  
CYCLE 10000  
T = 2.392E-01



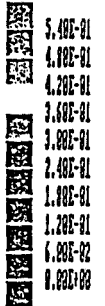
EFFECT.S1N



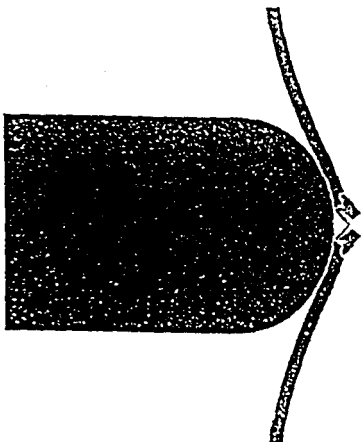
AX (en.mg.ms)  
CYCLE 30000  
T = 7.176E-01



EFFECT.S1N



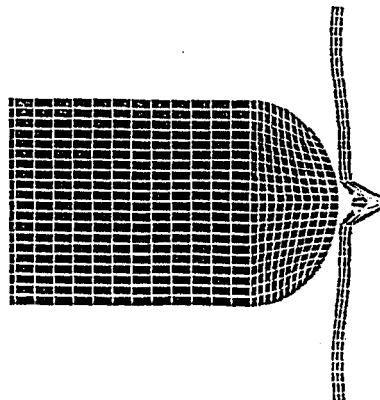
AX (en.mg.ms)  
CYCLE 50000  
T = 1.195E+00



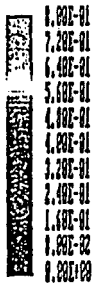
EFFECT.S1N



AX (en.mg.ms)  
CYCLE 60000  
T = 1.436E+00



EFFECT.S1N



AX (en.mg.ms)  
CYCLE 62000  
T = 1.484E+00

RUPTURE AUX BORDS