



HAL
open science

Caractérisation du comportement mécanique longitudinale d'un fil de para-aramide en sollicitation dynamique

Caroline Chevalier

► **To cite this version:**

Caroline Chevalier. Caractérisation du comportement mécanique longitudinale d'un fil de para-aramide en sollicitation dynamique. Mécanique des matériaux [physics.class-ph]. Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambresis, 2016. Français. NNT : 2016VALE0030 . tel-01534683

HAL Id: tel-01534683

<https://theses.hal.science/tel-01534683>

Submitted on 8 Jun 2017

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THESE DE DOCTORAT

Pour obtenir le grade de :
DOCTEUR de l'UNIVERSITE DE VALENCIENNES ET DU
HAINAUT-CAMBRESIS

Spécialité : Science des Matériaux Textiles

N° ORDRE : 16/33

Présentée et soutenue par

Caroline CHEVALIER

Le 13 décembre 2016, à Valenciennes

Caractérisation du comportement mécanique longitudinale d'un fil de para-aramide en sollicitation dynamique

Ecole doctorale :

Lille 1 _ Science Pour l'Ingénieur (SPI)

Equipe de recherche, Laboratoire :

Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique industrielles et Humaines (LAMIH)

JURY

Marie-Ange BUENO , Professeure	ENSISA (Mulhouse)	Rapporteur
Frédéric LACHAUD , Professeur	ISAE (Toulouse)	Rapporteur
Emmanuelle VIDAL-SALLE , Professeure	INSA (Lyon)	Examineur
Daniel COUTELLIER , Professeur	ENSIAME (Valenciennes)	Directeur de thèse
François BOUSSU , Professeur	ENSAIT (Roubaix)	Co-encadrant
Elodie BARRAUD , Docteure	ISL (Saint-Louis)	Examineur

REMERCIEMENTS

Cette thèse n'aurait pas vu le jour sans la participation de nombreuses personnes. C'est pourquoi je tiens ici à les remercier.

Tout d'abord, je souhaite remercier mon directeur de thèse Daniel COUTELLIER ainsi que mes encadrants François BOUSSU et Christophe KERISIT. Vous avez su m'orienter et me conseiller tout au long de cette thèse et d'autant plus dans les gros moments de doutes. Vous m'avez fortement encouragé, soutenu et tiré vers le haut dans les moments les plus difficiles. Grâce à vous j'ai pu tenir jusqu'au bout et je vous en serai toujours reconnaissante.

Je tiens ensuite à remercier Marie-Ange BUENO et Frédéric LACHAUD pour avoir accepté d'être les rapporteurs de cette thèse ainsi que Emmanuelle VIDAL-SALLE pour l'avoir examiné. Je les remercie doublement pour la patience dont ils ont fait preuve dans l'attente de ce mémoire et pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail. Merci également à Raffaele D'ELIA pour avoir accepté le remplacement d'Elodie BARRAUD et ainsi représenter l'ISL au sein de ce jury.

Merci à Nicolas DUMONT, Frédéric VEYET et Thomasz KROMOSKA de l'atelier tissage du GEMTEX. Une équipe au top qui m'a permis de bénéficier à foison de fils et de tissus pour mes expériences. Je remercie également Georg GUETTER et Norbert FADERL pour la quantité d'essais qu'ils m'ont permis de réaliser à l'ISL.

Je tiens à remercier Elodie BARRAUD, Christophe TAMISIER ainsi que Pascale LEHMANN pour les soutiens moraux et administratifs qu'ils m'ont apporté lorsqu'on pouvait entendre crier dans les couloirs : « Rien ne va plus ! »

Je souhaite maintenant remercier mes amis de l'institut avec qui j'ai passé de très bons moments, au travail comme à l'extérieur, et sans qui ces années de thèse auraient été bien tristes !

Je pense tout d'abord à ma chère homonyme : Caro, tu as le cœur tendre et fondant d'un moelleux au chocolat, la force d'un volcan et la volonté d'une lionne face à Mimi la gazelle. Grrr.. Ne change rien :)

Je pense aussi à Maxime L. et à nos séances de piscine avec Monsieur « le petit chat », à Maxime C. et ces petits moments « cosy » passés ensemble, à Jiji, Florimond, Hippo et leurs fameux questionnaires qui m'ont permis d'en apprendre tellement plus sur moi-même... Je n'oublie pas non plus Charles, Pierre, Aurélien, Manu et Raffaele : que la Triforce soit avec vous !

Je pense également à Thierry et Philippe, les deux rayons de soleil du groupe ! Merci à vous pour votre perpétuelle bonne humeur et votre gentillesse.

Un remerciement particulier à Léon avec qui j'ai beaucoup partagé, à commencer par une succession de bureaux :) Je te remercie pour toute l'aide et tous les conseils que tu as su m'apporter, tant au niveau personnel qu'au niveau de la thèse.

Aussi, une grosse pensée pour Bastien, Justine, Stéphan, Clément, Rémi, ainsi que Louise, Max, Nico, Philippe, Alex et M'sieur RAYMOND de l'équipe ELSI, avec qui j'ai apprécié chaque moment passé !

Enfin, un grand merci à ma famille et à ma belle-famille qui ont été derrière moi tout du long et qui m'ont aidé à garder le moral quand j'en avais trop peu.

Pour finir, je souhaite remercier Etienne qui m'a le plus supporté durant ces quatre années. Tu as toujours été là pour moi, même à distance. Tu m'as soutenu jusqu'au bout, tu as cru en moi comme jamais et tu as su me redonner confiance quand j'en avais besoin. Sans toi je n'y serai pas arrivée.

A nous l'élevage de poules poilues maintenant !!

TABLE DES MATIERES

TABLE DES MATIERES.....	5
TABLE DES ILLUSTRATIONS.....	9
INTRODUCTION	19
1. Contexte de l'étude	20
2. Matériau d'étude : les fibres de para-aramide	24
2.1. Composition et structure de la fibre	24
2.3. Caractéristiques mécaniques	28
3. Problématique identifiée.....	29
4. Démarche proposée	31
CHAPITRE I : ETAT DE L'ART _ ETUDE DU COMPORTEMENT MECANIQUE D'UN FIL BALISTIQUE EN TRACTION QUASI-STATIQUE ET DYNAMIQUE	33
I.1. Comportement mécanique de fils balistiques en traction.....	34
I.1.1. Comportement quasi-statique du fil	34
I.1.1.1. Description du comportement mécanique.....	34
I.1.1.2. Influence de la longueur du fil	35
I.1.1.3. Influence de la torsion du fil	35
I.1.1.4. Modes de rupture du fil en fonction de la température	36
I.1.2. Comportement dynamique du fil	38
I.1.2.1. Description du comportement mécanique.....	38
I.1.2.2. Mode de rupture du fil en fonction de la vitesse de déformation.....	40
I.2. Moyens d'essai de traction sur fils	41
I.2.1. Essais de traction sur fil seul	42
I.2.1.1. Moyen quasi-statique : Dispositif de traction uniaxiale.....	42
I.2.1.2. Moyens dynamiques : le SHTB et le dispositif de tirs transverses	44
I.2.2. Essais de traction sur fil dans sa structure tissée.....	63
I.2.2.1. Moyen quasi-statique: Yarn pull-out test.....	63
I.2.2.2. Moyen dynamique: Yarn pull-out test	68
CONCLUSION	71

CHAPITRE II : LE DISPOSITIF DE TRACTION PAR IMPACT SUR FIL.....73

II.1. Développement du dispositif de traction	74
II.1.1. Principes et Définitions.....	74
II.1.1.1. Le Dispositif de Traction par Impact sur Fil (DTIF)	74
II.1.1.2. Version initiale du dispositif.....	75
II.1.1.3. Conditions de tir à respecter	77
II.1.2. Développement du dispositif et conditions d'essais	78
II.1.2.1. Optimisation du système d'attache du fil.....	78
II.1.2.2. Optimisation de la rupture du fil.....	80
II.1.2.3. Version finale du dispositif.....	83
II.1.2.4. Conditions de tir.....	84
II.2. Dispositif de mesure et traitement des données	85
II.2.1. Le dispositif de mesure laser	85
II.2.1.1. Définition	85
II.2.1.2. Principe	86
II.2.1.3. Calibration	88
II.2.1.4. Validation	89
II.2.2. Traitement de données numériques	91
II.2.2.1. Définition	91
II.2.2.2. Application	92
II.2.2.3. Validation	94
II.2.2.4. Délimitation des phases d'élongation et de rupture du fil	96
CONCLUSION	97

CHAPITRE III : ETUDES EXPERIMENTALES99

INTRODUCTION.....	100
III.1. Comportement mécanique du fil seul.....	101
III.1.1. Influence de la vitesse de déformation	101
III.1.1.1. Description du protocole d'essai	101
III.1.1.2. Résultats expérimentaux.....	103
III.1.2. Effets de l'arrangement structurel d'un tissu sur le comportement mécanique d'un de ses fils testé isolément.....	112
III.1.2.1. Description du protocole d'essai	112
III.1.2.2. Résultats expérimentaux.....	116
III.2. Comportement mécanique du fil testé dans sa structure tissée.....	121
III.2.1. Influence du nombre de points de liage à surfaces de contact totales égales	121
III.2.1.1. Protocole d'essai.....	121

III.2.1.2. Résultats expérimentaux.....	122
III.2.2. Influence de la surface de contact totale à points de liage équivalent.....	127
III.2.2.1. Protocole d'essai.....	127
III.2.2.2. Résultats expérimentaux.....	128
III.2.3. Impacts du changement de l'arrangement structural d'un tissu sur le comportement mécanique d'un de ses fils testé au sein de cette même structure.	132
III.2.3.1. Protocole d'essai.....	132
III.2.3.2. Résultats expérimentaux.....	136
CONCLUSION	145
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	147
REFERENCES	151

TABLE DES ILLUSTRATIONS

INTRODUCTION

Figure 1 : Première armure faite de bois, de cuir de bœuf et d'acier (200 ans av JC)	20
Figure 2 : Premier gilet pare-balle fait de soie (fin du 19 ^{ème} siècle).....	20
Figure 3 : Armures « Brewster Body Shield » faites d'un alliage de chrome et de nickel datant de la Première Guerre Mondiale (à gauche) _ Gilet pare-balle composé de huit plaques en Doron datant de la Seconde Guerre Mondiale (à droite)	20
Figure 4 : Gilet T52-1 entièrement composé de toiles de nylon tressées datant de la guerre de Corée.	21
Figure 5 : Gilet PASGT-V composé de toiles de Kevlar datant de la guerre du Golf.....	21
Figure 6 : Procédé de conception de la structure laminée Twaron LFT® UD41 par la société Teijin _ Enduction de quatre structures UD par deux films de polyéthylène [4].....	22
Figure 7 : Schéma d'un tissu 2D.	22
Figure 8 : Croissance de la V50 des gilets pare-balles réalisés à base de fibres techniques au fur et à mesure de leur introduction de 1970 à 2010 [5]......	23
Figure 9 : Réaction de polycondensation entre le PPD et le TCl pour former le PPD-T avec relâchement d'acide chlorhydrique HCl.....	24
Figure 10: Procédé de filage par voie humide en jet sec [6].	25
Figure 11: A gauche, la structure « cœur/peau » du filament dont le cœur est composé de nombreuses cristallites [7]. A droite, la formation de ponts hydrogène O-H intermoléculaires.	25
Figure 12 : Arrangement des chaînes et formation de ponts hydrogène O-H intermoléculaires au sein des filaments de Kevlar 29 et 49.	26
Figure 13 : Pourcentage de perte sur la contrainte à rupture pour les fils de Kevlar en fonction du temps d'exposition [12]......	27
Figure 14 : Stabilité hydraulique du Kevlar 29 en présence de vapeur d'eau saturée à 138°C en fonction du temps d'exposition [12]......	27
Figure 15 : Effet de l'élévation de la température sur la contrainte à rupture du Kevlar 29 en fonction du temps d'exposition [12]......	27
Figure 16 : Décomposition d'un tissu sous trois niveaux structurels auxquels sont associés les paramètres influents respectif.....	29
Figure 17 : (a) Photo et (b) schéma du système support/projectile. (c) Illustration de l'enroulement du fil autour des tiges présentes dans le support et le projectile [19].	30
Figure 18 : Comparaison dans le cas d'impact non perforant sur le déplacement du sommet de la pyramide de déformation entre : les résultats expérimentaux, les résultats numériques en quasi-statique et les résultats numériques en dynamique [19]......	31
Tableau 1 : Tableau répertoriant les quatre principaux types de structure Interlock : l'Interlock A-L, l'Interlock A-T, l'Interlock O-L et l'Interlock O-T.....	23
Tableau 2 : Tableau comparatif des propriétés mécaniques en sollicitation quasi-statique pour chaque type de fil d'aramide de la marque Kevlar®.	26
Tableau 3: Comparaison des propriétés mécaniques du fil de Kevlar 129 entre l'état statique et l'état dynamique [19]......	31

CHAPITRE 1

Figure 1.1 : Courbe de contrainte-déformation d'un fil d'aramide (Twaron _ 1100 dTex) en sollicitation quasi-statique ($3.10^{-4} s^{-1}$ et $8.10^{-3} s^{-1}$) [23].	34
Figure 1.2 : Influence de la torsion du fil sur sa contrainte à rupture [24].	35
Figure 1.3: Variation de la vitesse normalisée de propagation de l'onde transverse dans le fil en fonction de sa torsion. [35].	36
Figure 1.4: Diagramme des contraintes à la rupture fragile par cisaillement σ_f , par craquelures σ_c et par écoulement σ_y en fonction de la température pour une sollicitation en traction sur le fil polymérique à faible vitesse de déformation [36].	38
Figure 1.5: Courbe de contrainte-déformation d'un fil d'aramide (Kevlar 49) en sollicitation dynamique ($1350 s^{-1}$) [42].	38
Figure 1.6 : Test de traction réalisés sur des fils de Twaron: a) déformation à rupture en fonction de la vitesse de déformation, b) contrainte à rupture en fonction de la vitesse de déformation, c) module d'Young en fonction de la vitesse de déformation [23].	39
Figure 1.7 : Captures d'images au microscope SEM de la rupture d'un filament extrait d'un fil sollicité à [36, 23] : a) faible vitesse de déformation ($\approx 200 s^{-1}$) b) haute vitesse de déformation ($\approx 1000 s^{-1}$). 40	40
Figure 1.8 : Tests de traction réalisés sur des fils Twaron [36] _ Déformation à rupture en fonction de la vitesse de déformation.	41
Figure 1.9: Illustration de mors classiques pour maintenir des fils sur machine de traction quasi-statique [45].	42
Figure 1.10 : Schéma (gauche) et photo (droite) du système d'attache capstan. [23].	43
Figure 1.11: Formation de plissure à la surface d'un filament due à une courbure trop petite [23].	43
Figure 1.12: Essais de traction quasi-statique sur des fils d'aramides (Twaron T1040) de 250 mm, vierge et extrait d'une structure tissée [30].	44
Figure 1.13: Schéma du dispositif de barres Hopkinson en traction avec comme propulseur un canon à gaz.	45
Figure 1.14: Schéma du dispositif de barres Hopkinson en traction avec comme propulseur un pendule [49].	45
Figure 1.15: Schéma du système d'attache d'un fil sur des barres Hopkinson en traction proposé par Shim et al. [36].	46
Figure 1.16: Schéma du dispositif d'attache d'un fil sur des barres Hopkinson en traction proposé par Bolduc et al. [53].	46
Figure 1.17 : Représentation schématique de la création de l'onde incidente dans la barre entrante suivant plusieurs étapes.	48
Figure 1.18 : Courbe de tension en fonction du temps des ondes incidente (ϵi), réfléchie (ϵr) et transmise (ϵt) pour un essai de traction sur barres Hopkinson. [23].	49
Figure 1.19: Représentation schématique d'une propagation d'onde longitudinale le long d'un fil lors d'une traction uniaxiale [19].	49
Figure 1.20 : Schéma de propagation d'onde longitudinale dans un fil soumis à la traction d'un projectile [57].	50
Figure 1.21: Simulation numérique d'un essai de traction uniaxiale sur fil. Propagation d'une onde longitudinale dans le fil (gauche) et évolution de la force à l'extrémité fixe en fonction du temps (droite) [59].	51

Figure 1.22 : Représentation schématique de la propagation d'onde élastique le long d'une barre : (a) réflexion de l'onde longitudinale depuis l'extrémité fixe et (b) réflexion depuis l'extrémité libre [61].
..... 51

Figure 1.23 : Courbe de contrainte-déformation d'un fil d'aramide vierge (Twaron T1040) obtenue à 375 s^{-1} [30].
..... 54

Figure 1.24 : Courbes de contrainte-déformation d'un fil d'aramide vierge (Twaron T1040) obtenues à différentes vitesses de déformation [30].
..... 55

Figure 1.25 : Evolution de la déformation du fil après impact transverse d'un projectile [70].
..... 56

Figure 1.26: Propagation des ondes longitudinale et transversale le long d'un fil lors d'un impact balistique _ encadré rouge en référence à la figure 1.27. [20].
..... 56

Figure 1.27 : Configuration de la moitié d'un fil soumis à un impact transverse _ déplacement du fil entre un temps t et $t+\Delta t$ [58].
..... 57

Figure 1.28 : Superposition de photos du fil soumis à un impact transverse prises à différents moments successifs _ Représentation du mouvement de particules dans le fil lors de l'essai [35].
..... 58

Figure 1.29 : Schéma du moyen d'essais de tir transverse au canon à gaz. 58

Figure 1.30 : Tirs transverses sur des fils de polyaramide et de UHMWPE [38] : a) mode de rupture par TSW b) mode de rupture par cisaillement.
..... 59

Figure 1.31: Variation de l'énergie spécifique absorbée par un fil d'aramide et d'UHMWPE en fonction de l'énergie d'impact lors d'un tir transverse [38].
..... 59

Figure 1.32 : Schéma du moyen d'essai de tir transverse utilisant le dispositif de barres Hopkinson [35].
..... 60

Figure 1.33 : Transmission progressive dans l'épaisseur du fil des ondes longitudinale et transverse le long des filaments [35].
..... 61

Figure 1.34 : Formation et prolifération d'un triangle isocèle le long du fil au fur et à mesure de l'avancée du projectile contre le fil [35].
..... 61

Figure 1.35 : Variation de la contrainte dans le fil en fonction de sa déformation. Courbe en pointillés : courbe en gradin obtenue d'après les mesures expérimentales. Courbe pleine : lissage de la courbe de contrainte-déformation [67].
..... 62

Figure 1.36 : Propagation des ondes transverse et longitudinale lors d'un essai de tir transverse _ Réflexion de l'onde transverse aux extrémités du fil [67].
..... 62

Figure 1.37 : Photo (a) et schéma du dispositif de « pull yarn test », avant (b) et pendant (c) l'essai. [74].
..... 63

Figure 1.38 : Variation de la force d'extraction du fil en fonction de son déplacement durant un essai de « yarn pull-out » [74].
..... 64

Figure 1.39 : Etapes de déformation de la structure tissée au niveau du fil testé durant l'essai de « yarn pull-out » _ Réduction de l'angle d'ouverture de la surface de contact inter-fils [74].
..... 65

Figure 1.40 : Représentation schématique du phénomène « glissement (S_p) / adhérence (S_k) » sur la courbe Force-Déplacement de l'essai de « yarn pull-out » [81].
..... 66

Figure 1.41 : Influence de la force de pré-tension appliquée sur le tissu par rapport à la force d'extraction du fil testé pour différentes longueurs de tissu [71].
..... 67

Figure 1.42 : Vue schématique du dessus de l'essai de « yarn pull-out » _ Création de forces des fils transverses exercées sur le fil testé due à la force de pré-tension appliquée sur le tissu. 68

Figure 1.43 : Représentation schématique de l'essai de « yarn pull-out » avec dispositif de pendule [89].
..... 69

Figure 1.44 : Systèmes d'attache du fil pour les essais de « yarn pull out » (a) dit « hors plan » et (b) dit « dans le plan » [89].	69
Tableau 1.1 : Variation de l'angle d'inclinaison γ du fil r/r au sens du fil et de la vitesse de propagation de l'onde transverse en fonction du nombre de torsion (tours/inch) affecté au fil testé [35].	36
Tableau 1.2: Température de transition vitreuse (T_g) des principaux polymères utilisés dans la conception de fils.	37
Tableau 1.3 : Tableau comparatif des forces nécessaires à l'extraction des fils de chaîne et de trame (Kevlar) lors d'essais transverses « out-of-plane » de « yarn pull out », avec et sans pré-tension du tissu, en régime quasi-statique et dynamique [89].	70

CHAPITRE 2

Figure 2.1 : Schéma du dispositif de traction longitudinale sur fil.	74
Figure 2.2: Schéma de la version 0 du DTIF.	75
Figure 2.3: Captures vidéo à différents temps (μs) illustrant l'amorce de rupture par cisaillement dans le fil testé au niveau du cylindre d'attache du projectile _ version initiale du Dispositif de Traction par Impact sur Fil.	75
Figure 2.4: Captures vidéo à différents temps (μs) illustrant l'amorce de rupture par cisaillement sur le fil testé au niveau du double nœud _ version initiale du Dispositif de Traction par Impact sur Fil.	76
Figure 2.5: Captures vidéo à différents temps (μs) illustrant l'enroulement du fil sur lui-même lors de sa mise en tension _ version initiale du Dispositif de Traction par Impact sur Fil.	76
Figure 2.6: Modification complète de la géométrie de la version d'origine du dispositif de traction.	78
Figure 2.7 : Captures vidéo à différents temps (μs) illustrant le temps d'alignement du fil.	79
Figure 2.8: Schéma du montage du système d'attache dans le projectile créant une détente du fil.	79
Figure 2.9: Modification de la géométrie du support (a) et du projectile (b) pour parer au problème d'alignement du fil.	79
Figure 2.10 : Schéma d'une coupe transversale au niveau des pièces de maintien, sans mousse (à gauche) et avec mousse (à droite).	80
Figure 2.11 : Première version modifiée de la géométrie du projectile.	80
Figure 2.12: Deuxième version modifiée de la géométrie du projectile.	81
Figure 2.13 : Ajout d'une masse supplémentaire au projectile.	81
Figure 2.14 : Schémas des différentes étapes de production d'un échantillon de fil d'aramide dans le projectile de polycarbonate.	81
Figure 2.15 : Schéma de la dernière version du Dispositif de Traction par Impact sur Fil.	83
Figure 2.16 : Photo du Dispositif de Traction par Impact sur Fil pour tester des fils de 2 cm.	83
Figure 2.17 : Photo du Dispositif de Traction par Impact sur Fil adapté au test sur fil de 2 cm testé dans sa structure tissée.	83
Figure 2.18 : Illustrations des trois étapes dans la préparation des échantillons de fils testés dans leur structure tissée.	84
Figure 2.19 : Schéma du dispositif de mesure laser.	85

Figure 2.20 : Photo du dispositif de mesure laser.....	86
Figure 2.21 : Photo du faisceau laser discontinu composé de cinq marqueurs.	86
Figure 2.22 : Schémas des différentes étapes de passage théoriques du projectile à travers le faisceau laser.	87
Figure 2.23 : Courbe de tension en fonction du temps déterminé à partir de la mesure de la variation d'intensité lumineuse dû au passage du projectile.	87
Figure 2.24 : Variation de la tension mesurée en fonction du temps à différentes pressions appliquées.	88
Figure 2.25 : Relation entre le coefficient directeur c et la vitesse.....	89
Figure 2.26 : Variation de la tension mesurée en fonction du temps lors d'un essai avec le DTIF sans fil.	89
Figure 2.27 : Pourcentage d'erreur de la mesure de tension par la photodiode sur toute la longueur du faisceau laser continu _ représentation des phases 1 à 4 (en rouge).....	90
Figure 2.28 : Graphe explicite de pondération des valeurs avant traitement.....	91
Figure 2.29 : Graphe explicite de pondération des valeurs après traitement.....	91
Figure 2.30 : Lissage de la courbe de déplacement du projectile en fonction du temps avec représentation des phases 1 à 4 (zone bleutée).	92
Figure 2.31 : Lissage de la courbe de vitesse du projectile en fonction du temps avec représentation des phases 1 à 4 (zone bleutée).....	93
Figure 2.32 : Courbe de tension (rouge), de déplacement du projectile (noir) et de la vitesse du projectile (bleu) en fonction du temps durant les phases 1 à 4.....	93
Figure 2.33 : Photo du montage du dispositif de mesure laser et du PDV.....	94
Figure 2.34 : Schéma explicatif du vélocimètre à effet Doppler (PDV).	95
Figure 2.35 : Comparaison des mesures de la vitesse du projectile réalisées par le dispositif laser et par le vélocimètre durant un même essai de traction sur fil.	95
Figure 2.36 : Courbe de force en fonction du temps pour une moyenne d'essais de traction quasi-statique réalisés à $10^{-3}s^{-1}$ sur fil de para-aramide (168Tex _ Twaron). Délimitation des phases d'élongation et de rupture du fil.	96
Figure 2.37 : Courbes de vitesse et de force en fonction du temps pour une moyenne d'essais de traction dynamique réalisés à $1000s^{-1}$ sur fil de para-aramide (336Tex _ Twaron). Délimitation des phases d'élongation et de rupture du fil.	96
Tableau 2.1 : Longueur du projectile, calculée à l'aide du dispositif de mesure laser, et mesurée à l'aide d'un pied à coulisse.	90

CHAPITRE 3

Figure 3.1 : Moyenne des courbes de vitesse du projectile en fonction du temps pour différents essais réalisés dans les mêmes conditions.	100
Figure 3.2 : Courbe de vitesse moyennée en fonction du temps et son erreur standard relative.....	101

Figure 3.3 : Variation de la vitesse de déformation durant la phase d'élongation jusqu'à rupture pour des essais réalisés à différentes vitesses initiales de propulsion.....	102
Figure 3.4 : Courbes de vitesse en fonction du temps pour les essais sur fil seul de 20 mm testé à 20 et 30 m/s. Marquage du début de la rupture progressive du fil.	103
Figure 3.5 : Courbes de vitesse en fonction du temps pour les essais sur fil seul de 5 mm testé à 20 et 40 m/s. Marquage du début de la rupture progressive du fil.	104
Figure 3.6 : Courbes de force appliquée à l'extrémité du fil testé en fonction de la déformation vraie du fil pour les essais sur fil seul de 20 mm testé à 20 et 30 m/s et de 5 mm testé à 20 et 40 m/s.	106
Figure 3.7 : Courbes de densité d'énergie volumique absorbée par le fil en fonction de la déformation vraie du fil pour les essais sur fil seul de 20 mm testé à 20 et 30 m/s et de 5 mm testé à 20 et 40 m/s.	107
Figure 3.8 : A gauche, variation de la force nécessaire à la rupture du fil en fonction de la vitesse de déformation. A droite, variation de la déformation vraie à rupture subie par le fil en fonction de la vitesse de déformation.....	107
Figure 3.9 : Représentation simplifiée des interactions inter- et intra-moléculaire entre les chaînes macromoléculaires de para-aramide avant et pendant l'application d'une traction axiale sur le fil....	108
Figure 3.10 : Observation au Microscope Electronique à Balayage de le rupture n°1.....	109
Figure 3.11 : Observation au Microscope Electronique à Balayage de le rupture n°2.....	109
Figure 3.12 : Observation au Microscope Electronique à Balayage de le rupture n°3.....	110
Figure 3.13 : Observation au Microscope Electronique à Balayage de le rupture n°4.....	110
Figure 3.14 : Allure de la variation de l'allongement moyen à rupture des filaments en fonction de la vitesse de déformation subie par le fil. Représentation des gammes de vitesse de déformation dites « Quasi-statique », « Transitoire » et « Dynamique ».	111
Figure 3.15 : Schéma descriptif de l'angle d'ondulation du fil de chaîne.....	112
Figure 3.16 : Photos des structures tissées dont sont extraits les fils testés : tissu toile B, tissu toile G et tissu toile A. Disposition des structures tissées suivant les axes de fils de chaîne et de trame.	113
Figure 3.17 : Schéma explicatif de l'ondulation imposée au fil de trame lors du processus de tissage avec les croisements de fils de chaîne pairs et impairs dans la foule.	114
Figure 3.18 : Variation des densités chaîne et trame de la structure tissée dont est extrait le fil testé. Courbes de vitesses du projectile en fonction du temps pour les essais à 20 m/s sur fil seul de 20 mm extrait des tissus B, A et G et sur fil vierge de 20 mm. Marquage du début de la rupture progressive du fil.	116
Figure 3.19 : Variation des densités chaîne et trame de la structure tissée dont est extrait le fil testé. Courbes de force exercée à l'extrémité du fil en fonction de sa déformation vraie pour les essais à 20 m/s sur fil vierge de 20 mm ainsi que sur fil seul de 20 mm extrait des tissus B, A et G.	120
Figure 3.20 : Variation des densités chaîne et trame de la structure tissée dont est extrait le fil testé. Courbes d'énergie absorbée par le fil en fonction de sa déformation vraie pour les essais réalisés à 20 m/s sur fil vierge de 20 mm ainsi que sur fil seul de 20 mm extrait des tissus B, A et G. Marquage du début de la rupture progressive du fil.	120
Figure 3.21 : Représentation des points de liage entre un fil de chaîne et les différents fils de trame transverses.	121
Figure 3.22 : Représentation des structures tissées à surfaces de contact inter-fils totales équivalentes dans lesquelles sont testées les fils de chaîne et dont le nombre de points de liage varie.	122

Figure 3.23 : Variation du nombre de points de liage dans la structure tissée testée. Courbes de vitesse du projectile en fonction du temps pour les essais sur fil de 20 mm testé à 20 m/s dans les structures tissées suivantes : Cannelée 2.3. 5d/cm, Cannelée 2.2. 5d/cm, Cannelée 2.1.1.1. d et Toile 5d/cm. Marquage du début de la rupture progressive du fil. 123

Figure 3.24 : Variation du nombre de points de liage dans la structure tissée testée. Courbes de force exercée à l'extrémité du fil en fonction de sa déformation vraie pour les essais à 20 m/s sur fil testé dans les structures tissées suivantes : Cannelée 2.3. 5d/cm, Cannelée 2.3. 5d/cm, Cannelée 2.1.1.1. 5d/cm et Toile 5d/cm, et sur fil vierge de 20 mm. 125

Figure 3.25 : Variation du nombre de points de liage dans la structure tissée testée. Courbes d'énergie absorbée par le fil en fonction de sa déformation vraie pour les essais à 20 m/s sur fil de 20 mm testé dans les structures tissées suivantes : Cannelée 2.3. 5d/cm, Cannelée 2.2. 5d/cm, Cannelée 2.1.1.1. 5d/cm et Toile 5d/cm, et sur fil vierge de 20 mm. Marquage du début de la rupture progressive du fil. 126

Figure 3.26 : Schéma explicatif du changement d'ondulation du fil en fonction du nombre de points de liage. 126

Figure 3.27 : Variation de l'angle d'ondulation du fil de chaîne en fonction du nombre de points de liage. 127

Figure 3.28 : Représentation des deux couples de structures tissées à points de liage équivalents dans lesquelles sont testées les fils de chaîne et dont la surface de contact inter-fils totale varie. 128

Figure 3.29 : Variation de la surface de contact totale inter-fils _ 8 points de liage. Courbes de vitesse du projectile en fonction du temps pour les essais réalisés à 20 m/s sur fil de 20 mm testé dans les structures tissées suivantes : Cannelée 2.2. 8d/cm et Cannelée 2.1.1.1. 5d/cm. Marquage du début de la rupture progressive du fil. 128

Figure 3.30: Variation de la surface de contact totale inter-fils _ 4 points de liage. Courbes de vitesse du projectile en fonction du temps pour les essais réalisés à 20 m/s sur fil de 20 mm testé dans les structures tissées suivantes : Cannelée 2.3. 5d/cm et Toile 2d/cm. Marquage du début de la rupture progressive du fil. 129

Figure 3.31 : Variation de la surface de contact totale inter-fils _ 8 points de liage. Courbes de force appliquée au fil en fonction de sa déformation vraie pour les essais réalisés à 20 m/s sur fil de 20 mm testé dans les structures tissées suivantes : Cannelée 2.2. 8d/cm et Cannelée 2.1.1.1. 5d/cm. 130

Figure 3.32 : Variation de la surface de contact totale inter-fils _ 4 points de liage. Courbes de force appliquée au fil en fonction de sa déformation vraie pour les essais réalisés à 20 m/s sur fil de 20 mm testé dans les structures tissées suivantes : Cannelée 2.3. 5d/cm et Toile 2d/cm. 131

Figure 3.33 : Variation de la surface de contact totale inter-fils _ 8 points de liage. Courbes d'énergie absorbée par le fil en fonction de sa déformation vraie pour les essais réalisés à 20 m/s sur fil de 20 mm testé dans les structures tissées suivantes : Cannelée 2.2. 8d/cm et Cannelée 2.1.1.1. 5d/cm. 131

Figure 3.34 : Variation de la surface de contact totale inter-fils _ 4 points de liage. Courbes d'énergie absorbée par le fil en fonction de sa déformation vraie pour les essais réalisés à 20 m/s sur fil de 20 mm testé dans les structures tissées suivantes : Cannelée 2.3. 5d/cm et Toile 2d/cm. 132

Figure 3.35 : Observations au microscope optique de coupes transverses réalisées a) dans le sens chaîne et b) dans le sens trame de la structure tissée B. c) Représentation dans l'espace des courbures définissant la surface de contact inter-fils « chaîne/trame » dans cette même structure. 133

Figure 3.36 : Représentation graphique 3D de la surface de contact inter-fils « chaîne/trame » dans la structure tissée A. 134

Figure 3.37 : Représentation graphique 3D de la surface de contact inter-fils « chaîne/trame » dans la structure tissée G. 134

Figure 3.38 : Représentation graphique 3D de la surface de contact inter-fils « chaîne/trame » dans la structure tissée B. 135

Figure 3.39 : Observation des zones de contact inter-fils « chaîne/chaîne » à partir des photos prises à contre jour des tissus A, B et G.	135
Figure 3.40 : Observation au microscope optique d'une coupe longitudinale d'un fil de chaîne présent dans la structure A. Représentation de la surface de contact inter-fils « chaîne/chaîne ».	136
Figure 3.41 : Observation au microscope optique d'une coupe longitudinale d'un fil de chaîne présent dans la structure G. Représentation de la surface de contact inter-fils « chaîne/chaîne ».	136
Figure 3.42 : Variation des densités chaîne et trame des structures tissées dans lesquelles sont testés les fils. Courbes de vitesses du projectile en fonction du temps pour les essais à 20 m/s sur fil de 20 mm testé dans les tissus B, A et G. Marquage du début de la rupture progressive du fil.	137
Figure 3.43 : Variation des densités chaîne et trame des structures tissées dans lesquelles sont testés les fils. Courbes de force appliquée au fil en fonction de sa déformation vraie pour les essais à 20 m/s sur fil de 20 mm testé dans les tissus B, A et G et comparés au fil vierge.	138
Figure 3.44 : Variation des densités chaîne et trame des structures tissées dans lesquelles sont testés les fils. Courbes d'énergie absorbée par le fil en fonction de sa déformation vraie pour les essais à 20 m/s sur fil de 20 mm testé dans les tissus B, A et G et comparés au fil vierge. Marquage du début de la rupture progressive du fil.	139
Figure 3.45 : Graphes montrant les différents apports en allongement (colonne de gauche) d'un fil vierge au fil déformé, (colonne du milieu) du fil déformé au fil testé dans sa structure, (colonne de droite) d'un fil vierge au fil testé dans sa structure, pour les structures tissées (bleu) B, (rouge) G et (vert) A.	142
Figure 3.46 : Graphes montrant les différents apports en force (colonne de gauche) d'un fil vierge au fil déformé, (colonne du milieu) du fil déformé au fil testé dans sa structure, (colonne de droite) d'un fil vierge au fil testé dans sa structure, pour les structures tissées (bleu) B, (rouge) G et (vert) A.	142
Figure 3.47 : Graphes montrant les différents apports énergétiques (colonne de gauche) d'un fil vierge au fil déformé, (colonne du milieu) du fil déformé au fil testé dans sa structure, (colonne de droite) d'un fil vierge au fil testé dans sa structure, pour les structures tissées (bleu) B, (rouge) G et (vert) A.	143
Figure 3.48 : (à gauche) Courbes d'énergie absorbée par le fil en fonction de sa déformation vraie et (à droite) courbes de force appliquée au fil en fonction de sa déformation vraie, pour les essais sur fils vierge, extrait et testé dans les structures tissées A (vert), B (bleu) et G (rouge).	144
Figure 3.49 : Répartitions de l'impact des paramètres structuraux, que sont l'arrangement spatial (D_{tr}/D_{ch}), la surface de contact inter-fils totale (S_c), le nombre de points de liage (N_{PL}) et les pressions inter-fils transverses et latérales (P°), sur les critères influant le comportement mécanique du fil testé, que sont les forces de frottement inter-fils (F_f), les concentrations de contraintes ($[C]^\circ$), le phénomène d'hystérésis (H) et les défauts de structure (DS).	146
Figure 3.50 : Variation de la surface de contact unitaire « chaîne/trame » et « chaîne/chaîne » par rapport à l'arrangement spatial entre les fils de chaîne et trame des tissus A, B et G.	146
Figure 3.51 : Variation du taux de déformation plastique au sein des filaments des fils de chaîne en fonction de l'arrangement spatial entre les fils de chaîne et trame des tissus A, B et G.	146
Tableau 3.1 : Données de force, allongement et déformation vraie à rupture extrait du graphe de la Figure 3.6 en fonction de la vitesse de déformation initiale de chaque essai.	105
Tableau 3.2 : Données énergétiques extrait du graphe de la Figure 3.7 pour la partie de courbe jusqu'au début de rupture du fil de chaque essai.	106
Tableau 3.3 : Données énergétiques extrait du graphe de la Figure 3.7 pour la partie de courbe du début de rupture du fil jusqu'à sa rupture complète pour chaque essai.	106
Tableau 3.4 : Données énergétiques globales extrait du graphe de la Figure 3.7 pour chaque essai. .	106

Tableau 3.5 : Description des différentes déformations dues aux critères physiques liés à la structure tissée et subies par le fil de chaîne.....	115
Tableau 3.6 : Tableau comparatif des données de force à rupture et de déformation vraie à rupture pour le fil vierge et les fils extraits des structures tissées B, A et G.....	119
Tableau 3.7 : Tableau répertoriant (1) l'énergie nécessaire à l'élongation jusqu'au début de rupture du fil <i>Eabs spe</i> , (2) l'énergie absorbée du début de la rupture jusqu'à la rupture complète du fil <i>Eabs spe'</i> , (3) l'énergie absorbée totale <i>Eabs spe tot</i> , pour le cas du fil vierge et des fils extraits des structures tissées B, A et G.....	119
Tableau 3.8 :Tableau comparatif des données de force à rupture et de déformation vraie à rupture en fonction du nombre de points de liage entre le fil vierge et les fils testés dans les structures suivantes : Cannelée 2.3. 5d/cm, Cannelée 2.2. 5d/cm, Cannelée 2.1.1.1. 5d/cm et Toile 5d/cm.....	125
Tableau 3.9 : Tableau comparatif des données énergétiques en fonction du nombre de points de liage entre le fil vierge et les fils testés dans les structures suivantes : Cannelée 2.3. 5d/cm, Cannelée 2.2. 5d/cm, Cannelée 2.1.1.1. 5d/cm et Toile 5d/cm.....	125
Tableau 3.10 : Tableau comparatif des données de force à rupture et de déformation vraie à rupture en fonction de leur surface de contact inter-fils totale entre le fil vierge et les deux couples de structures tissées au nombre de points de liage différent.....	130
Tableau 3.11 : Tableau comparatif des données de force à rupture et de déformation vraie à rupture en fonction de leur surface de contact inter-fils totale entre le fil vierge et les deux couples de structures tissées au nombre de points de liage différent.....	130
Tableau 3.12 : Tableau répertoriant (1) l'aspect du tissu, (2) l'angle d'ondulation du fils de chaîne, (3) la surface totale de contact inter-fils et (4) le nombre de points de liage relatif aux structures tissées A, G et B.....	138
Tableau 3.13 : Tableau comparatif des données énergétiques pour le fil vierge, le fil extrait de sa structure et le fil testé dans sa structure, pour les structures tissées B, G et A.....	141
Tableau 3.14 : Tableau comparatif des données de force à rupture et déformation vraie à rupture pour le fil vierge, le fil extrait de sa structure et le fil testé dans sa structure, pour les structures tissées B, G et A.....	141

INTRODUCTION

Sommaire

1. Contexte de l'étude	20
2. Matériau d'étude : les fibres de para-aramide	24
2.1. Composition et structure de la fibre	24
2.3. Caractéristiques mécaniques	28
3. Problématique identifiée	29
4. Démarche proposée	31

1. Contexte de l'étude

Depuis toujours, l'Homme doit se protéger de menaces extérieures pour survivre. Les premières armures datent de 200 ans avant J-C en Chine et étaient faites de bois, de cuivre et d'acier (Figure 2). Ces protections ont évolué à travers le monde et au cours des siècles afin de s'adapter à l'évolution constante des menaces. Les modifications apportées aux équipements de protection ont principalement pour but d'augmenter leurs performances balistiques tout en réduisant leur masse. Ainsi, le combattant peut bénéficier de la meilleure protection balistique tout en pouvant se mouvoir aisément.

C'est pourquoi les chercheurs ont toujours été en quête de nouveaux matériaux plus résistants mécaniquement et plus légers afin de les intégrer dans ces équipements de protection.

Les structures fibreuses font leur apparition dans les premiers gilets pare-balle inventés par Casimir Zeglen à la fin du 19^{ème} siècle avec l'utilisation de la soie (Figure 1) [1]. Ces protections étaient efficaces contre des armes à poudre noire (type revolver Colt) dont l'énergie d'impact représente à l'époque environ 255 J.



Figure 1 : Première armure faite de bois, de cuir de bœuf et d'acier (200 ans av JC)



Figure 2 : Premier gilet pare-balle fait de soie (fin du 19^{ème} siècle)

Ces équipements de protection vont être amenés à évoluer en fonction de la menace, toujours grandissante au fil de ces deux derniers siècles, pour atteindre de nos jours les 3500 J [2]. Jusque dans les années 1950, les équipements de protection souples ne sont alors principalement constitués que de coton, d'un mélange de fibres de verre et de plastique appelé « Duron », de plaques métalliques et/ou de céramique suivant l'importance de la menace (Figure 3).



Figure 3 : Armures « Brewster Body Shield » faites d'un alliage de chrome et de nickel datant de la Première Guerre Mondiale (à gauche) _ Gilet pare-balle composé de huit plaques en Duron datant de la Seconde Guerre Mondiale (à droite)

La fibre de nylon, créée par la société DuPont de Nemours en 1935, fait son apparition dans les années 1950, durant la guerre de Corée, sous forme de couches protectrices dans les gilets pare-balle avec le modèle T52-1 (Figure 4). Ce n'est qu'en 1975 qu'apparaissent les premiers gilets pare-balle composés de couches de protection en fibres de para-aramide (Kevlar®) : les gilets K-15. Peu de temps après, dans les années 1980, arrivent les gilets PASGT-V (Personnel Armor System for Ground Troops Vest) (Figure 5). Ces gilets remplacent alors les versions améliorées des gilets en nylon des années 1960. En effet, ils bénéficient d'un niveau de protection balistique double en plus d'un niveau de confort et de camouflage supérieur [3]. A la même période, un nouveau type de casque, composé de fibres de para-aramide, fait son apparition pour remplacer les casques d'acier : les casques PASGT-H (Personnel Armor System for Ground Troops Helmet).

L'introduction de ces fibres techniques dans les équipements de protection individuelle (gilets pare-balle, inserts, casques) ont permis de réduire fortement leurs masses tout en apportant une meilleure protection balistique que les précédentes versions. En effet, ces fibres présentent de hautes propriétés mécaniques, telles qu'une forte ténacité et une forte rigidité, tout en conservant une faible masse (ex : $\rho_{\text{para-aramide}} = 1,44 \text{ g/cc}$). Ces critères sont une partie des raisons pour lesquelles les plaques d'acier dans les gilets pare-balle et dans les casques ont été remplacées par ce matériau. En effet, pour un même volume, le para-aramide est cinq fois plus léger et presque deux fois plus résistant en traction que l'acier (*référence : Maraging*).



Figure 4 : Gilet T52-1 entièrement composé de toiles de nylon tressées datant de la guerre de Corée.



Figure 5 : Gilet PASGT-V composé de toiles de Kevlar datant de la guerre du Golf.

Ces structures fibreuses sont présentes dans les gilets pare-balle sous deux formes qui sont les laminés et les tissés.

Les structures laminées correspondent à la superposition de plusieurs couches de fils accolés les uns aux autres sans enchevêtrement appelées « Uni-Directionnels » (UD) avec une variation de l'angle d'orientation des fils entre deux couches allant de 0° à 90° . L'imprégnation par une résine ou encore l'enduction d'un empilement de structures laminées apportent une bonne cohésion entre les fils et ses différentes couches superposées [4] (Figure 6). Ces structures sont présentes sous forme rigide ou souple suivant leur épaisseur.

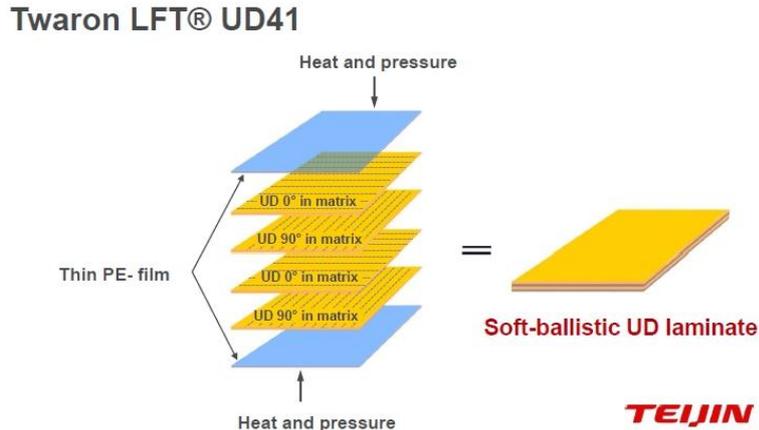


Figure 6 : Procédé de conception de la structure laminée Twaron LFT® UD41 par la société Teijin _ Enduction de quatre structures UD par deux films de polyéthylène [4].

Les structures tissées regroupent deux grandes catégories qui sont les tissus 2D et les tissus 3D, aussi appelés « Interlocks ». Ces derniers commencent leur entrée dans le domaine de la protection tandis que les structures 2D y sont déjà présentes depuis plusieurs décennies. Ces deux catégories ont en commun deux types de fils qui sont les fils de chaîne et les fils de trame, aussi appelés « duites », orientés perpendiculairement par rapport aux fils de chaîne. Ces deux types de fils s'entrecroisent les uns par rapport aux autres et génèrent ainsi la cohésion de la structure dans le plan pour former une structure 2D (Figure 7).

Les Interlocks correspondent à l'empilement de plusieurs structures tissées 2D, ou unidirectionnelles (alternativement positionnée à 0° et 90°), consolidées par un troisième type de fil, le fil de liage, qui les lie dans l'épaisseur. Il existe quatre catégories d'architectures de tissage suivant l'entrecroisement des fils (Tableau 1). Les fils de liages peuvent onduler entre les fils chaîne soit d'une colonne de fils à une autre (Orthogonal), soit transversalement entre les colonnes de fils (Angle). Ils peuvent également onduler soit au travers de toute la structure (Through-the-Thickness traduit « à travers l'épaisseur »), soit au travers de quelques couches de fils de chaîne uniquement (Layer-to-layer traduit « Couche-à-couche »).

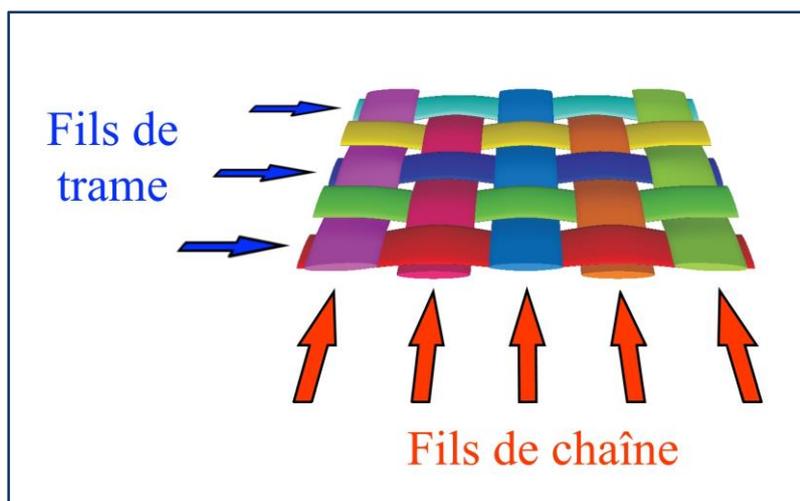


Figure 7 : Schéma d'un tissu 2D.

	Angle (A)	Orthogonale (O)
Couche-à-couche (L)		
A travers l'épaisseur (T)		

Tableau 1 : Tableau répertoriant les quatre principaux types de structure Interlock : l'Interlock A-L, l'Interlock A-T, l'Interlock O-L et l'Interlock O-T.

De nos jours, les principaux matériaux fibreux utilisés dans les équipements de protection souples (gilets pare-balle) et rigides (casques et inserts) sont les fibres de para-aramide, de polyéthylène haute densité et de PIPD [5] (Figure 8). Le travail présenté dans ce rapport porte uniquement sur les fibres de para-aramide lesquelles sont décrites plus en détails ci-après.

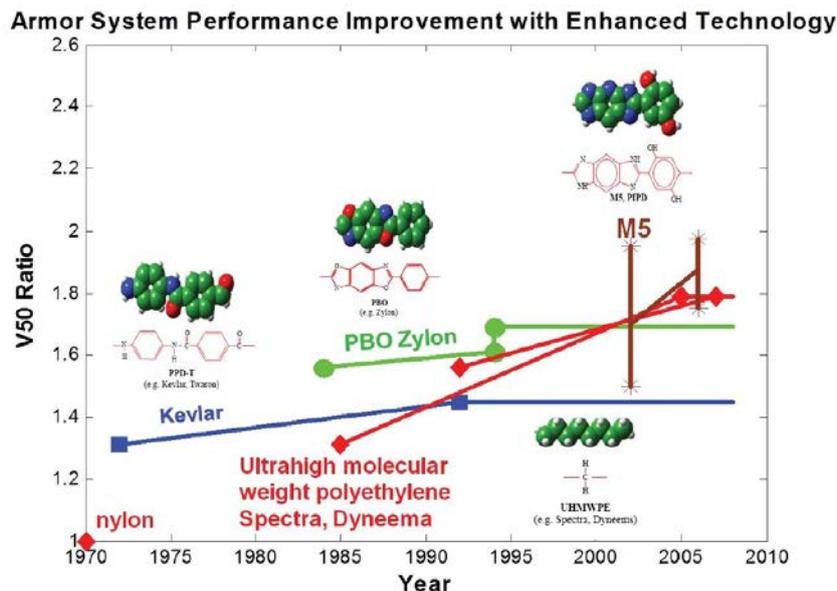


Figure 8 : Croissance de la V50 des gilets pare-balles réalisés à base de fibres techniques au fur et à mesure de leur introduction de 1970 à 2010 [5].

2. Matériau d'étude : les fibres de para-aramide

2.1. Composition et structure de la fibre

Ces fibres ont été découvertes par la société DuPont de Nemours en 1965 et introduites sur le marché en 1972 sous le nom commercial Kevlar®. En 1983, la société néerlandaise Akzo introduit une fibre similaire de composition chimique voisine sous la marque Twaron®. La marque est rachetée plus tard par la société Teijin.

Ces fibres sont composées d'une multitude de chaînes poly(p-phénylène-téréphtalamide) (PPD-T) produites par la réaction de polycondensation entre le p-phénylène diamide (PPD) et le chlorure de téréphtaloyle (TCl) (Figure 9).

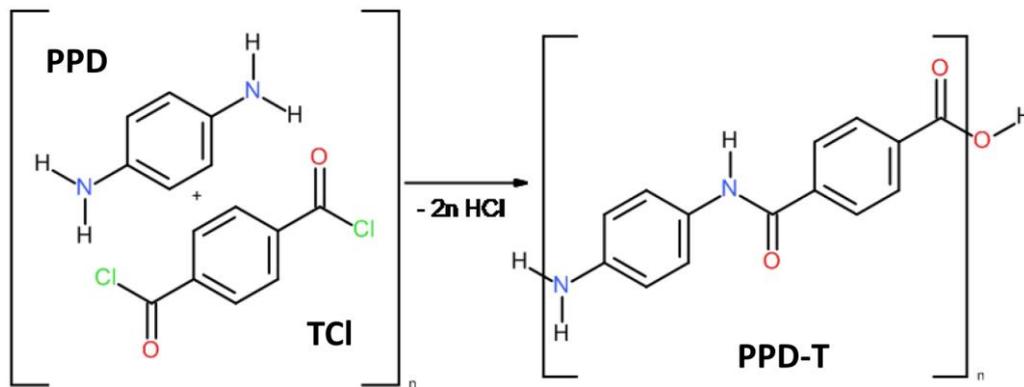


Figure 9 : Réaction de polycondensation entre le PPD et le TCl pour former le PPD-T avec relâchement d'acide chlorhydrique HCl.

Lors du processus de filage des filaments, les chaînes macromoléculaires présentent en solution passent au travers de la filière et sont étirées dans la longueur, suivant l'axe du filament ainsi formé. Ces filaments passent au contact de l'air puis finissent dans un bain de coagulation d'eau froide ce qui fixe dans la structure l'alignement des chaînes macromoléculaires [6] (Figure 10).

Le passage au contact de l'air avant la fixation de la structure dans le bain de coagulation est une étape importante. Elle permet tout d'abord de contrer l'effet de gonflement de la matière à la sortie de chaque trou de la filière, responsable d'une désorientation des chaînes macromoléculaires. Aussi, le contact de la matière avec l'air génère des contraintes axiales sur chaque filament ce qui permet d'accentuer l'alignement et le confinement des chaînes entre elles.

Le refroidissement des filaments dans le bain se fait plus rapidement à la surface qu'au cœur de la matière. Ceci engendre l'apparition d'une structure « cœur/peau » au sein du filament. La rapidité de refroidissement de la peau ne lui permet pas d'acquiescer un arrangement cristallin malgré l'alignement des chaînes macromoléculaires. À l'inverse, celles présentes dans le cœur du filament ont assez de temps pour former des zones cristallines appelées « cristallites » [7] (Figure 11, à gauche).

Au sein de ces cristallites, les chaînes subissent un réarrangement optimale dans l'espace ce qui entraîne la formation de ponts hydrogène O-H intramoléculaires en plus grand nombre. Cela apporte un meilleur enchevêtrement des chaînes entre elles et une consolidation des cristallites. Elles confèrent ainsi aux filaments formés un fort taux de cristallinité pouvant aller jusqu'à 85% [8, 9] (Figure 11, à droite).

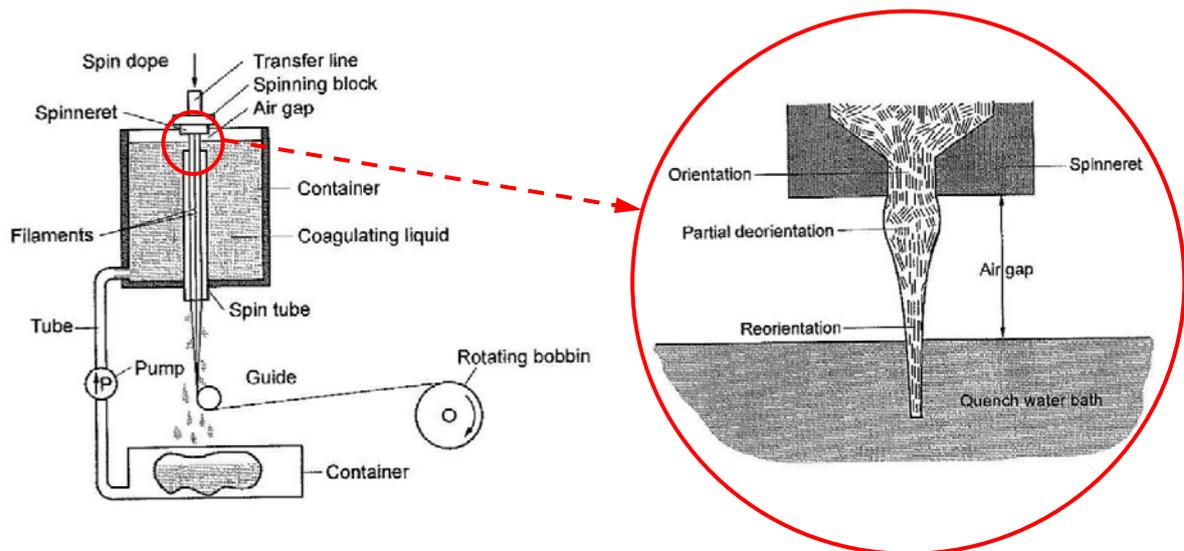


Figure 10: Procédé de filage par voie humide en jet sec [6].

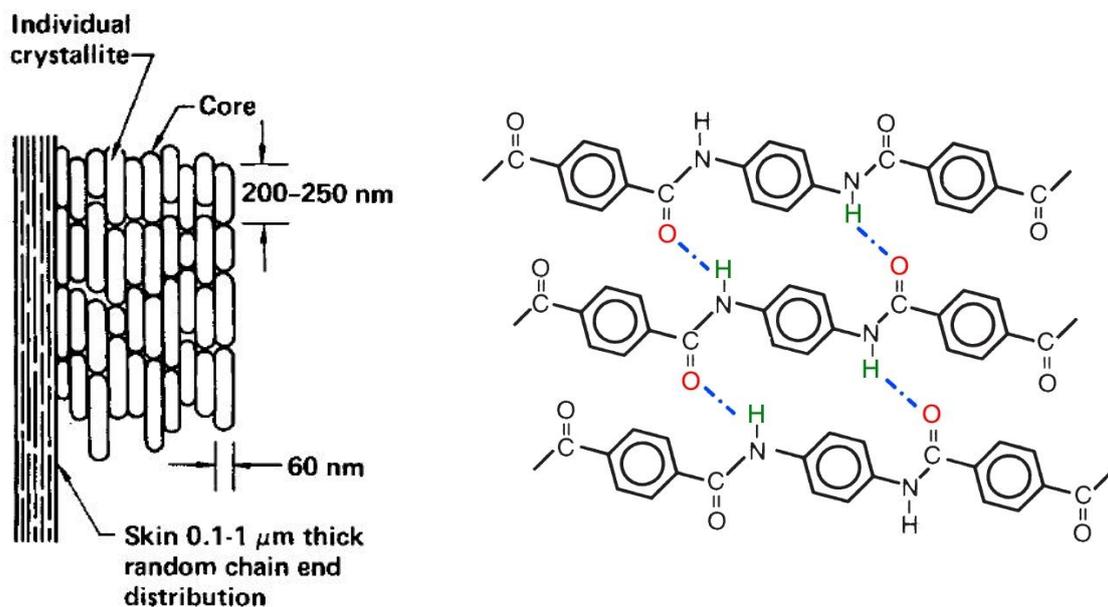


Figure 11: A gauche, la structure « cœur/peau » du filament dont le cœur est composé de nombreuses cristallites [7].
A droite, la formation de ponts hydrogène O-H intermoléculaires.

2.2. Propriétés physico-chimiques

Ce phénomène d'alignement des chaînes au sein des filaments lui permet d'acquérir des propriétés mécaniques plus importantes que celles d'un fil dont les filaments présentent majoritairement des zones amorphes.

Les fils qui forment ces filaments en sortie de filière sont des fils de « module standard » se situant autour de 70 GPa tel que le Kevlar 29.

Les propriétés mécaniques des fibres d'aramide peuvent varier. En effet, il existe de nombreuses variantes de fibre de para-aramide que l'on peut distinguer chez la marque Kevlar® selon leur grade et dont l'ordre croissant et relatif à celui de leur module d'élasticité (Tableau 2). Les fibres de Kevlar 49 et Kevlar 149 sont ainsi obtenues par étirement à chaud (0,5% d'élongation à 550°C pour obtenir le

2. Matériau d'étude : les fibres de para-aramide

Kevlar 49 [7]) de ces fibres à «module standard ». Ce traitement thermomécanique permet un meilleur arrangement des chaînes entre elles ce qui favorise leur confinement ainsi que la formation d'un plus grand nombre de ponts hydrogènes O-H intermoléculaires (Figure 12). Ces phénomènes confèrent ainsi au filament des propriétés mécaniques plus élevées [10, 11].

Type de fil	Contrainte à rupture $\sigma_{rupture}$ (GPa)	Module d'Young E (GPa)	Allongement à rupture $\varepsilon_{rupture}$ (%)
Kevlar 29	2.9	70 (« module standard »)	3.6
Kevlar 49	3.0	112 (« haut module »)	2.4
Kevlar 149	3.4	179 (« très haut module »)	1.7

Tableau 2 : Tableau comparatif des propriétés mécaniques en sollicitation quasi-statique pour chaque type de fil d'aramide de la marque Kevlar®.

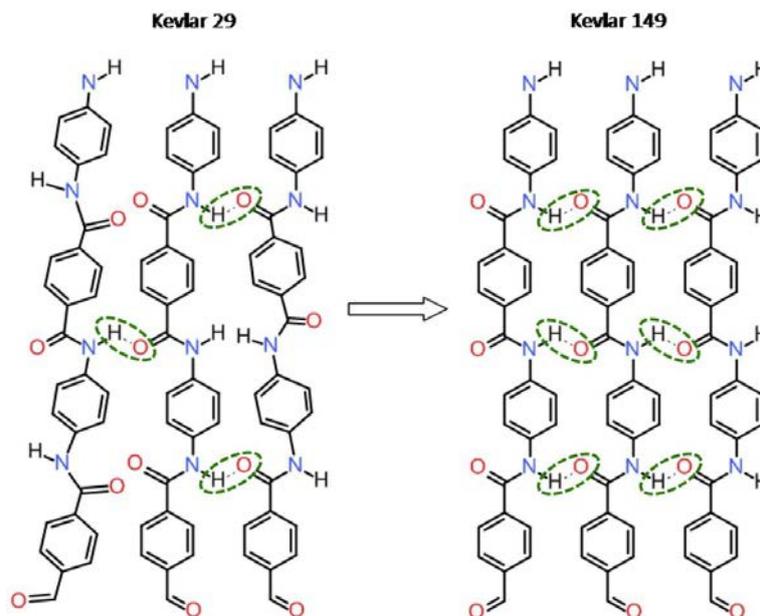


Figure 12 : Arrangement des chaînes et formation de ponts hydrogène O-H intermoléculaires au sein des filaments de Kevlar 29 et 49.

Ces fibres sont conçues pour répondre à des besoins différents dans le domaine de la balistique et dans d'autres comme l'aéronautique, l'aérospatial, l'automobile, le sport pour leurs nombreuses propriétés physico-chimiques qui sont :

- Leur légèreté
- Leur résistance à la traction et aux chocs
- Leur résistance au cisaillement et à l'abrasion
- Leur résistance au feu (pas de combustion en dessous de 34,6 MJ/kg) et à la chaleur (pas de fusion en dessous de 540°C)
- Leur résistance aux solvants organiques (excepté l'hypochlorite de sodium et certains acides/bases)

Ces fibres présentent également quelques inconvénients. En effet, il a été découvert que les fibres de para-aramide perdaient de leurs propriétés mécaniques [12] :

- En présence d'eau (Figure 14)
- En présence de rayons UVs (Figure 13)
- Avec l'élévation de la température (Figure 15)

Les effets néfastes de ces trois facteurs sont accentués dans le temps.

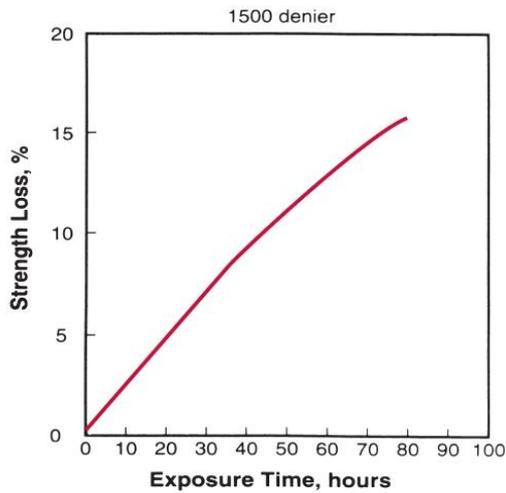


Figure 14 : Stabilité hydraulique du Kevlar 29 en présence de vapeur d'eau saturée à 138°C en fonction du temps d'exposition [12].

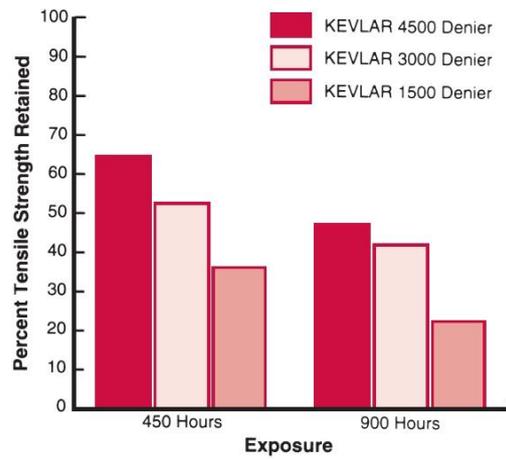


Figure 13 : Pourcentage de perte sur la contrainte à rupture pour les fils de Kevlar en fonction du temps d'exposition [12].

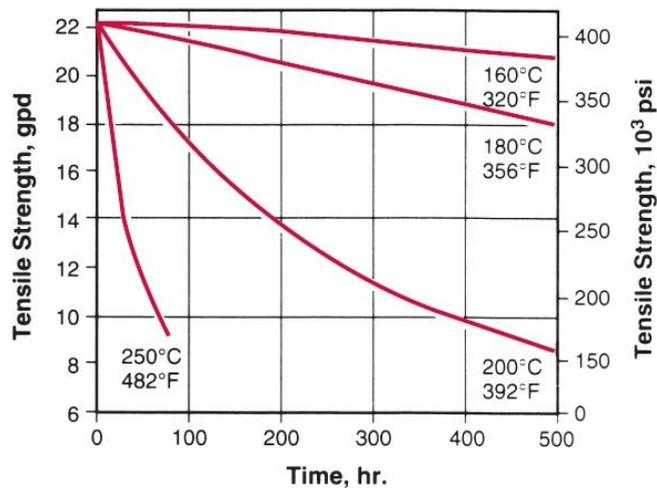


Figure 15 : Effet de l'élévation de la température sur la contrainte à rupture du Kevlar 29 en fonction du temps d'exposition [12].

2.3. Caractéristiques mécaniques

Bien que la section d'un fil ne soit pas réellement circulaire lorsqu'il est sollicité dynamiquement au sein d'une structure tissée, ce phénomène d'alignement permet aussi de considérer ces fils techniques en tant qu'isotrope transverse [13-16] à savoir que leur comportement mécanique est identique dans toutes les directions situées dans le plan de la section mais différent de celui-ci suivant l'axe des filaments et donc du fil. Avec l'approximation, à vitesse de déformation constante, d'un comportement élastique linéaire du fil [17, 18], il est possible de décrire la déformation qu'il subit en fonction de la contrainte qui lui est appliquée en fonction de la matrice d'élasticité simplifiée, comme définie par l'équation (1) [14] ci-dessous :

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{12} \end{Bmatrix} = \frac{1}{S_{\text{fil}}} \cdot \begin{bmatrix} \frac{1}{E_{11}} & -\frac{\nu_{12}}{E_{22}} & -\frac{\nu_{13}}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{12}}{E_{11}} & \frac{1}{E_{22}} & -\frac{\nu_{23}}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_{13}}{E_{11}} & -\frac{\nu_{23}}{E_{22}} & \frac{1}{E_{33}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2.G_{13}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2.G_{13}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-\nu_{12}}{E_{11}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_{11} \\ F_{22} \\ F_{33} \\ F_{23} \\ F_{13} \\ F_{12} \end{Bmatrix} \quad (1)$$

Avec ε_{ij} les coordonnées du vecteur de déformation du fil, F_{ij} les coordonnées du vecteur de force appliquée au fil, i et j les abscisses et ordonnées des plans dans lesquels se projettent les vecteurs associés, S_{fil} la surface transverse du fil, E_{11} le module de rigidité axial du fil, $E_{22} = E_{33}$ le module de rigidité transversal du fil, $G_{12} = G_{13} = G_{23}$ les modules de cisaillement du fil, et $\nu_{12} = \nu_{23}$ les coefficients de Poisson du fil.

Le comportement mécanique des tissus que composent ces fils dépend de nombreux paramètres qui interviennent à trois niveaux structurels :

- Le premier à l'échelle macroscopique du tissu, où le comportement mécanique de la structure dépend de la présence ou non d'entrecroisements de fils, des densités de fils de chaîne et de trame, de l'architecture, du nombre de couches internes et de la présence ou non d'une enduction.
- Le second, à l'échelle mésoscopique du fil, où celui-ci dépend des frottements inter-fils, de leur torsion et du nombre de filaments dont ils se composent.
- Enfin, le troisième, à l'échelle microscopique du filament, où il dépend de la densité linéaire du filament ainsi que de sa nature chimique (Figure 16).

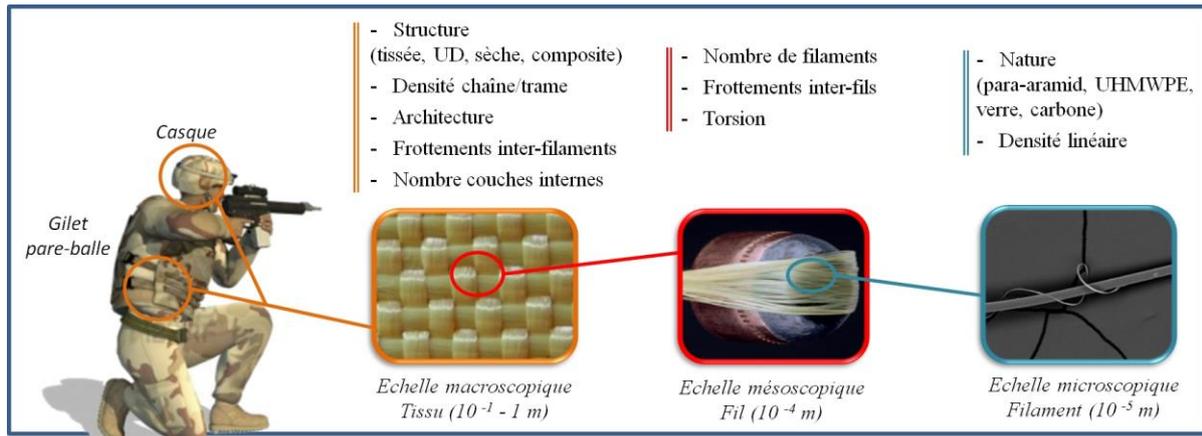


Figure 16 : Décomposition d'un tissu sous trois niveaux structurels auxquels sont associés les paramètres influents respectif.

3. Problématique identifiée

L'amélioration du processus de conception et d'optimisation des protections balistiques nécessitent aujourd'hui le développement d'outils numériques permettant un pré-dimensionnement de la structure. Ce pré-dimensionnement numérique permettra de diminuer le nombre d'essais expérimentaux nécessaires à la recherche de nouvelles solutions et ainsi de diminuer les coûts et délais. La réalisation de simulations numériques d'impact nécessitent alors de décrire le comportement et la rupture des matériaux dans des conditions extrêmes, notamment de vitesses de déformation. Il est donc indispensable d'identifier des modèles permettant de retranscrire numériquement la réponse mécanique des matériaux.

Dans les différents matériaux utilisés en protection, de nombreuses études ont déjà été réalisées sur le comportement mécanique des matériaux métalliques. Leur rigidité et leur homogénéité en font des matériaux simples à manipuler et à tester.

Concernant les matériaux fibreux techniques, en plus de leur récente découverte, peu d'études sur leur comportement mécanique en sollicitation dynamique ont encore pu être apportées. En effet, ces matériaux sont à la fois souples, hétérogènes et sans résistance en compression longitudinale ce qui en font des matériaux difficiles à étudier et à caractériser avec les dispositifs expérimentaux existants.

Aussi, le comportement mécanique d'une structure tissée dépend, en plus des paramètres liés à l'échelle macroscopique, des paramètres de chaque filament contenu dans chaque fil qui la compose.

La description du comportement mécanique de ces matériaux est donc complexe et dépend de l'échelle à laquelle on souhaite décrire le matériau. Plus on se rapproche de l'échelle du filament et plus on va chercher à décrire des phénomènes élémentaires. Le choix de l'échelle à laquelle le comportement du matériau sera décrit dépend notamment du niveau de description de la simulation numérique. Dans le cadre de la simulation d'un impact sur un matériau fibreux, on s'intéressera soit au tissu directement (comportement homogénéisé) soit au fil (description du tissage ou fils dans la matrice organique).

Une étude à l'échelle microscopique peut apporter un éclairage supplémentaire afin de dissocier l'influence de chaque échelle. L'étude du comportement mécanique du matériau fibreux sous sa forme filaire devient alors un bon compromis entre une description macroscopique du comportement du matériau et une description plus fine des mécanismes de déformation.

Tout au long de ce rapport, nous cherchons ainsi à identifier le comportement mécanique longitudinal d'un fil en sollicitation dynamique. Cette sollicitation uniaxiale permet idéalement d'évincer toutes les composantes des vecteurs de force et d'allongement suivant les axes autres que

3. Problématique identifiée

celui représentant l'axe du fil. De ce fait, à vitesse de déformation constante, l'expression de son comportement mécanique se simplifie et peut s'écrire sous la forme suivante :

$$F_{11} = (S_{fil} \cdot E_{11}) \cdot \varepsilon_{11} \quad (2)$$

Avec F_{11} la force axiale appliquée à l'extrémité du fil et ε_{11} l'allongement axiale subit par le fil durant l'essai.

A ce jour, il existe des dispositifs expérimentaux permettant de caractériser le comportement mécanique de matériaux rigides à de hautes vitesses de sollicitation. Afin de s'élargir à l'étude de matériaux souples comme les fils, ces dispositifs nécessitent néanmoins de nombreuses adaptations qui restent difficile à mettre en place.

C'est pourquoi Cong HA MINH [19] a réalisé durant ses travaux de thèse des essais de traction dynamique sur des fils d'aramide à l'aide d'un tout nouveau dispositif expérimental (Figure 17 (a) et (b)). Celui-ci n'est cependant pas optimal est présente de nombreux inconvénients comme le système d'attache par des nœuds autour de tiges métalliques qui représente des concentrations de contrainte lors des essais réalisés (Figure 17 (c)).

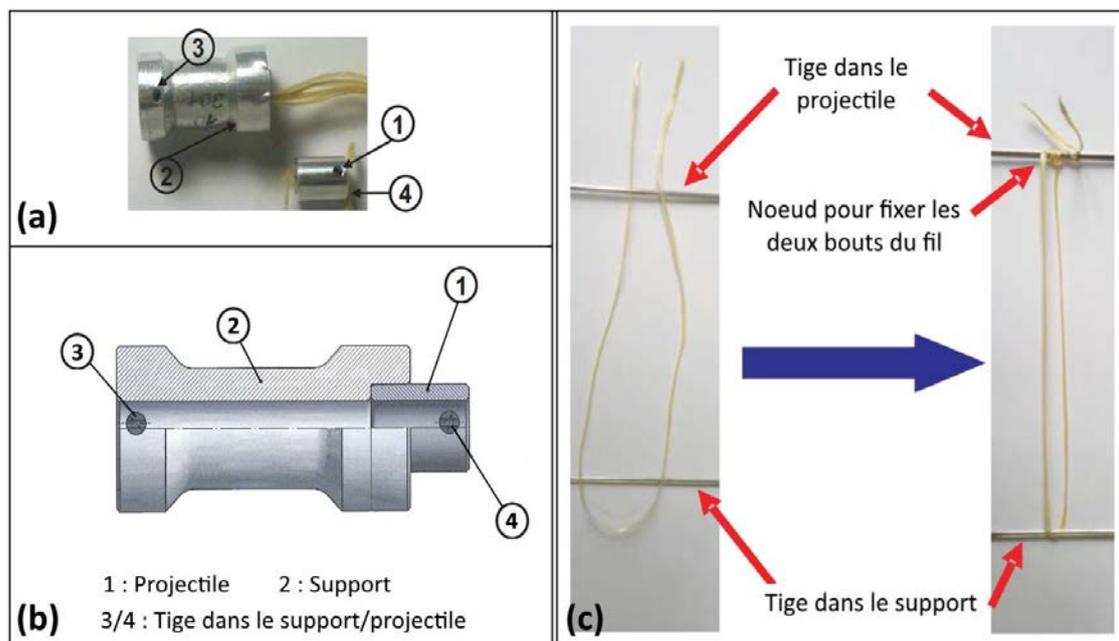


Figure 17 : (a) Photo et (b) schéma du système support/projectile. (c) Illustration de l'enroulement du fil autour des tiges présentes dans le support et le projectile [19].

Malgré les désavantages de ce dispositif, celui-ci permet d'obtenir des données expérimentales sur le comportement mécanique du fil en sollicitation dynamique (Tableau 3) qui, après avoir été intégrées dans un modèle numérique simulant un impact balistique sur une structure tissée, permet de se rapprocher du comportement mécanique expérimentale de la structure tissée lors d'un impact par rapport aux données quasi-statiques (Figure 18).

Etat	Module d'Young E (GPa)	Déformation à rupture ϵ_r (%)	Energie volumique de déformation critique W (J/cm ³)
Statique (0,03 s-1)	69,1 (\pm 3,8%)	3,7 (\pm 1,4%)	46,8
Dynamique (225 s-1)	214,6 (\pm 28%)	2,2 (\pm 14%)	49,8

Tableau 3: Comparaison des propriétés mécaniques du fil de Kevlar 129 entre l'état statique et l'état dynamique [19].

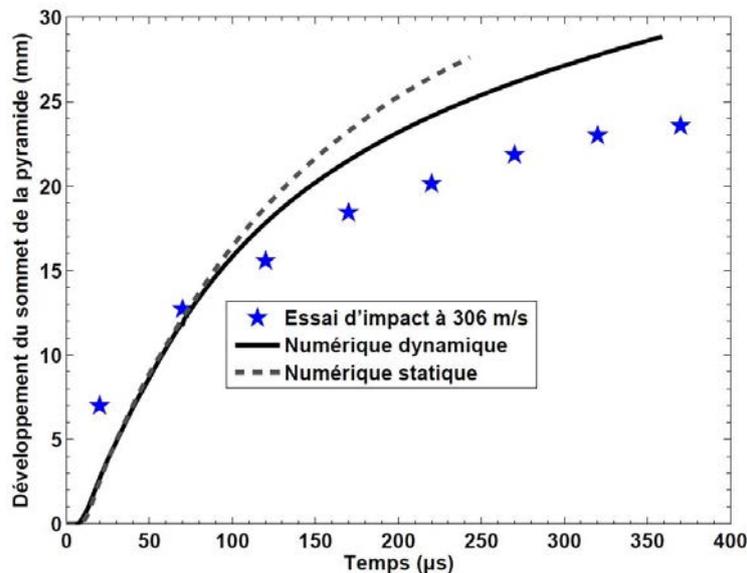


Figure 18 : Comparaison dans le cas d'impact non perforant sur le déplacement du sommet de la pyramide de déformation entre : les résultats expérimentaux, les résultats numériques en quasi-statique et les résultats numériques en dynamique [19].

Les travaux de thèse que rapporte ce mémoire s'inscrivent dans la continuité de ceux de Cong HA MINH [19]. Nous y proposons le développement de ce même dispositif expérimental afin d'obtenir une version optimisée et fonctionnelle de ce nouveau système de caractérisation du comportement mécanique du fil en sollicitation dynamique.

4. Démarche proposée

Ce rapport se découpe en trois chapitres :

Le chapitre I décrit dans un premier temps le comportement mécanique des fils utilisés dans le domaine balistique, en sollicitation quasi-statique et dynamique, l'influence de certains paramètres sur celui-ci ainsi que les modes de rupture qui opèrent au sein du matériau suivant le type de sollicitation. En second lieu, il regroupe et définit les différents procédés expérimentaux existants pour tester un fil balistique en sollicitation quasi-statique ou dynamique, seul ou dans sa structure tissée. Il y est décrit le fonctionnement de chaque dispositif et les mécanismes mis en œuvre lors d'un essai. Enfin, nous y retrouvons les résultats que ces procédés expérimentaux nous apportent ainsi que leurs limites. Ce sont ces limites qui nous mènent vers le développement d'un nouveau dispositif expérimental.

Le chapitre II porte sur le nouveau banc d'essais développé tout au long de ces travaux de recherche. Une première partie traite du dispositif expérimental. Le fonctionnement de celui-ci y est décrit ainsi que sa version d'origine et les raisons qui nous ont poussé à la modifier jusqu'à sa version optimale, en passant par les différentes étapes d'optimisation. Cette partie définit également les conditions d'étude dans lesquelles se déroule chaque essai. Une seconde partie traite du système de mesure du signal et du traitement des données. Une description respective y est détaillée ainsi que leur mode de validation.

Le chapitre III traite des différents résultats obtenus grâce au nouveau dispositif expérimental décrit dans le chapitre précédent. Nous y retrouvons une étude du comportement mécanique du fil testé seul par rapport à la vitesse de sollicitation appliquée ainsi qu'une étude du comportement mécanique du fil testé dans sa structure tissée en identifiant les effets de plusieurs paramètres liés au tissage.

La conclusion permet de rappeler les raisons du nouveau dispositif expérimental de test de fils balistiques et des résultats obtenus. Les avantages que nous apporte ce procédé ainsi que ses limites seront discutés pour proposer des pistes d'amélioration pour de futurs développements.

CHAPITRE I : ETAT DE L'ART _ ETUDE DU COMPOTEMENT MECANIQUE D'UN FIL BALISTIQUE EN TRACTION QUASI-STATIQUE ET DYNAMIQUE

Sommaire

I.1. Comportement mécanique de fils balistiques en traction.....	34
I.1.1. Comportement quasi-statique du fil.....	34
I.1.1.1. Description du comportement mécanique.....	34
I.1.1.2. Influence de la longueur du fil.....	35
I.1.1.3. Influence de la torsion du fil.....	35
I.1.1.4. Modes de rupture du fil en fonction de la température.....	36
I.1.2. Comportement dynamique du fil.....	38
I.1.2.1. Description du comportement mécanique.....	38
I.1.2.2. Mode de rupture du fil en fonction de la vitesse de déformation.....	40
I.2. Moyens d'essai de traction sur fils.....	41
I.2.1. Essais de traction sur fil seul.....	42
I.2.1.1. Moyen quasi-statique : Dispositif de traction uniaxiale.....	42
I.2.1.2. Moyens dynamiques : le SHTB et le dispositif de tirs transverses.....	44
I.2.2. Essais de traction sur fil dans sa structure tissée.....	63
I.2.2.1. Moyen quasi-statique: Yarn pull-out test.....	63
I.2.2.2. Moyen dynamique: Yarn pull-out test.....	68
CONCLUSION.....	71

Plusieurs dispositifs expérimentaux ont été développés dans le but de caractériser le comportement mécanique des fils qui composent les tissus balistiques. En effet, qu'ils soient vierges ou dans leur structure tissée, leurs propriétés dépendent de nombreux paramètres mécaniques et matériaux. Les essais réalisés sur ces fils nous permettent d'enrichir notre compréhension des phénomènes d'élongation et de rupture qui y ont lieu.

I.1. Comportement mécanique de fils balistiques en traction

De nombreuses recherches sur le comportement mécanique de fils balistiques soumis à un effort de traction uniaxiale ont été réalisées et ont permis de déterminer une dépendance du comportement mécanique de ces fils à la vitesse de déformation [13, 14, 16, 20-22].

I.1.1. Comportement quasi-statique du fil

1.1.1.1. Description du comportement mécanique

A de faibles vitesses de déformation en traction, les fils balistiques ont un comportement élastique linéaire après réaligement des filaments entre eux jusqu'à rupture [23] (Figure 1.).

Concernant les fils balistiques composés de fibres d'aramide, il en existe plusieurs types qui diffèrent de par leur degré de cristallinité [24]. De ce fait, leurs caractéristiques mécaniques peuvent varier (voir § 2.2. du chapitre Introduction).

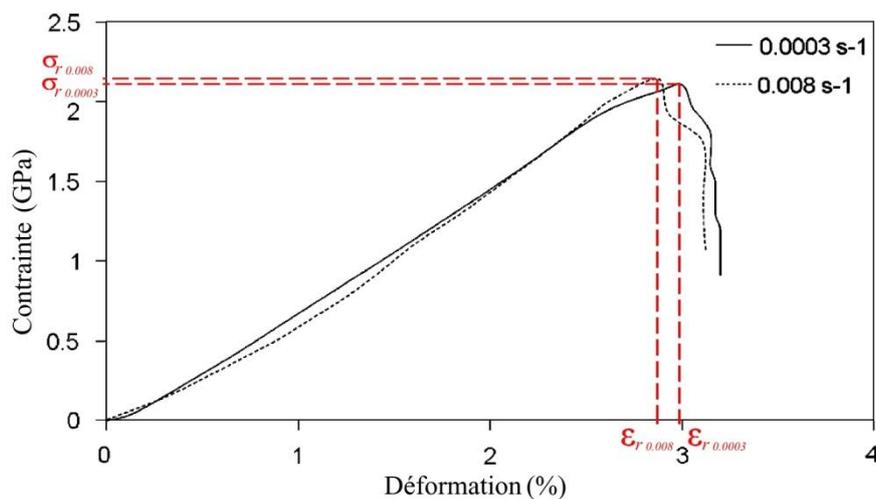


Figure 1.1 : Courbe de contrainte-déformation d'un fil d'aramide (Twaron_1100 dTex) en sollicitation quasi-statique ($3 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ et $8 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$) [23].

Les courbes de traction quasi-statique nous indiquent alors une contrainte à rupture du fil d'aramide variant entre 2,2 et 3,3 GPa et une élongation à rupture variant entre 2,5 et 4%. Ainsi, grâce à son comportement Hookéen, il est possible de déterminer le module d'Young du fil d'aramide qui se trouve entre 70 et 112 GPa.

1.1.1.2. Influence de la longueur du fil

Le comportement mécanique du fil dépend de celui de chaque filament qui le compose ainsi que des défauts de structure présents aléatoirement à l'échelle macromoléculaire.

Les défauts peuvent apparaître lors du processus de polymérisation. Une copolymérisation à arrangement aléatoire donnera lieu à des défauts dans la structure macromoléculaire à l'inverse d'une copolymérisation alternée ou à blocs. Un contrôle soigneux est donc nécessaire lors de ce processus afin d'éviter au mieux une mauvaise jonction entre deux monomères. Le poly-aramide, par exemple, se forme grâce à la copolymérisation alternée de deux monomères, mais sans contrôle rigoureusement suivi, des défauts pourraient apparaître dans sa structure. De même, lors d'une homopolymérisation (polymérisation avec un seul monomère), des assemblages dit « tête-à-queue » assurent une régularité dans la structure macromoléculaire à l'inverse des assemblages dit « tête-à-tête » ou « queue-à-queue » qui génèrent des défauts dans la chaîne [25].

Les recherches [17, 26-29] menées à l'échelle du filament indiquent qu'en deçà d'une longueur de 10 mm, la contrainte à rupture du filament d'aramide augmente avec une diminution de sa longueur. Au-delà, la probabilité de présence de ces défauts dans la structure est plus importante et rend la contrainte à rupture du filament indépendante de sa longueur.

Tapie et al. [30] ont récemment démontré que cette indépendance de la contrainte à rupture par rapport à la longueur à l'échelle du filament se répercute à l'échelle du fil.

1.1.1.3. Influence de la torsion du fil

Des chercheurs ont étudié l'influence de la torsion du fil sur son comportement mécanique à la fois dans les sens longitudinal et transversal du fil.

D'après la Figure 1.2, nous pouvons constater que, jusqu'à une valeur dite optimale, la torsion apporte au fil une plus grande résistance mécanique. Ceci est dû à une meilleure coalition entre les filaments ce qui augmente les forces de frottement et permet ainsi au fil de mieux résister à la force de traction qu'il subit [24, 31-35]. Passée cette valeur optimale, la torsion devient trop importante et participe à la formation de zones de cisaillement dans le fil ce qui a pour effet de réduire sa résistance mécanique.

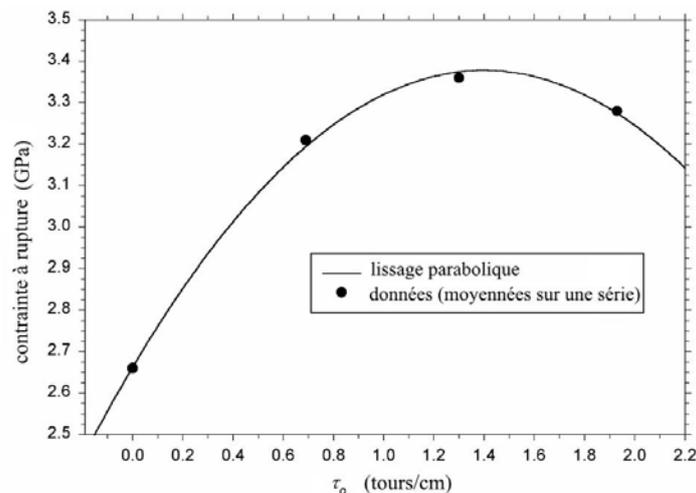


Figure 1.2 : Influence de la torsion du fil sur sa contrainte à rupture [24].

En sollicitation dans le sens transverse, la torsion du fil a également une influence sur ses performances balistiques. En effet, lors d'un impact balistique sur un tissu, plus l'information se propage rapidement le long des fils sollicités, plus il y a de matière pour freiner l'avancée du projectile, ce qui augmente ses performances balistiques.

Le Tableau 1.1 et la Figure 1.3 nous montrent qu'une augmentation de la torsion permet d'augmenter la propagation de l'onde transverse dans le fil jusqu'à un certain palier où la torsion a de moins en moins d'impact sur celle-ci.

Nombre de torsion (tours/inch)	Angle γ	Vitesse de propagation d'onde transverse U (m/s)	Vitesse normalisée de propagation d'onde transverse, U/U_0
0	19.7°	148.0	1
1/3	18.6°	157.5	1.064
2/3	17.6°	167.1	1.129
4/3	17.1°	172.3	1.164
8/3	16.5°	178.9	1.209

Tableau 1.1 : Variation de l'angle d'inclinaison γ du fil r/r au sens du fil et de la vitesse de propagation de l'onde transverse en fonction du nombre de torsion (tours/inch) affecté au fil testé [35].

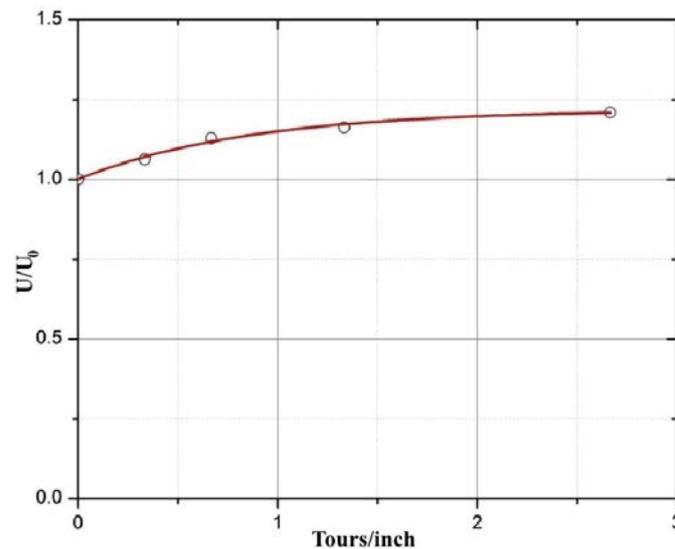


Figure 1.3: Variation de la vitesse normalisée de propagation de l'onde transverse dans le fil en fonction de sa torsion. [35].

I.1.1.4. Modes de rupture du fil en fonction de la température

Les filaments dont se compose chaque fil peuvent être soumis à différents modes de rupture suivant les conditions dans lesquelles le fil est sollicité (traction, compression, cisaillement). De plus, ces filaments possèdent une température de transition vitreuse (T_g) pouvant varier suivant leur nature (Tableau 1.2). Ainsi, suivant la température à laquelle le fil est soumis, soit une température inférieure ou supérieure à la T_g de ses filaments, les mécanismes de rupture subis au sein du fil diffèrent.

Polymère	Tg (°C)
Para-aramide (Kevlar)	170
UHMWPE (Dyneema)	-110
Polyamide-6,6 (Nylon)	52

Tableau 1.2: Température de transition vitreuse (Tg) des principaux polymères utilisés dans la conception de fils [36].

Trois modes de rupture ont pu être identifiés pour ce qui est de la famille des polymères [36] :

- Rupture suivant une contrainte de rupture fragile σ_f (« brittle fracture »)
- Rupture suivant une contrainte de fissuration σ_c (« crazing »)
- Rupture suivant une contrainte d'écoulement σ_y (« shear yielding »)

Ces trois types de rupture varient en fonction de la température, pour une sollicitation en traction sur un fil de nature polymérique à faible vitesse de déformation (Figure 1.4).

En phase I, état vitreux des polymères, les températures sont très inférieures à leurs températures de transition vitreuse. Le mode de rupture se matérialise alors sous forme de rupture fragile (σ_f) à l'échelle macroscopique. Ce phénomène est compréhensible car la faible température réduit fortement l'agitation macromoléculaire des chaînes polymériques ce qui les fige dans l'espace et leurs retire toute mobilité. Cela les rend alors « cassantes » lorsque l'on tend à les allonger par traction.

En phase II, les polymères sont toujours à l'état vitreux mais la température est plus élevée et les chaînes polymériques deviennent alors un peu plus mobiles entre elles et dans l'espace. Le phénomène de rupture qui intervient majoritairement dans cette phase se présente, à l'échelle microscopique, sous forme de craquelures (σ_c). Ces craquelures sont générées par des sollicitations mécaniques et par la présence de défauts dans la microstructure du matériau ce qui induit une augmentation locale des contraintes par effet de concentration et crée ainsi des zones de déformation plastique. Une force de traction se généralise ensuite sur toute la surface de ces zones de déformation. Elle initie alors la formation de microcavités qui dégénèrent en ellipsoïdes très étirées que l'on appelle craquelures [25].

En phase III, transition entre l'état vitreux et l'état caoutchoutique des polymères, le domaine de températures est plus élevé et comprend la température ambiante $T_{amb}=27^\circ\text{C}$ pour la plupart des polymères.

Les polymères cités ci-dessous (Tableau 1.2) sont des polymères semi-cristallins. Ils possèdent donc une phase cristalline dont les chaînes macromoléculaires forment des réseaux très organisés, ainsi qu'une phase amorphe dont les chaînes macromoléculaires sont enchevêtrées aléatoirement et peuvent plus ou moins se mouvoir en fonction de la température. La présence de cette phase amorphe explique l'existence d'une température de transition vitreuse Tg (Tableau 1.2). Passé cette température, les chaînes macromoléculaires des zones amorphes peuvent très facilement se mouvoir entre elles et le fil se trouve alors dans un état caoutchoutique. Plus la température est supérieure à la Tg du polymère, plus celui-ci tend à être visqueux.

L'état de la matière (vitreux, caoutchoutique et visqueux) dans lequel se trouve un polymère dépend de sa Tg ainsi que de sa nature (amorphe, semi-cristallin, cristallin), mais aussi de son taux de cristallinité. C'est pourquoi le PE, bien qu'à T_{amb} il soit dans un état caoutchoutique, possède une très bonne résistance mécanique prise en charge par les phases cristallines présentes dans le matériau à plus de 85%. [37-39]

A T_{amb} et en traction quasi-statique, le mode de rupture des fils de PE se fera alors principalement par allongement avec la formation de fibrilles. Pour les fils de para-aramide et de polyamide 6-6, leurs modes de ruptures peuvent être soit par craquelures, soit par allongement, suivant la température à laquelle nous nous situons, car la délimitation entre la phase II et la phase III n'est pas clairement définie.

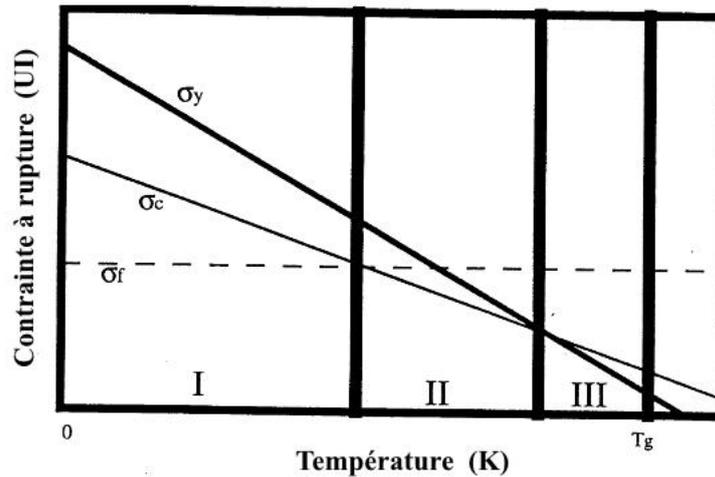


Figure 1.4: Diagramme des contraintes à la rupture fragile par cisaillement σ_f , par craquelures σ_c et par écoulement σ_y , en fonction de la température pour une sollicitation en traction sur le fil polymérique à faible vitesse de déformation [36].

I.1.2. Comportement dynamique du fil

I.1.2.1. Description du comportement mécanique

Aux hautes vitesses de déformation, le comportement mécanique de ces fils est supposé également élastique linéaire en traction uniaxiale (Figure 1.5).

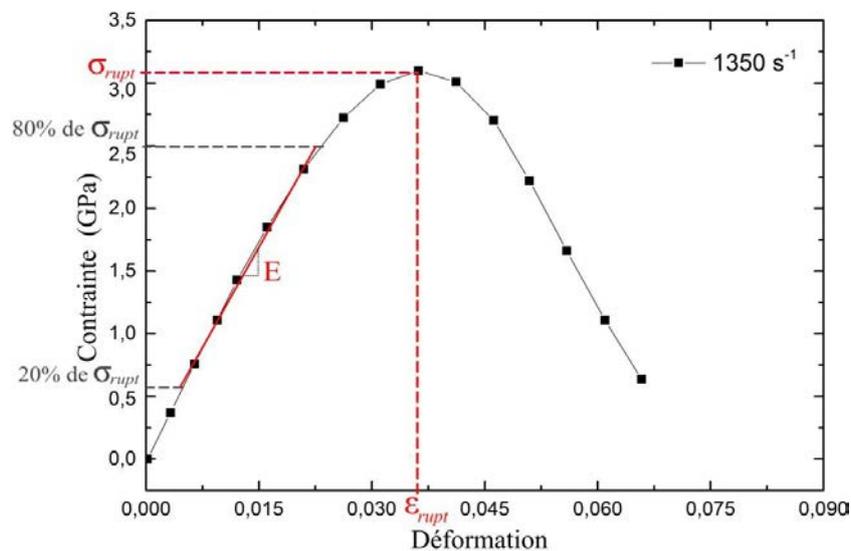


Figure 1.5: Courbe de contrainte-déformation d'un fil d'aramide (Kevlar 49) en sollicitation dynamique (1350 s^{-1}) [42].

Le comportement mécanique du fil dépend de celui de chaque filament qui le contient, des multiples interactions entre ces filaments, ainsi que des défauts qu'ils présentent. Bien que les recherches [17, 40, 41] effectuées à l'échelle du filament n'ont révélé aucun impact de la vitesse de sollicitation sur leur comportement mécanique, celles [23, 42-44] menées à l'échelle du fil dévoilent une dépendance linéaire des paramètres mécaniques du matériau tels que sa contrainte à rupture σ_r , sa déformation à rupture ϵ_r et son module d'Young axial E_{11} (Figure 1.6).

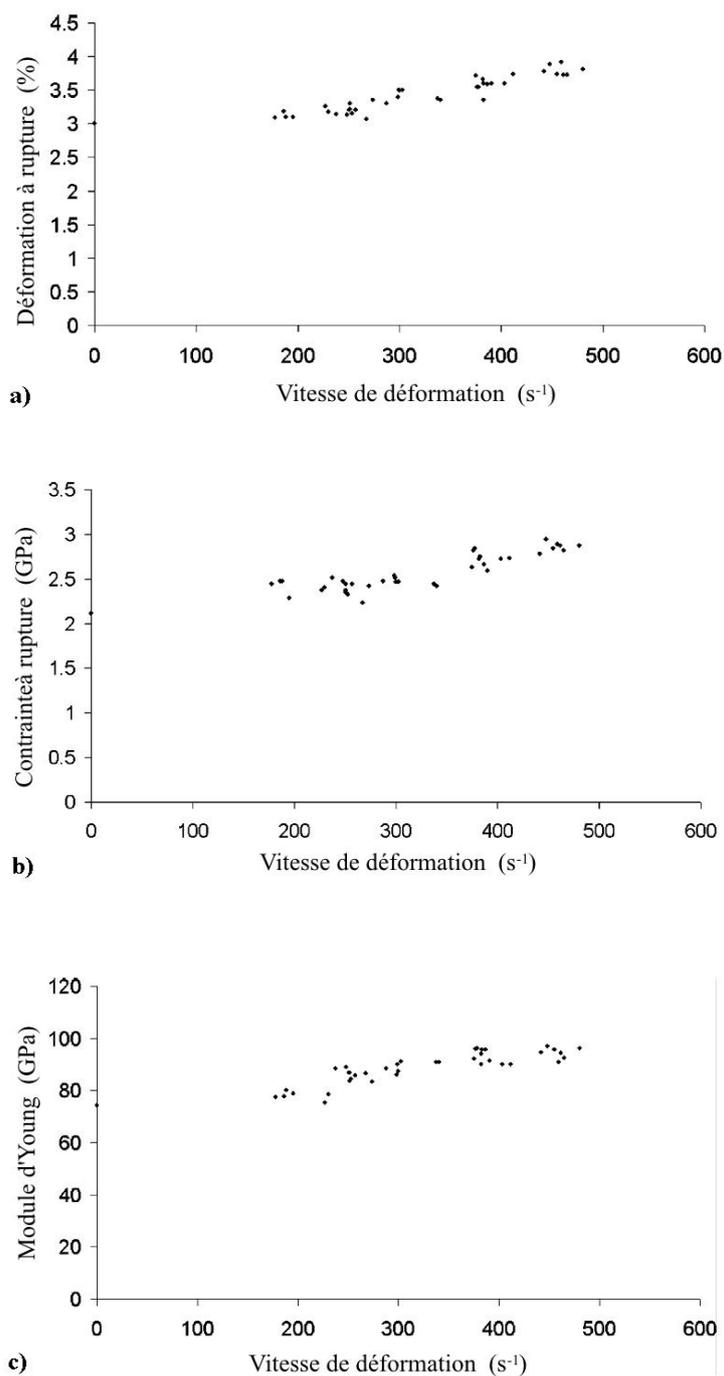


Figure 1.6 : Test de traction réalisés sur des fils de Twaron: a) déformation à rupture en fonction de la vitesse de déformation, b) contrainte à rupture en fonction de la vitesse de déformation, c) module d'Young en fonction de la vitesse de déformation [23].

I.1.2.2. Mode de rupture du fil en fonction de la vitesse de déformation

Tout comme la température (§I.1.1.4. Modes de rupture du fil en fonction de la température), la vitesse de déformation à laquelle est soumis le fil durant un essai de traction va avoir des répercussions sur les mécanismes de rupture ayant lieu au sein de chaque filament [37].

Shim et al. [36], Tan et al. [23] et Carr [38] définissent les états de sollicitation quasi-statique et dynamique en fonction des mécanismes de rupture qui ont lieu majoritairement au sein du fil testé.

Lors d'un essai de traction dit « quasi statique », les mécanismes de rupture des filaments qui prédominent au sein du fil testé sont les ruptures par élongation et fibrillation. En effet, pour la plupart des polymères, excepté l'UHMWPE [38], le mouvement des chaînes macromoléculaires entre elles est possible en un temps plus court que le temps représentatif de la sollicitation [37]. L'énergie totale fournie au fil est donc répartie sur une plage de temps suffisamment grande pour que son emmagasinement soit pris en charge par la rupture des liaisons secondaires présentes entre les chaînes macromoléculaires, types liaison de Van der Waals et liaisons hydrogène, et génère ensuite des glissements entre les chaînes macromoléculaires. Ceci explique la formation de fibrilles après élongation au niveau de la zone de rupture (Figure 1.7.a).

Lors d'un essai de traction dit « dynamique », le mode de rupture à l'échelle du fil est une rupture nette du fil sans allongement. On retrouve alors un comportement fragile du fil. Ici, l'énergie résultant de la sollicitation mécanique est fournie au fil en un temps très court, les chaînes macromoléculaires du polymère sont donc sollicitées très rapidement, à tel point que leur glissement entre elles n'a pas le temps de se faire. L'emmagasinement d'énergie est donc pris en charge par la rupture des liaisons interatomiques, dites primaires, au sein des chaînes polymériques. La rupture des liaisons secondaires a toujours lieu mais minoritairement par rapport à celle des liaisons primaires, ce qui explique la présence de fibrilles mais de longueur beaucoup plus courte et en très faible quantité (Figure 1.7.b).

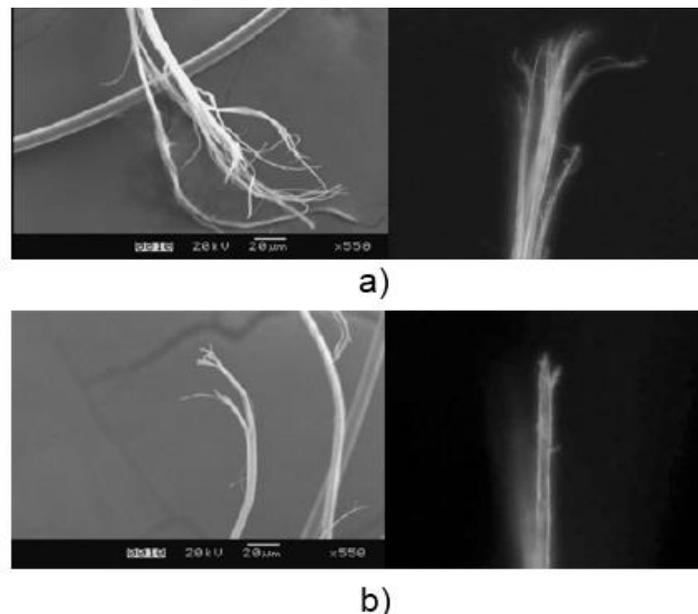


Figure 1.7 : Captures d'images au microscope SEM de la rupture d'un filament extrait d'un fil sollicité à [36, 23] :
a) faible vitesse de déformation ($\approx 200 \text{ s}^{-1}$) b) haute vitesse de déformation ($\approx 1000 \text{ s}^{-1}$).

La transition entre ces deux états de sollicitation dépend de la nature du matériau testé (para-aramide, UHMWPE, carbone, verre), de la structure fibreuse (filament, fil, structure tissée) et de la vitesse de déformation appliquée.

Pour une structure tissée constituée de fils de para-aramide, la transition entre les états de sollicitation quasi-statique et dynamique a lieu à une vitesse de déformation $\dot{\epsilon} = 400 \text{ s}^{-1}$ (Figure 1.8).

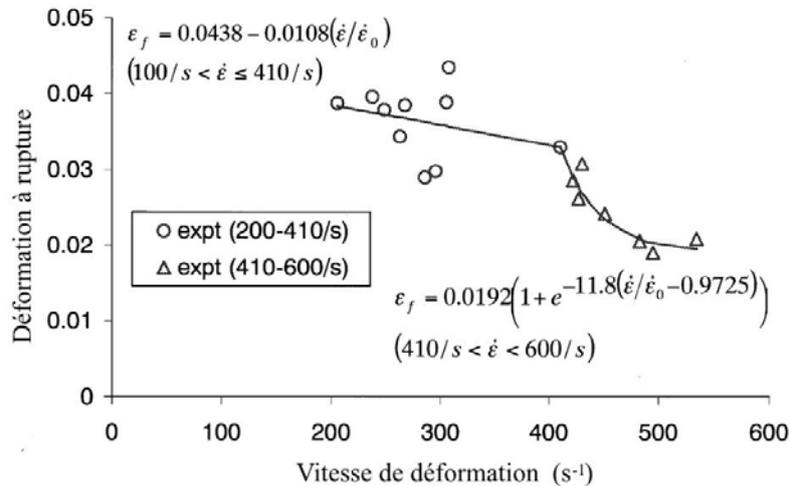


Figure 1.8 : Tests de traction réalisés sur des fils Twaron [36] _ Déformation à rupture en fonction de la vitesse de déformation.

Depuis plusieurs décennies, de nombreux chercheurs se sont penchés sur la caractérisation du comportement mécanique de fils balistiques ainsi que l'influence de paramètres mécaniques, tels que la vitesse de déformation, mais aussi de paramètres structuraux (longueur et masse linéique du fil, nombre de filaments, torsion) sur leurs performances balistiques. Ainsi, ces recherches nous apportent de nombreuses connaissances sur l'influence de ces paramètres mécaniques et structuraux.

Il existe différents moyens d'essais expérimentaux permettant d'extraire ces données dans des gammes de sollicitations quasi-statique, dynamique et intermédiaire. Nous les décrivons plus en détails dans la suite de ce chapitre en commençant par une rapide présentation de chaque dispositif suivi d'une description du déroulement de l'essai qui leur est associé ainsi que des résultats qui nous est possible d'extraire.

I.2. Moyens d'essai de traction sur fils

Il existe différents moyens d'essais expérimentaux permettant d'extraire les caractéristiques mécaniques d'un fil dans des gammes de sollicitations quasi-statique et dynamique. Dans cette deuxième partie de chapitre, deux catégories de dispositifs expérimentaux, permettant de caractériser le comportement mécanique d'un fil testé seul ou au sein de sa structure tissée, sont décrit.

I.2.1. Essais de traction sur fil seul

I.2.1.1. Moyen quasi-statique : Dispositif de traction uniaxiale

Description du dispositif :

Les premières caractérisations mécaniques de fils sur des machines de traction (type MTS ou Instron) se font depuis les années 50. Les vitesses de déformation appliquées vont de 10^{-3} à 10^{-1} s^{-1} . Ces machines permettent de mesurer de façon précise la force de traction appliquée le long du fil en fonction de la déformation que celui-ci subit à chaque instant lors de l'essai.

Les mors « classiques » utilisés comme systèmes d'attache pour des fils consistent en un pincement au bout de ses extrémités après avoir été tendu contre une partie arrondie du mors pour limiter les concentrations de contrainte durant l'essai (Figure 1.9). Pour des fils de faible résistance mécanique tels que des fils de laine ou de coton, ces mors sont adaptés et permettent d'obtenir une rupture du fil dans les normes, soit dans sa longueur utiles. Pour des fils de résistance mécanique plus élevée (contrainte à rupture $\sigma_r \approx 3 \text{ GPa}$) tels que des fils de para-aramide, de polyéthylène haut module ou de Vectran (Liquid Cristallin Polymer), ces mors ne sont plus adaptés. On observe alors un glissement des extrémités du fil. Ce simple maintien du fil ne suffit pas à contrer une résistance mécanique aussi élevée. L'état de surface de ces fils, constitués de long filaments de forme tubulaire et lisse, en comparaison avec des fils de coton, constitués de fibres discontinues de forme concave et rugueuse, et des fils de laine, constitués de fibres discontinues de forme tubulaire mais écailleuse, est plus amené à faciliter le glissement.



Figure 1.9: Illustration de mors classiques pour maintenir des fils sur machine de traction quasi-statique [45].

De ce fait, afin d'éviter tout glissement du fil lors de l'essai de traction et ainsi éviter de fausser les mesures, des mors dits « capstan » (Figure 1.10) sont utilisés. Le fil est enroulé plusieurs fois autour d'un cylindre avant d'être pincé à son extrémité. Le diamètre du cylindre doit être suffisamment grand pour empêcher la formation de plissures à la surface des filaments qui constituent le fil (Figure 1.11). Ces phénomènes sont alors sources de concentration de contrainte au sein du fil qui génère par la suite des amorces de rupture.

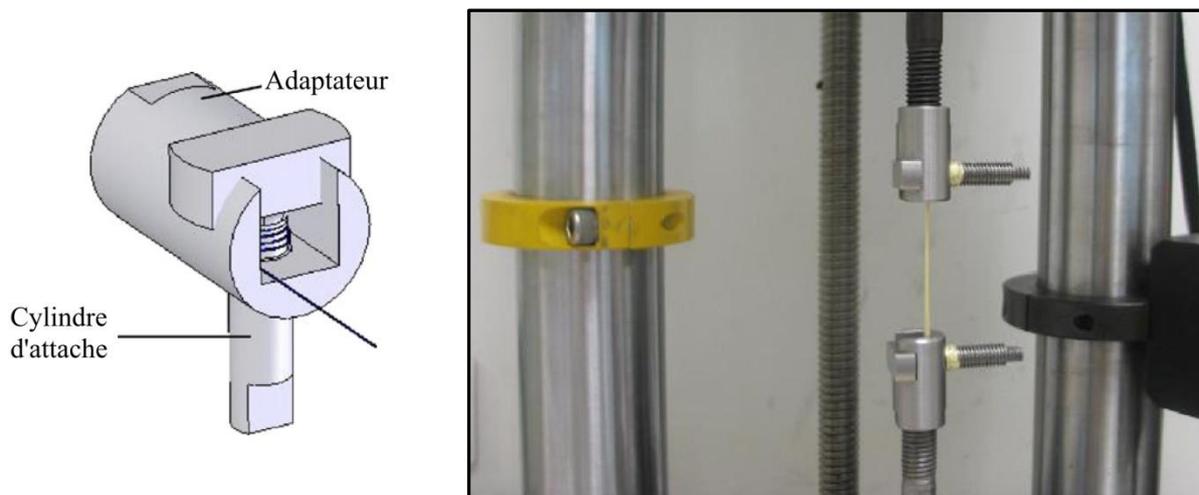


Figure 1.10 : Schéma (gauche) et photo (droite) du système d'attache Capstan. [23].

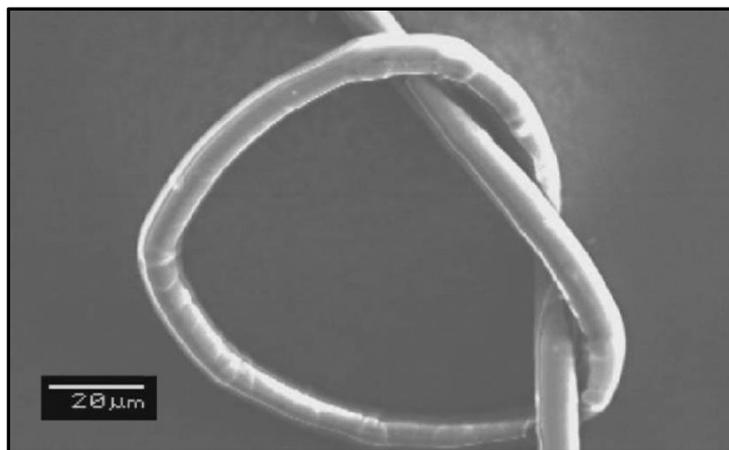


Figure 1.11: Formation de plissure à la surface d'un filament due à une courbure trop petite [23].

Les mors Capstan permettent ainsi de tester des fils de haute résistance mécanique sur des machines de traction uniaxiale en sollicitation quasi-statique et d'obtenir des courbes caractéristiques de leur comportement mécanique.

Exemple de résultats obtenus :

TAPIE et al. [30] ont étudié le comportement mécanique de fils d'aramide en leur appliquant une traction quasi-statique uniaxiale à l'aide d'une machine Instron. La Figure 1.12 représente la courbe de contrainte-déformation d'un fil d'aramide vierge comparée à celle d'un fil d'aramide extrait de sa structure tissée. On remarque alors que la contrainte appliquée sur le fil extrait ne commence à croître qu'après avoir atteint une déformation de 1%, contrairement à celle du fil vierge qui suit une augmentation linéaire dès le début de la sollicitation. Ceci est dû à l'ondulation du fil extrait de sa structure tissée qui reprend une forme linéaire par déformation élastique. Les fils vierge et extrait ont

respectivement des modules d'Young de 72,9 GPa et de 65,2 GPa, et des contraintes à rupture de 2,025 GPa et de 1,769 GPa. Cette diminution des caractéristiques mécaniques du fil extrait est due au procédé de tissage en plus des diverses manipulations que celui-ci a subit.

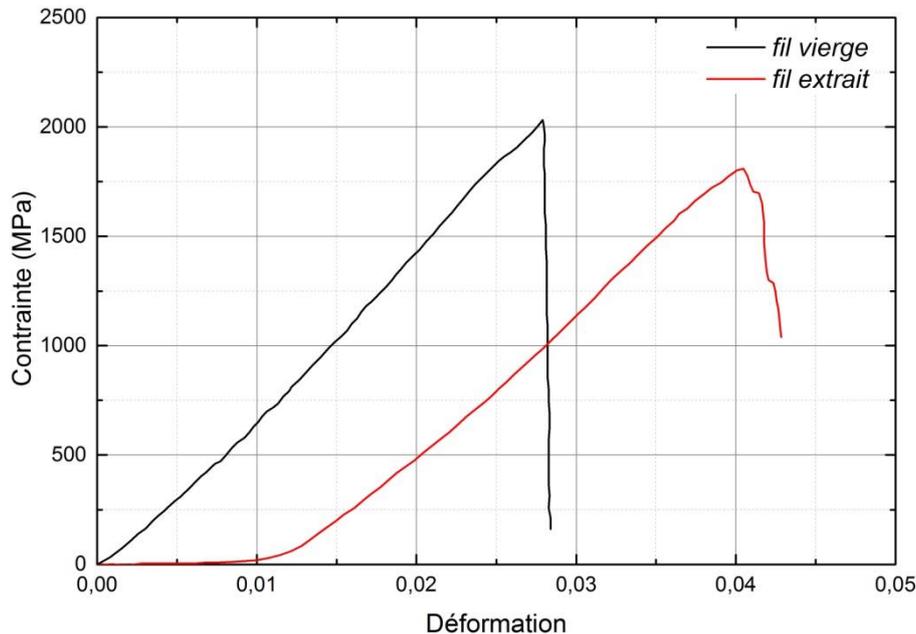


Figure 1.12: Essais de traction quasi-statique sur des fils d'aramides (Twaron T1040) de 250 mm, vierge et extrait d'une structure tissée [30].

1.2.1.2. Moyens dynamiques : le SHTB et le dispositif de tirs transverses

- Le Split Hopkinson Tension Bars

Description du dispositif :

Le dispositif de barres Hopkinson a été inventé en 1914 par Bertram Hopkinson et amélioré en 1949 par Herbert Kolsky [46]. Ce dispositif amélioré se décline en trois modèles servant chacun à appliquer une sollicitation spécifique : traction, compression et torsion. Le dispositif de barres Hopkinson est un des moyens les plus utilisés pour caractériser le comportement mécanique de nombreux matériaux solides à de hautes vitesses de sollicitations allant de 10^2 à 10^5 s⁻¹ [47].

Le dispositif qui nous intéresse dans ce chapitre est le dispositif de barres Hopkinson en traction, mis au point en 1960 [48]. Il se compose de deux barres, une barre entrante et une barre sortante, et d'un impacteur. Le principe est de générer une onde de traction grâce à la propulsion de l'impacteur contre l'enclume fixée au bout de la barre d'entrée. Celle-ci va se propager, par le biais des barres, dans l'échantillon à tester pour ainsi créer une déformation plastique qui sera mesurée grâce aux jauges de déformation placées sur les deux barres. La propulsion de l'impacteur contre l'enclume se fait à l'aide d'un canon à gaz (Figure 1.13) ou bien à l'aide d'un pendule (Figure 1.14), comme a pu l'expérimenter Yuan et al. [49].

L'onde propagée doit pouvoir générer une déformation jusqu'à rupture de l'échantillon tout en évitant d'atteindre une déformation plastique des barres. Cette condition est nécessaire pour éviter toutes déformations définitives des barres qui deviendraient non réutilisables. Le choix du matériau des barres est donc important. Son module d'Young doit être suffisamment élevé pour rester en déformation élastique durant chaque essai.

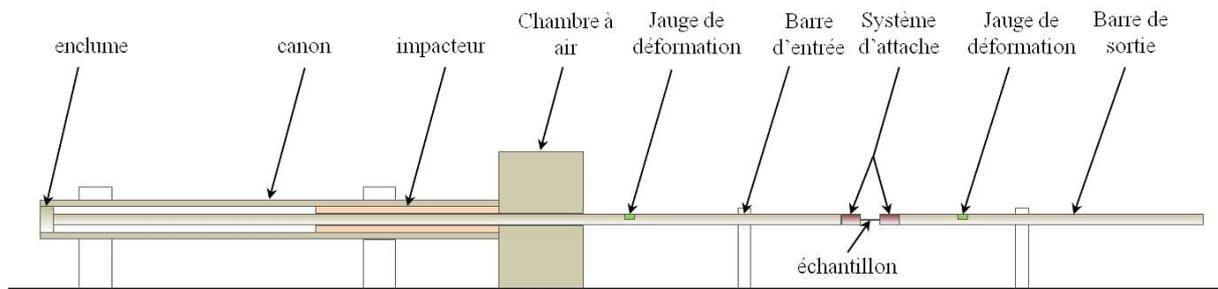


Figure 1.13: Schéma du dispositif de barres Hopkinson en traction avec comme propulseur un canon à gaz.

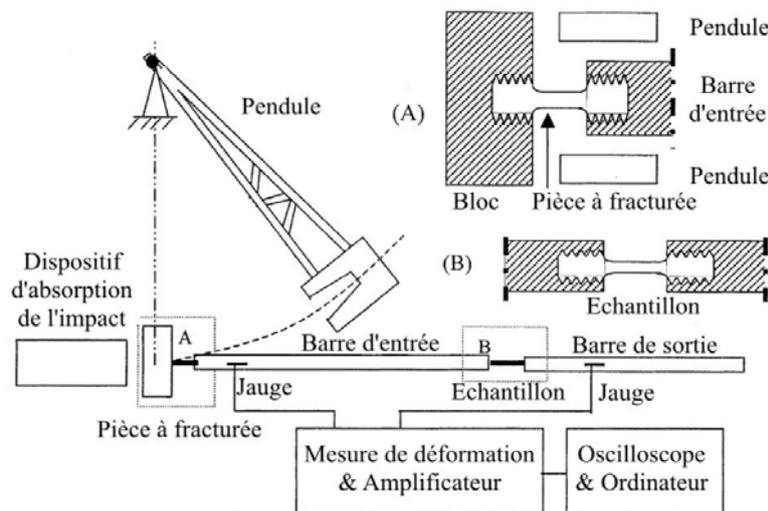


Figure 1.14: Schéma du dispositif de barres Hopkinson en traction avec comme propulseur un pendule [49].

De nombreuses études ont déjà été réalisées avec le dispositif de barres Hopkinson en traction sur des matériaux tels que l'acier, l'aluminium et certains polymères comme les résines époxy, le polyéthylène, le PMMA [18, 48-52]. Ces études sont nombreuses contrairement à celles menées sur des fils à usage technique tel que les fils de para-aramide [23, 42, 44, 53, 54], de PEHD [43] ou bien de verre [55, 56]. En effet, le maintien entre les barres Hopkinson de ces matériaux spécifiques est rendu plus complexe de par leur aspect souple et hétérogène [30]. Shim et al. [36] proposent en 2001 un système d'attache du fil aux extrémités des deux barres (Figure 1.15) en se basant sur le dispositif proposé par Chocron et al. [18] en 1997 dans le but de fixer un tissu composite dans le même dispositif de barres en traction. Ce système de maintien se compose d'une mousse en polyuréthane qui vient enrober le fil et dont l'utilité est double. Elle permet à la fois de conserver un bon maintien du fil à haute vitesse de sollicitation grâce au coefficient de frottement entre les deux polymères et de réduire les amorces de rupture du fil. Koh et al. [43] ont repris ce même procédé en identifiant et en corrigeant l'erreur de mesure provenant de la différence d'impédance entre le système d'attache et les barres de traction. En 2003, Bolduc et al. [53] proposent également un système d'attache du fil en combinant une partie métallique et une partie enrobée d'un polymère dans le même but de réduire les amorces de rupture dans le fil (Figure 1.16).

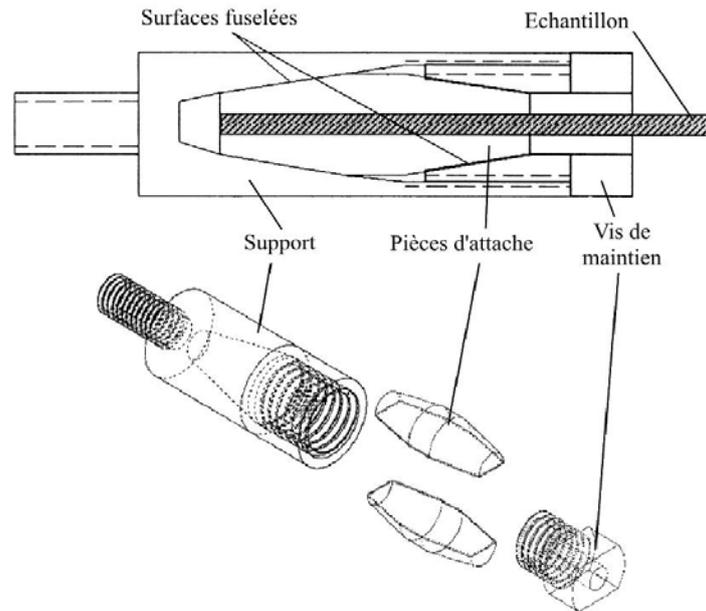


Figure 1.15: Schéma du système d'attache d'un fil sur des barres Hopkinson en traction proposé par Shim et al. [36]

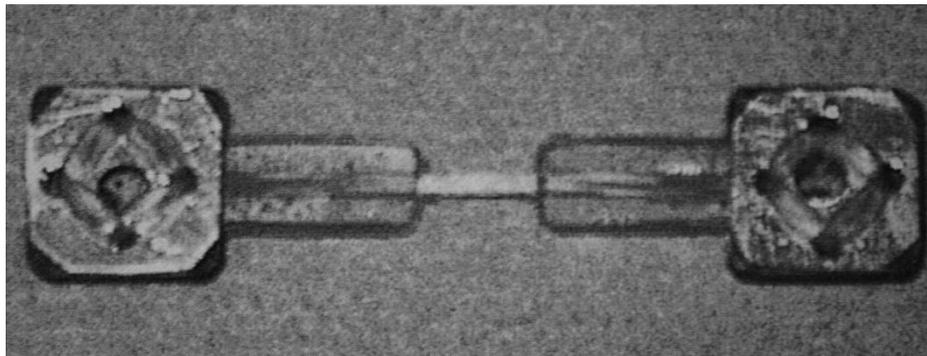


Figure 1.16: Schéma du dispositif d'attache d'un fil sur des barres Hopkinson en traction proposé par Bolduc et al. [53].

Le choix du design et du matériau du système d'attache du fil est important. Il permet d'éviter le glissement du fil ainsi que les amorces de rupture dans le fil. Il permet aussi de réduire au mieux les perturbations d'ondes lors de leurs passages entre les barres, le système d'attache et le fil. Plus l'onde passe au travers de changements de géométrie et de matériaux, plus sa propagation est perturbée ; ce qui rend difficile la réalisation d'essais de traction sur fil avec un dispositif de barres Hopkinson.

C'est pourquoi il est idéal de réaliser le système d'attache dans le même matériau que celui des barres entrante et sortante.

Description théorique de l'essai :

Le fonctionnement de l'essai repose sur le principe de propagation d'onde au travers des barres Hopkinson. La propulsion de l'impacteur contre la barre entrante (BE) grâce au canon à gaz va générer une force de traction dans la barre telle que, d'après la loi de conservation de la quantité de mouvement :

$$\overrightarrow{F_{imp \rightarrow BE}} \cdot \Delta t = m_{imp} \cdot \overrightarrow{v_{imp}} \quad (1.3)$$

Avec $\overrightarrow{F_{imp \rightarrow BE}}$ la force de compression exercée par l'impacteur sur la barre entrante, m_{imp} la masse de l'impacteur et $\overrightarrow{v_{imp}}$ sa vitesse.

Δt correspond à la durée de l'onde générée par l'impact. Elle dépend de la longueur de l'impacteur ainsi que de la vitesse de propagation d'onde dans la barre entrante (Figure 1.17).

L'étape n°1 correspond à la propulsion de l'impacteur le long de la barre entrante jusqu'à entrer en contact à $t=0$ avec l'enclume rattachée au bout de la barre (étape n°2). Dès ce moment-là, une onde de compression (en rouge) se propage dans l'impacteur tandis qu'une onde de traction (en vert) se propage dans la barre entrante (étape n°3). Une fois que l'onde de compression s'est propagée jusqu'au bout de l'impacteur (étape n°4), elle se reflète et continue à se propager dans le sens inverse. Tant que l'onde de compression est présente dans l'impacteur, celui-ci reste en contact avec l'enclume et l'onde de traction continue à se former dans la barre entrante (étape n°5). A l'étape n°6, l'onde de compression a réalisé un aller-retour dans l'impacteur. L'onde de traction dans la barre entrante a ainsi parcourue une distance égale à deux fois la longueur de l'impacteur. Enfin, l'équilibre étant revenu dans l'impacteur, celui-ci se décolle de l'enclume et l'onde de traction d'une longueur $\Delta L = 2 \cdot L_{imp}$ continue à se propager dans la barre entrante (étape n°7).

Nous avons alors :

$$\Delta t = \frac{\Delta L}{c_{BE}} = \frac{2 \cdot L_{imp}}{c_{BE}} \quad (1.4)$$

Avec L_{imp} la longueur de l'impacteur et c_{BE} la vitesse de propagation d'onde dans la barre entrante.

La propagation d'onde étant considérée comme longitudinale, la vitesse c_{BE} s'écrit :

$$c_{BE} = \sqrt{\frac{E_{BE}}{\rho_{BE}}} \quad (1.5)$$

Avec E_{BE} le module d'Young de la barre entrante et ρ_{BE} sa masse volumique.

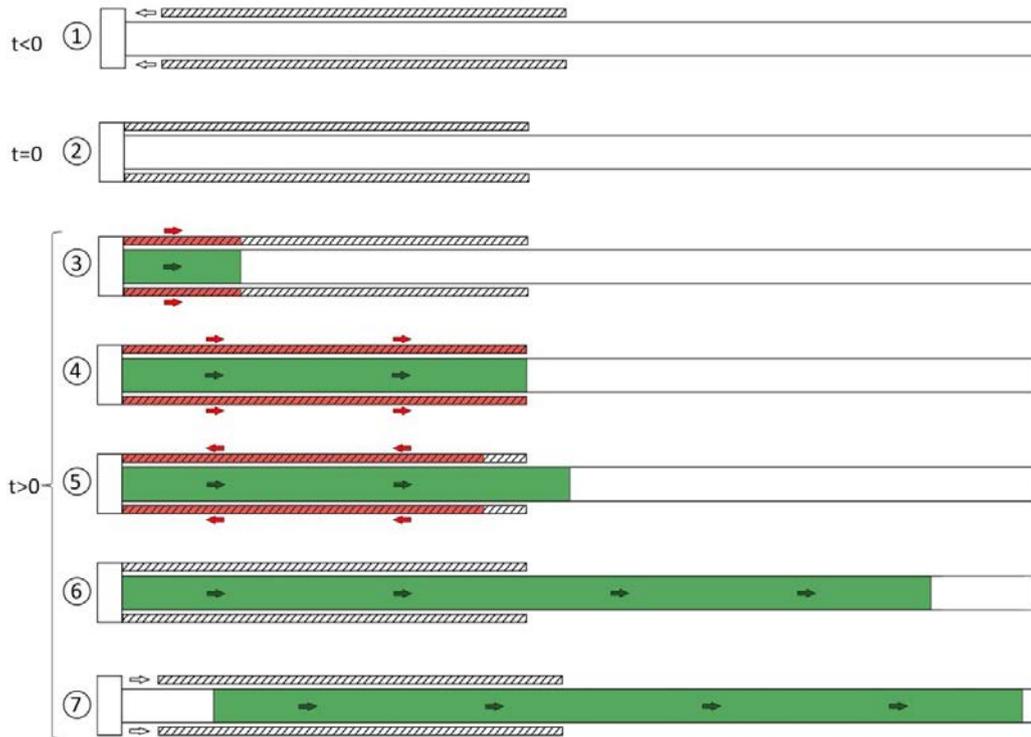


Figure 1.17 : Représentation schématique de la création de l'onde incidente dans la barre entrante suivant plusieurs étapes.

En combinant les formules (1.3) et (1.4) avec les formules suivantes :

$$F_{imp \rightarrow BE} = \sigma_{imp \rightarrow BE} \cdot S_{BE} \quad (1.6)$$

$$m_{imp} = \rho_{imp} \cdot S_{imp} \cdot L_{imp} \quad (1.7)$$

Avec S_{BE} la surface transverse de la barre entrante, ρ_{imp} , S_{imp} et L_{imp} la masse volumique, la surface transverse et la longueur respectives de l'impacteur.

Il nous est possible de calculer la contrainte appliquée par l'impacteur sur la barre entrante, et donc la contrainte de traction appliquée sur le fil par la barre entrante, suivant la formule :

$$\sigma_{imp \rightarrow BE} = \sigma_{BE \rightarrow fil} = \frac{1}{2} \cdot \frac{S_{imp}}{S_{BE}} \cdot \rho_{imp} \cdot c_{BE} \cdot v_{imp} \quad (1.8)$$

L'onde de traction générée par la propulsion de l'impacteur contre la barre entrante est appelée « onde incidente $\varepsilon_i(t)$ ». Cette onde se propage le long de la barre entrante jusqu'à son extrémité où se présente une première interface barre entrante/fil. Lorsque l'onde incidente arrive au niveau de cette interface, elle se divise en deux ondes : une onde réfléchie $\varepsilon_r(t)$ qui se propage dans la barre entrante en sens inverse de l'onde incidente et une onde transmise $\varepsilon_t(t)$ qui se propage dans le fil (Figure 1.18).

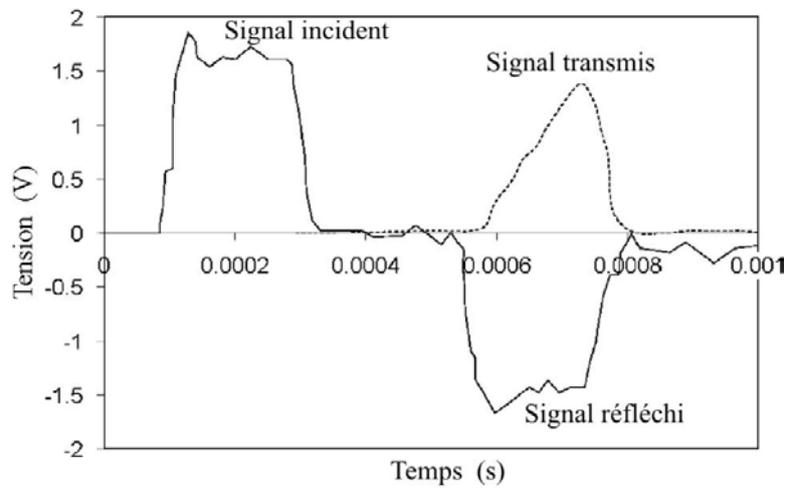


Figure 1.18 : Courbe de tension en fonction du temps des ondes incidente (ϵ_i), réfléchi (ϵ_r) et transmise (ϵ_t) pour un essai de traction sur barres Hopkinson. [23].

Au sein du fil, cette contrainte de traction uniaxiale va générer une onde longitudinale qui va se propager d'une section de fil à une autre (Figure 1.19) à une vitesse c_{fil} dépendant du module d'Young et de la masse volumique du fil [20] :

$$c_{fil}(\epsilon) = \sqrt{\frac{E(\epsilon)}{\rho}} \quad (1.9)$$

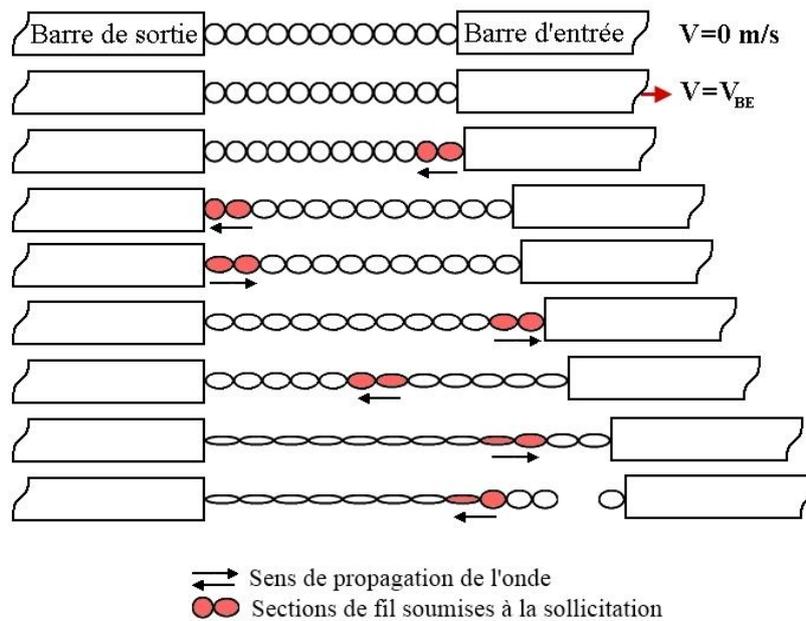


Figure 1.19: Représentation schématique d'une propagation d'onde longitudinale le long d'un fil lors d'une traction uniaxiale [19].

Après un certain temps t , l'onde de traction aura parcouru le long du fil, *en partant du projectile vers l'extrémité fixe*, une distance $l = c_{fil} \cdot t$ (Figure 1.20). Durant ce même temps t , l'extrémité rattachée au projectile aura subi une élongation de longueur $\Delta l = V_{BE} \cdot t$ [20, 57].

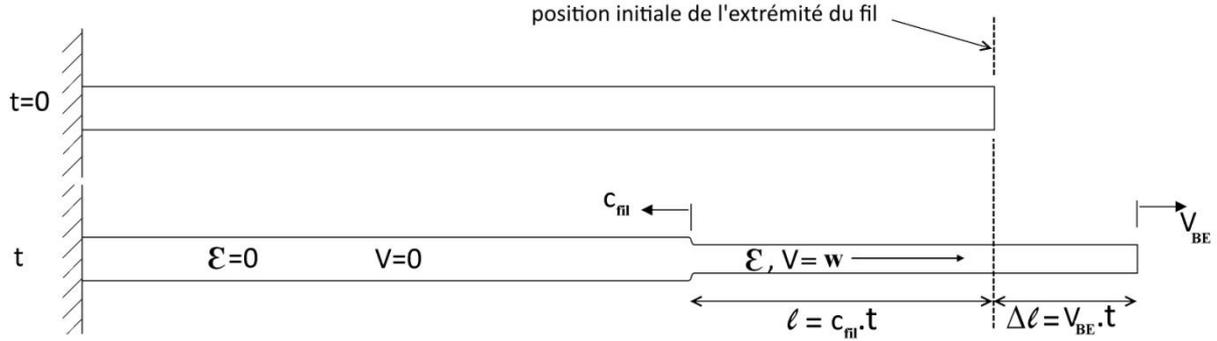


Figure 1.20 : Schéma de propagation d'onde longitudinale dans un fil soumis à la traction d'un projectile [57].

La déformation ε du fil qui en résulte se définit alors comme étant le rapport de l'élongation Δl sur la longueur initiale de fil déformée l :

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} = \frac{V_{BE} \cdot t}{c_{fil} \cdot t} = \frac{V_{BE}}{c_{fil}} = V_{BE} \sqrt{\frac{\rho}{E(\varepsilon)}} \quad (1.10)$$

Avec comme contrainte σ associée :

$$\sigma(\varepsilon) = E(\varepsilon) \cdot \varepsilon = V_{BE} \sqrt{\rho \cdot E(\varepsilon)} \quad (1.11)$$

Après le passage de l'onde, la matière présente dans le fil acquiert une vitesse particulière w , correspondant également à la vitesse imposée par la barre entrante à l'extrémité du fil. Cette vitesse particulière est dépendante de c_{fil} telle que [20, 58]:

$$w = \int_0^{\varepsilon_0} c_{fil}(\varepsilon) \cdot d\varepsilon = \int_0^{\varepsilon_0} \sqrt{\frac{1}{\rho} \left(\frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right)} \cdot d\varepsilon = V_{BE} \quad (1.12)$$

ε_0 étant la déformation maximale générée par le passage de l'onde de traction.

Nilakantan et al. [59] ont reproduit numériquement l'expérience d'un fil homogène de para-aramide ($\rho=1440 \text{ kg/m}^3$, $E_x=89 \text{ GPa}$, $\varepsilon_r=3,1\%$) et de longueur 50 mm soumis à une traction uniaxiale à l'une de ses extrémités par un projectile allant à une vitesse constante de 20 m/s, et dont l'autre extrémité est fixe.

On peut alors observer ce phénomène de propagation d'onde qui se déroule le long du fil. Au passage de l'onde à chaque extrémité du fil, celle-ci se réfléchit et voit l'information qu'elle transporte se dupliquer (Figure 1.21). Ce phénomène est dû à la présence d'un support fixe à chaque extrémité (Figure 1.22) [60, 61].

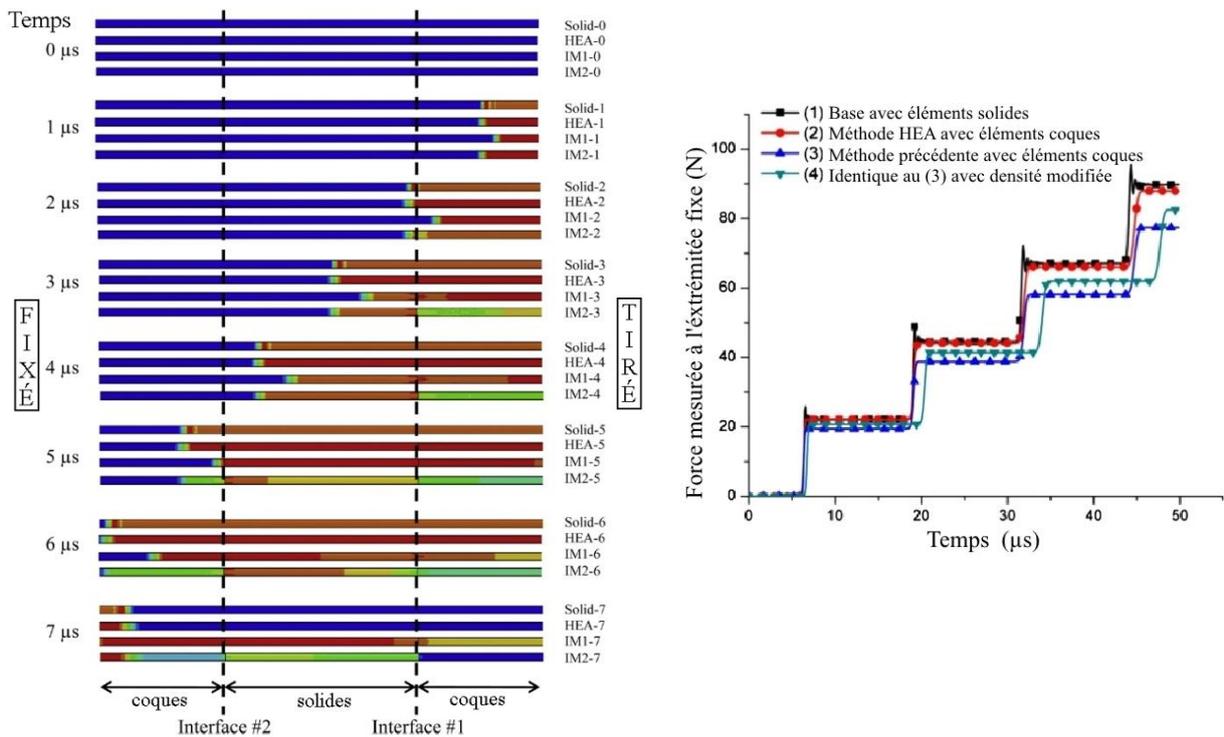


Figure 1.21: Simulation numérique d'un essai de traction uniaxiale sur fil. Propagation d'une onde longitudinale dans le fil (gauche) et évolution de la force à l'extrémité fixe en fonction du temps (droite) [59].

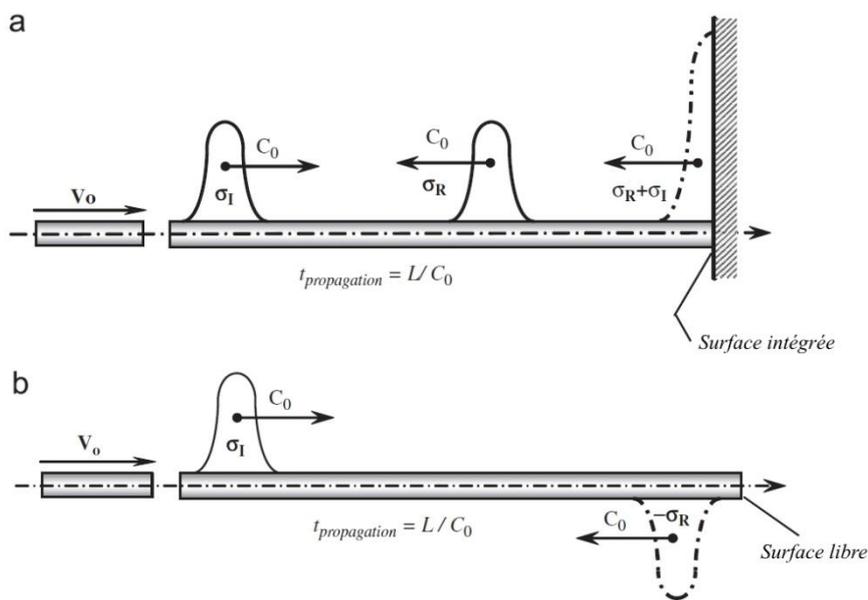


Figure 1.22 : Représentation schématique de la propagation d'onde élastique le long d'une barre : (a) réflexion de l'onde longitudinale depuis l'extrémité fixe et (b) réflexion depuis l'extrémité libre [61].

Lors d'un essai, l'échantillon testé doit subir une déformation homogène pour que les mesures réalisées soient valides. Or, au-dessus d'une certaine vitesse de déformation limite $\dot{\epsilon}_l$, cette condition

n'est plus respectée et les données extraites ne sont alors plus représentatives du réel comportement à rupture de l'échantillon.

L'impédance d'un matériau Z_m joue un rôle important quant à la propagation des ondes dans celui-ci. Elle se définit par la relation suivante :

$$Z_m = \rho_m \cdot c_m \cdot S_m \quad (1.13)$$

ρ_m , c_m et S_m étant respectivement la masse volumique du matériau, la vitesse de propagation d'onde dans le matériau et la surface transverse de celui-ci.

L'onde de traction générée par le matériau incident traverse la première interface « barre entrante/fil » et se propage dans le fil jusqu'à atteindre la seconde interface « fil/barre sortante ». L'impédance de la barre sortante étant plus élevée que celle du fil, nous retrouvons le même phénomène que dans la Figure 1.22 a), comme si l'onde faisait face à un mur contre lequel elle rebondit. La contrainte de l'onde garde son signe et se voit augmenter. Ce phénomène se reproduit à nouveau lorsque l'onde arrive à l'interface « barre entrante/fil ». De rebonds en rebonds, l'amplitude de l'onde diminue et la contrainte dans l'échantillon devient de plus en plus uniforme [47, 62].

A l'inverse, plus la différence d'impédance entre deux matériaux en contact est importante, plus le passage de l'onde d'un matériau à l'autre est rendu difficile. Le rapport des deux impédances doit donc être suffisamment faible pour que l'onde puisse être transmise dans l'échantillon à tester puis dans la barre sortante.

Le choix des matériaux des barres par rapport au fil testé est donc décisif quant à la bonne réalisation d'un essai de traction sur fil avec un dispositif de barres Hopkinson.

Le nombre de traversées α de l'onde dans le fil nécessaire pour atteindre un équilibre des contraintes entre les deux interfaces « barre entrante/fil » et « fil/barre sortante » est défini de telle sorte que [62]:

$$R(t) = \left| \frac{\Delta\sigma(t)}{\sigma_m(t)} \right| \leq 5\% \quad (1.14)$$

Avec $\Delta\sigma(t)$ la différence de contrainte des deux interfaces « barre entrante/fil » et « fil/barre sortante », et $\sigma_m(t)$ la contrainte moyenne sur toute la longueur de l'échantillon.

Soit r le rapport de l'impédance des barres sur celle de l'échantillon testé tel que :

$$r = \frac{\rho_m \cdot c_m \cdot S_m}{\rho_{éch} \cdot c_{éch} \cdot S_{éch}} \quad (1.15)$$

Il a été remarqué qu'une augmentation du rapport r réduit asymptotiquement le temps d'atteinte de l'équilibre des forces dans l'échantillon testé. Ainsi, une impédance des barres plus importante que celle du fil testé favorise la mise en place de l'équilibre des forces.

La vitesse de déformation limite $\dot{\epsilon}_l$, à laquelle l'équilibre des forces n'est atteint qu'à partir d'un certain nombre α de passage de l'onde dans l'échantillon testé, s'exprime alors de la façon suivante :

$$\dot{\epsilon}_l = \frac{\epsilon_f \cdot c_{fil}}{\alpha \cdot L_0} \quad (1.16)$$

Avec ϵ_f la déformation à rupture du fil, c_{fil} la vitesse de propagation d'onde dans le fil et L_0 sa longueur initiale.

Ainsi, à l'équilibre, ces trois ondes, incidente, transverse et réfléchie, se définissent telles que :

$$\varepsilon_i(t) + \varepsilon_r(t) = \varepsilon_t(t) \quad (1.17)$$

La déformation subie par l'échantillon testé se mesure soit par contact indirect avec les barres en utilisant un système optique, soit par contact direct en utilisant des jauges de déformation.

Concernant la mesure par contact indirect, nous utilisons un système optique qui se compose d'un faisceau lumineux projeté par un laser et capté par un photo-détecteur. Le plan du faisceau lumineux se trouve dans le même que celui des barres, au niveau de la jonction entre le fil et la barre entrante. Lors de l'essai, la largeur du faisceau lumineux va augmenter en fonction du déplacement de la barre entrante, et donc en fonction de l'élongation Δl que subit le fil.

Concernant la mesure par contact direct, des jauges de déformation sont positionnées sur les barres entrante et sortante à une distance spécifique de leurs extrémités. Ainsi, la distance entre la jauge positionnée sur la barre entrante et son extrémité doit être supérieure à la longueur de l'impacteur afin d'éviter la superposition des ondes incidente et réfléchie. Aussi, la jauge positionnée sur la barre sortante doit être suffisamment éloignée de son extrémité afin de laisser le temps à l'onde transmise d'atteindre sa position d'équilibre.

A cause de l'importante différence de diamètre qui existe entre la barre sortante et le fil, l'intensité de l'onde transmise qui se propage dans la barre sortante est beaucoup plus faible que celle de l'onde incidente dans la barre entrante. De ce fait, la mesure du signal dans la barre sortante au niveau de la jauge de déformation est rendue difficile et peu précise. Un amplificateur ou bien un système de mesure piézo-électrique peut être rajouté afin de rendre possible la mesure du signal.

Lorsque l'équilibre des contraintes dans l'échantillon testé est atteint, la vitesse de déformation nominale $\dot{\varepsilon}_N(t)$ ainsi que la déformation nominale $\varepsilon_N(t)$ et la contrainte nominale $\sigma_N(t)$ sont définies suivant les formules respectives [47] :

$$\dot{\varepsilon}_N(t) = -\frac{2 \cdot c_{BE}}{l_0} \cdot \varepsilon_r(t) \quad (1.18)$$

$$\varepsilon_N(t) = \int_0^t \dot{\varepsilon}_N(\tau) d\tau \quad (1.19)$$

$$\sigma_N(t) = \frac{E_{BE} \cdot S_{BE}}{S_{fil}} \cdot \varepsilon_t(t) \quad (1.20)$$

Avec l_0 et S_{fil} la longueur et la section transverse initiales du fil testé.

D'après les formules (1.18), (1.19) et (1.20), nous pouvons calculer la déformation vraie $\varepsilon(t)$ ainsi que la vitesse de déformation vraie $\dot{\varepsilon}(t)$ et la contrainte vraie $\sigma(t)$ suivant les formules respectives :

$$\varepsilon(t) = -\ln[1 - \varepsilon_N(t)] \quad (1.21)$$

$$\dot{\varepsilon}(t) = \frac{\dot{\varepsilon}_N(t)}{1 - \varepsilon_N(t)} \quad (1.22)$$

$$\sigma(t) = \sigma_N(t) \cdot [1 - \varepsilon_N(t)] \quad (1.23)$$

Exemple de résultats obtenus :

En plus d'une étude à faible vitesse de déformation réalisée à l'aide d'un dispositif de traction uniaxiale Instron (I.2.1.1. Moyen quasi-statique : Dispositif de traction uniaxiale), Tapie et al. ont également étudié le comportement mécanique de fils d'aramide à de hautes vitesses de déformation grâce au dispositif de barres Hopkinson (Figure 1.23).

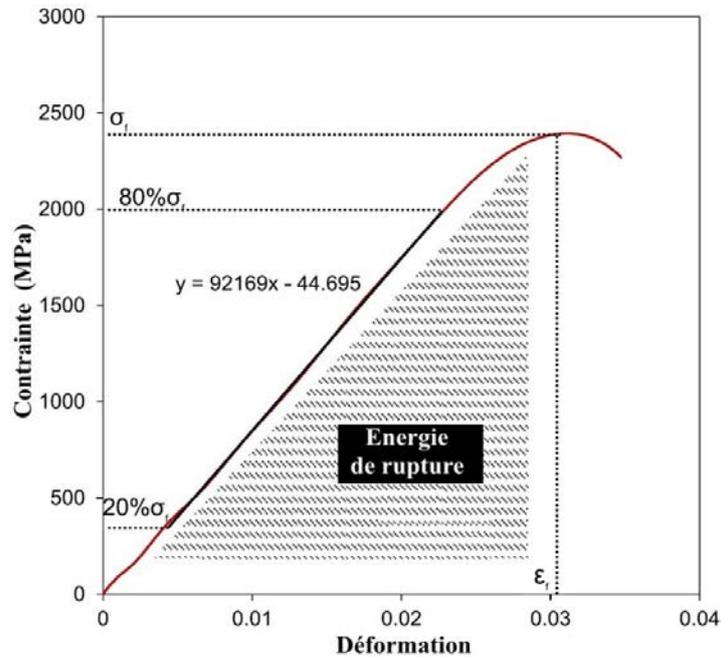


Figure 1.23 : Courbe de contrainte-déformation d'un fil d'aramide vierge (Twaron T1040) obtenue à 375 s^{-1} [30].

Ces essais permettent ainsi de définir les caractéristiques mécaniques du fil, que sont sa contrainte à rupture, sa déformation à rupture et son module d'Young, à de hautes vitesses de déformation. Il est également possible de connaître l'énergie nécessaire à la rupture du fil à 375 s^{-1} en calculant l'aire sous la courbe de contrainte-déformation.

Un fil d'aramide vierge dispose donc, d'après ces essais, d'une contrainte à rupture de 2,4 GPa, d'une déformation à rupture d'environ 3%, d'un module d'Young de 92 GPa et d'une énergie de rupture d'environ $32,5 \text{ MJ.m}^3$.

Les dispositifs de traction uniaxiale en sollicitation quasi-statique (machine Instron) et en sollicitation dynamique (barres Hopkinson) nous permettent par la suite de comparer ces résultats complémentaires sur le comportement mécanique d'un fil d'aramide afin d'observer l'influence de la vitesse de déformation (Figure 1.24).

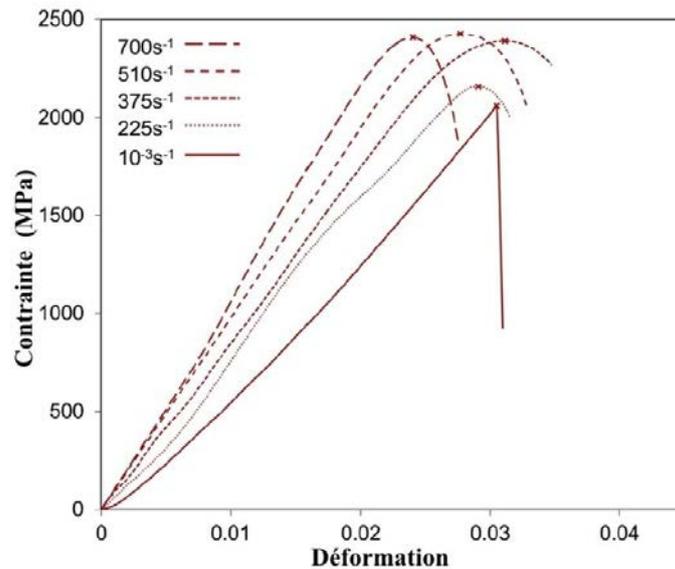


Figure 1.24 : Courbes de contrainte-déformation d'un fil d'aramide vierge (Twaron T1040) obtenues à différentes vitesses de déformation [30].

On remarque alors une nette dépendance des paramètres mécaniques du fil par rapport à la vitesse de sollicitation qui lui est appliquée. Une augmentation de la vitesse de déformation rend le fil plus raide et réduit sa déformation à rupture. Concernant sa contrainte à rupture, elle augmente en tendant vers une constante au fur et à mesure que la vitesse de déformation croît.

- Dispositif de tirs transverses

Le dispositif de tir transverse est le moyen expérimental permettant de reproduire au mieux les conditions réelles de tirs lors d'une sollicitation balistique. Cependant, depuis les années 60 à 70 [63-66], peu de publications reprenant ce dispositif ont été réalisées. Quelques chercheurs comme Smith et al. [58, 67], Roylance [20], mais aussi plus récemment Gu [68] et Naik et al. [69] ont beaucoup étudié la propagation des ondes dans le fil et le comportement de celui-ci lors d'un impact transversal mais aussi les relations existant entre ces vitesses de propagation et la mesure dans le temps des caractéristiques mécaniques du fil telles que la contrainte σ et la déformation ϵ dans le fil.

Description théorique de l'essai :

Lorsqu'un tissu, qui se compose de l'entremêlement de plusieurs fils, est soumis à un impact balistique, deux types d'ondes vont se créer le long de chaque fil qui le compose: les ondes longitudinales, décrites plus haut dans ce paragraphe, et les ondes transversales (Figure 1.25) [20, 58, 68, 70].

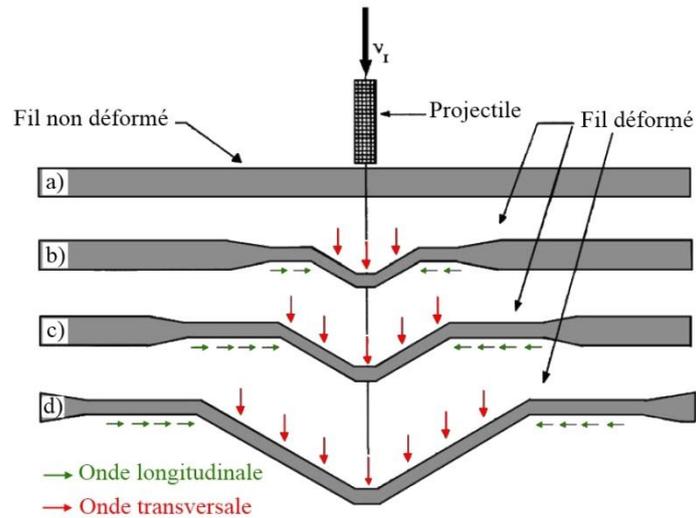


Figure 1.25 : Evolution de la déformation du fil après impact transverse d'un projectile [70].

Au contact du projectile contre le fil, deux ondes de traction longitudinale se forment et se propagent du point d'impact vers chacune des deux extrémités du fil (Figure 1.26).

Ces ondes de traction longitudinale se définissent par le profil de deux fronts d'onde [20, 58, 69] dont les formulations sont les suivantes :

$$c_e = c_{(\varepsilon=0)} = \sqrt{\frac{1}{\rho} \left(\frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right)_{\varepsilon=0}} \quad (1.24)$$

correspondant à l'onde la plus éloignée du point d'impact et appelée « onde élastique », et

$$c_p = c_{(\varepsilon_0)} = \sqrt{\frac{1}{\rho} \left(\frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right)_{\varepsilon=\varepsilon_0}} \quad (1.25)$$

correspondant à l'onde la plus proche du point d'impact et appelée « onde plastique ».

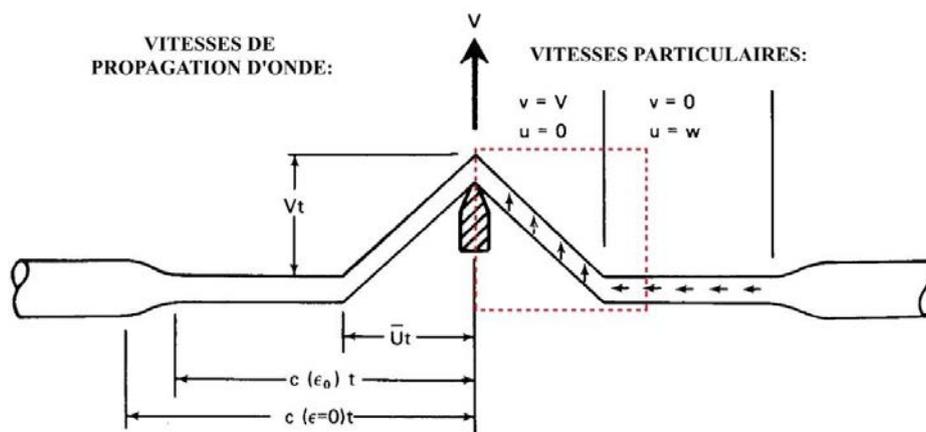


Figure 1.26: Propagation des ondes longitudinale et transversale le long d'un fil lors d'un impact balistique _ encadré rouge en référence à la figure 1.27. [20].

Dans un même temps, la poussée du projectile sur le fil provoque la déformation de celui-ci. Elle crée une onde transversale dont la propagation se décompose suivant une vitesse V , correspondant à la vitesse de propulsion du projectile, et une vitesse U , correspondant à la vitesse de propagation du front de l'onde transversale le long du fil. Leurs formulations sont les suivantes [20, 68] :

$$V = c \sqrt{2\varepsilon \sqrt{\varepsilon(1+\varepsilon)} - \varepsilon^2} \quad (1.26)$$

$$U = c \sqrt{\frac{\varepsilon}{(1+\varepsilon)}} \quad (1.27)$$

U étant formulée dans un référentiel rattaché au fil. Dans un référentiel fixe tel que le laboratoire, la vitesse de propagation du front de l'onde transversale le long du fil devient \bar{U} telle que :

$$\bar{U} = c \left(\sqrt{\varepsilon(1+\varepsilon)} - \varepsilon \right) \quad (1.28)$$

D'après ces formules, on remarque que l'onde transversale se propage toujours plus lentement que l'onde longitudinale [67].

La portion de fil située après le passage de l'onde longitudinale et avant celui du front de l'onde transversale se déplace à une vitesse particulière w (équation 1.12) suivant l'axe horizontal du fil. Concernant la portion de fil située entre le point d'impact du projectile et le front de l'onde transversale, elle se déplace verticalement, dans la même direction que le projectile, à une vitesse particulière égale à celle du projectile (Figure 1.27 et Figure 1.28).

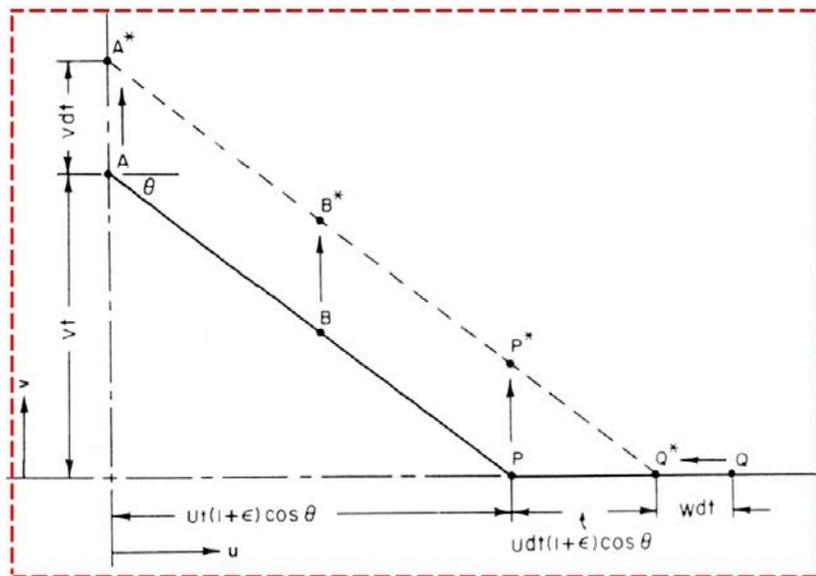


Figure 1.27 : Configuration de la moitié d'un fil soumis à un impact transverse _ déplacement du fil entre un temps t et $t+\Delta t$ [58].

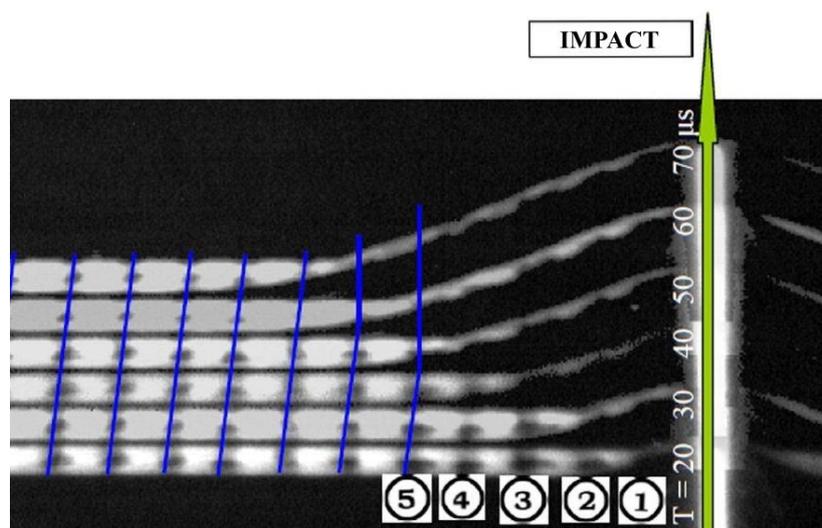


Figure 1.28 : Superposition de photos du fil soumis à un impact transverse prises à différents moments successifs _ Représentation du mouvement de particules dans le fil lors de l'essai [35].

Exemple de résultats obtenus :

En 1999, Carr [38] réalise des essais d'impact transverse sur des fils d'aramide et de polyéthylène à l'aide d'un canon à gaz avec comme projectile une bille d'acier (Figure 1.29).

Deux types de rupture du fil sont observés : un mode de rupture par traction nommé TSW (Transmitted Stress Wave) et un mode de rupture par cisaillement (Figure 1.30).

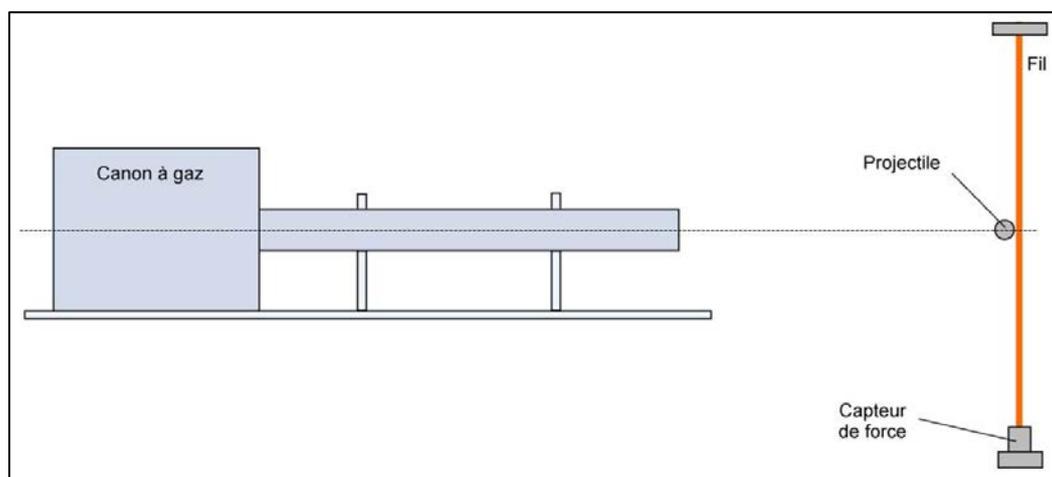


Figure 1.29 : Schéma du moyen d'essais de tir transverse au canon à gaz.

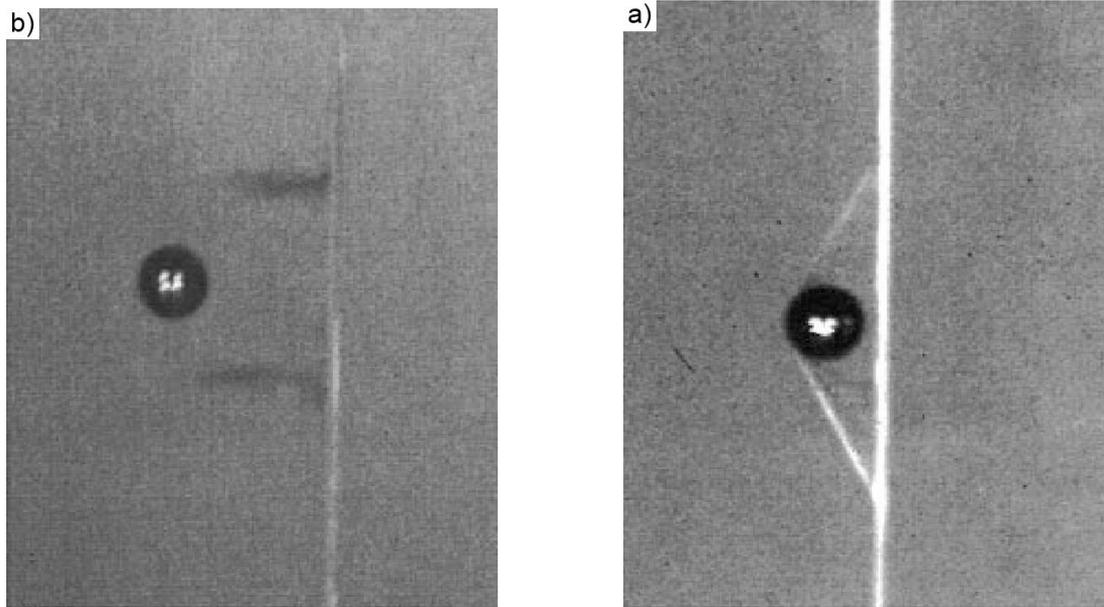


Figure 1.30 : Tirs transverses sur des fils de polyaramide et de UHMWPE [38] :
a) mode de rupture par TSW b) mode de rupture par cisaillement

Ces deux modes de rupture, par traction et par cisaillement, sont respectivement caractéristiques des états de sollicitation quasi-statique et dynamique (Voir § I.1.2.2. Mode de rupture du fil en fonction de la vitesse de déformation).

L'étude consiste donc à déterminer le niveau énergétique nécessaire à la transition entre ces deux états de sollicitation pour chacun des deux fils étudiés. Pour cela, la variation d'énergie absorbée par le fil est évaluée en fonction de l'énergie d'impact (Figure 1.31).

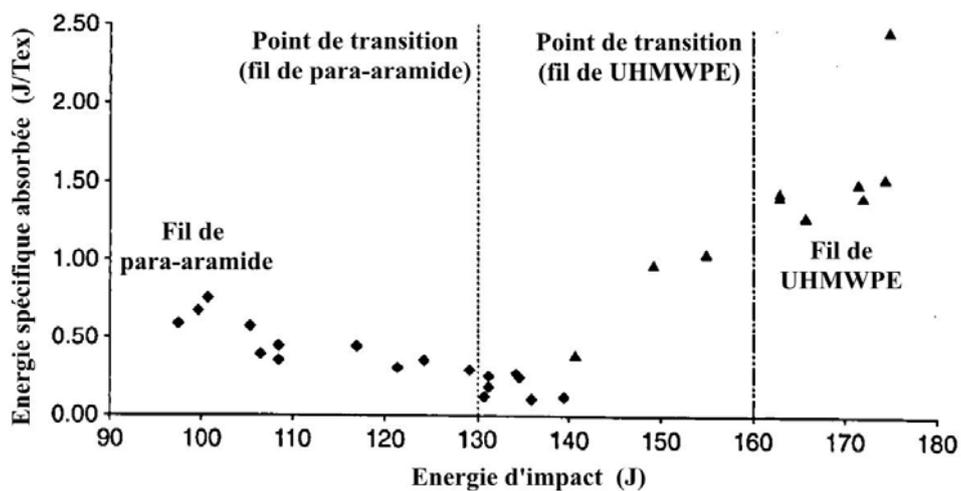


Figure 1.31: Variation de l'énergie spécifique absorbée par un fil d'aramide et d'UHMWPE en fonction de l'énergie d'impact lors d'un tir transverse [38].

On constate alors une énergie de transition E_{trans} égale à 130 J pour le fil d'aramide et à 160 J pour le fil de polyéthylène. En supposant que la vitesse de déformation équivaut au rapport de la vitesse d'impact du projectile sur la longueur initiale du fil testé, la vitesse de déformation équivalente à l'état de transition peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\dot{\epsilon} = \sqrt{\frac{2.E_{trans}}{m.l_0^2}} \quad (1.29)$$

Avec m la masse du projectile et l_0 la longueur initiale du fil testé.

Il nous est alors possible d'estimer ces vitesses de déformation pour lesquelles la sollicitation soumise aux fils d'aramide et de polyéthylène passe d'un état quasi-statique à un état dynamique.

Après calcul, nous obtenons $\dot{\epsilon}_{fil\ aramide} = 1080\ s^{-1}$ et $\dot{\epsilon}_{fil\ PE} = 1200\ s^{-1}$.

En 2011, Song et al. [34] proposent une nouvelle méthode de tir transverse avec le dispositif de barres Hopkinson (Figure 1.32). Leurs observations, faites à partir d'une caméra digitale ultra rapide, révèlent que les filaments présents dans le fil testé ne subissent pas tous au même moment l'impact du projectile. La transmission des ondes longitudinale et transverse le long de chaque filament se fait de façon progressive dans l'épaisseur du fil (Figure 1.33). Lors du déplacement du bout de la barre contre le fil, nous retrouvons la formation d'un triangle isocèle le long du fil au niveau de la pointe du projectile (Figure 1.34) (Voir §I.2.1.2. Moyens dynamiques : le SHTB et le dispositif de tirs transverses Dispositif de tirs transverses).

Il est difficile de mesurer directement sur image vidéo la vitesse de propagation de l'onde transverse U pour des raisons de calibration et de résolution d'image. Il est cependant possible de la calculer grâce à la mesure de l'angle d'inclinaison γ , qui ne dépend ni de la calibration ni de la résolution d'image, et de la vitesse de projectile V_{proj} [34]:

$$U = \frac{V_{proj}}{\tan \gamma} \quad (1.30)$$

Ainsi, lors d'un impact transverse à 53 m/s sur un fil d'aramide (Kevlar KM2 _ 450 deniers) sans torsion, l'angle d'inclinaison du fil γ est de 20,5° et la vitesse de propagation de l'onde transverse U est de 142 m/s.

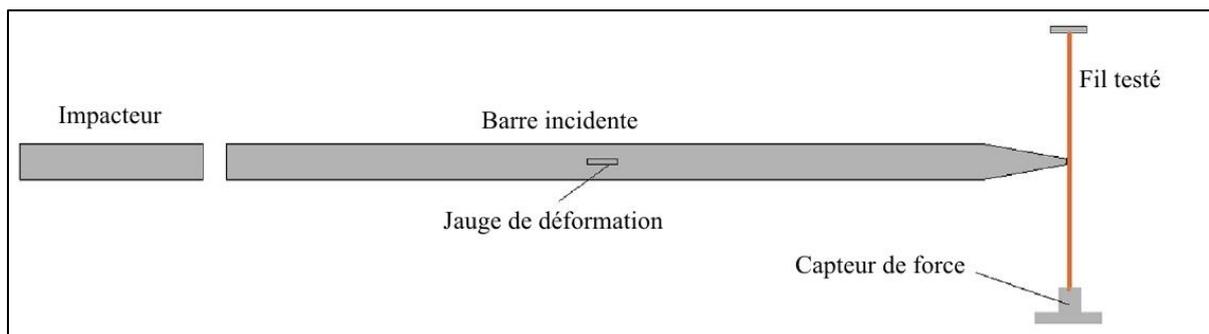


Figure 1.32 : Schéma du moyen d'essai de tir transverse utilisant le dispositif de barres Hopkinson [35].

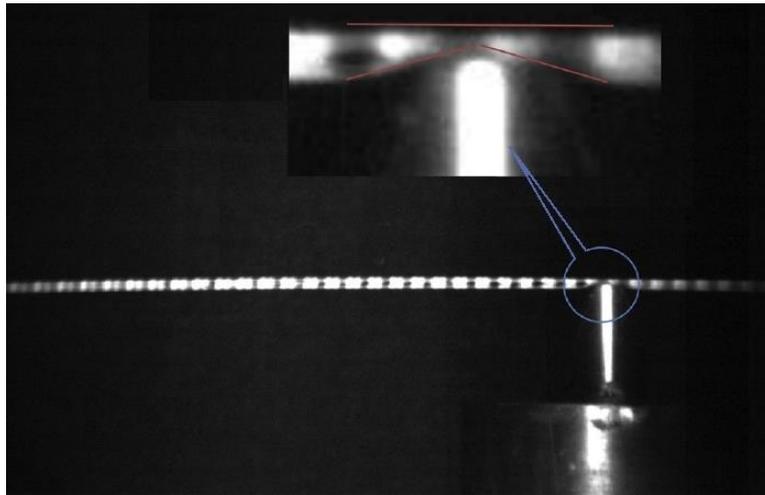


Figure 1.33 : Transmission progressive dans l'épaisseur du fil des ondes longitudinale et transverse le long des filaments [35].

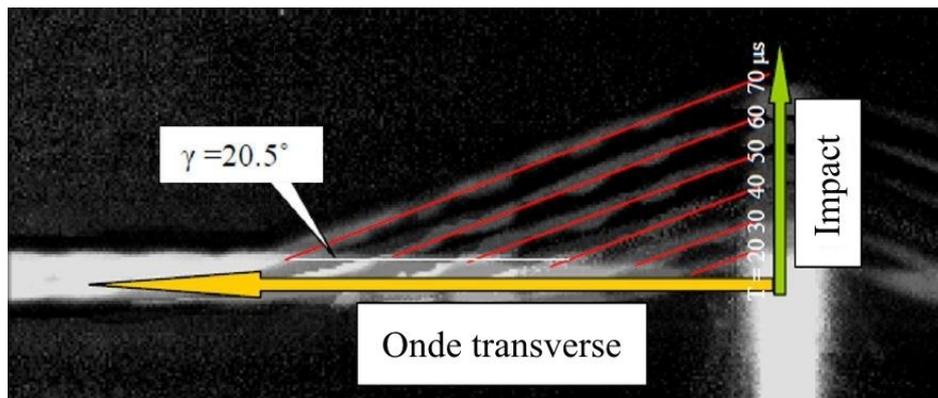


Figure 1.34 : Formation et prolifération d'un triangle isocèle le long du fil au fur et à mesure de l'avancée du projectile contre le fil [35].

La barrière optique ainsi que la caméra digitale haute vitesse sont des dispositifs de mesure fiables et précis. Dans le cas de tirs transverses, ils permettent respectivement de mesurer des vitesses pour en déduire des énergies d'impact [38] et de mesurer des angles d'inclinaison pour en déduire des vitesses de propagation d'onde [34].

En 1956, Smith et al. [67] démontrent que la mesure de la contrainte longitudinale subie par le fil lors d'un essai de tir transverse au moyen d'un capteur de force reflète de nombreuses perturbations sous forme de changements de pente abruptes (Figure 1.35). Celles-ci sont dues aux réflexions (R) de l'onde transverse aux extrémités du fil (Figure 1.36).

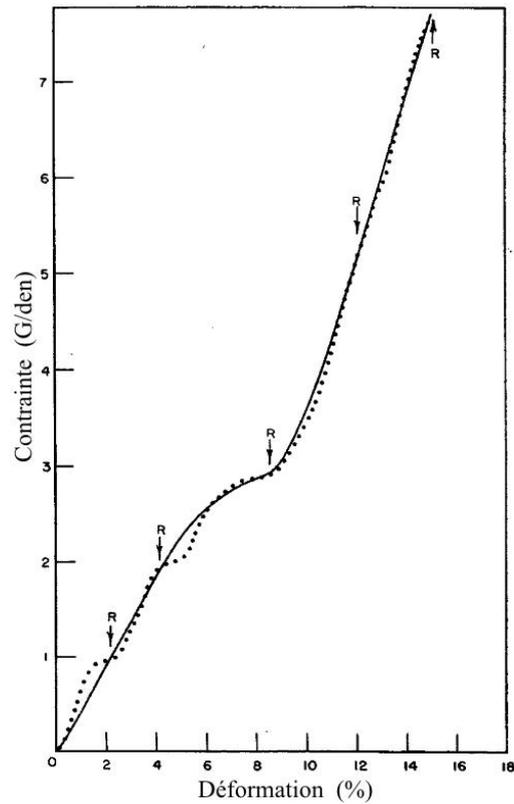


Figure 1.35 : Variation de la contrainte dans le fil en fonction de sa déformation. Courbe en pointillés : courbe en gradin obtenue d'après les mesures expérimentales. Courbe pleine : lissage de la courbe de contrainte-déformation [67].

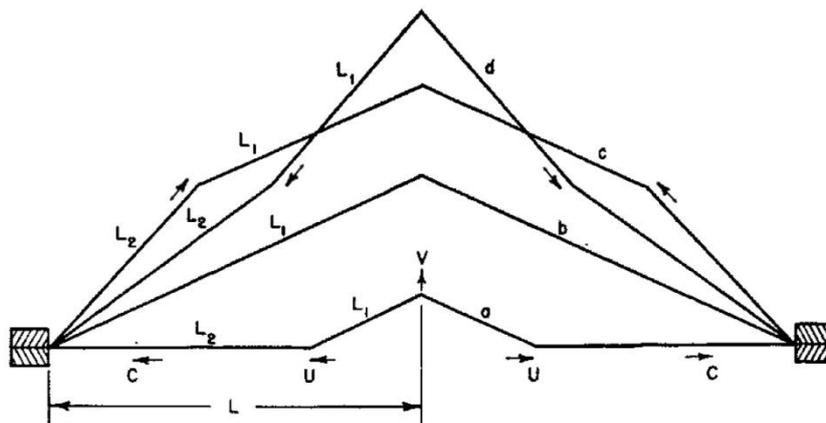


Figure 1.36 : Propagation des ondes transverse et longitudinale lors d'un essai de tir transverse _ Réflexion de l'onde transverse aux extrémités du fil [67].

Tester le fil seul permet d'en extraire les propriétés mécaniques qui lui sont propres et qui le caractérisent. Mais lorsque ce fil se retrouve dans une structure tissée, d'autres paramètres entre en jeu pour caractériser sa déformation et sa rupture. C'est pourquoi des essais de traction sur fil au sein de leur structure tissée ont été développés.

I.2.2. Essais de traction sur fil dans sa structure tissée

Les performances balistiques des tissus dépendent des propriétés mécaniques des fils qui le constitue mais aussi des interactions inter-fils présentes au sein de la structure tissée [71-74]. De nombreuses recherches expérimentales et numériques [54, 71-83] ont été réalisées, et mettent en avant le rôle primordial de ces forces de frottement dans les mécanismes d'absorption énergétique, en plus des mécanismes de déformations et de ruptures des fils. C'est pourquoi la détermination des coefficients de frottement inter-fils ainsi que la compréhension de leur influence sur les performances balistiques des tissus est importante. Tout d'abord, une approche du point de vue quasi-statique est nécessaire afin de mettre en évidence ces mécanismes de frottement. Une approche dynamique permet par la suite de nous rapprocher des conditions réelles de sollicitation balistique.

I.2.2.1. Moyen quasi-statique: Yarn pull-out test

Description du dispositif :

Les essais de « yarn pull-out » consistent à extraire un fil de sa structure tissée comme illustré dans la Figure 1.37. La longueur de fil testée est de $L_0 + l_0$, L_0 correspondant à un entremêlement dans le tissu avec N fils transverses et l_0 correspondant à la « queue » du fil laissée libre en dehors du tissu (Figure 1.37).

Le fil est rattaché et tiré à l'aide d'un système de traction pneumatique et subit une vitesse de sollicitation de 5mm/min.

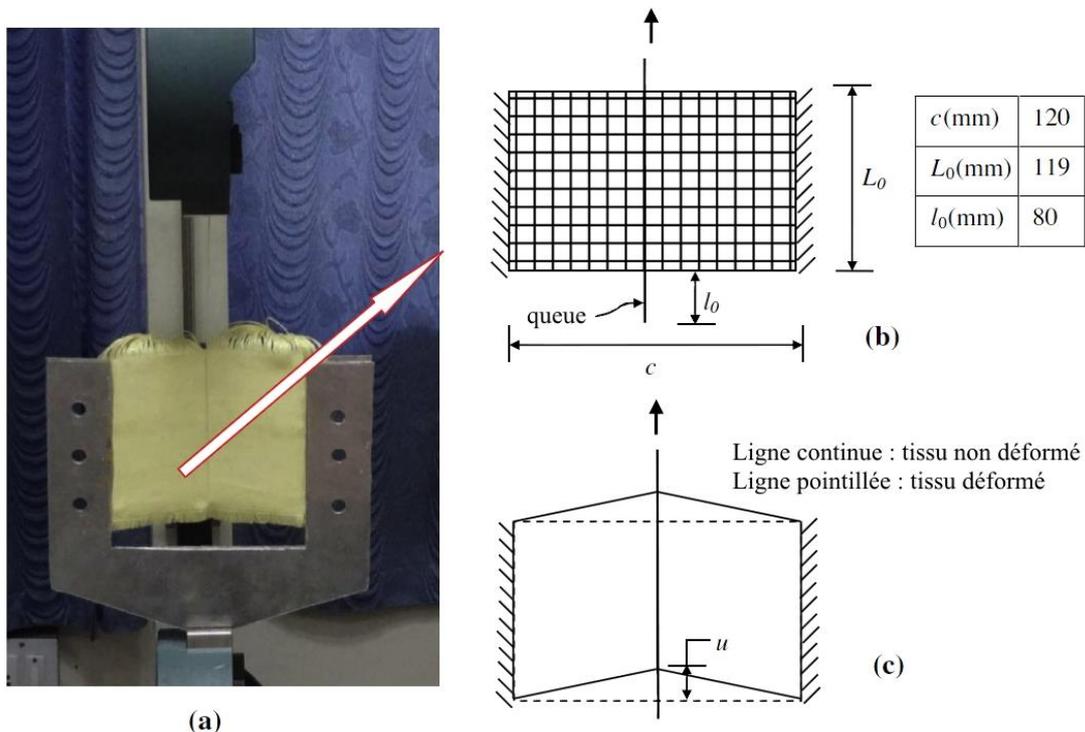


Figure 1.37 : Photo (a) et schéma du dispositif de « pull yarn test », avant (b) et pendant (c) l'essai. [74].

L'évolution de la force mesurée, nécessaire à l'extraction du fil, en fonction de son déplacement se définit suivant plusieurs phases (Figure 1.38).

La phase A renvoie à la déformation et au déplacement du tissu dans le sens de traction du fil, celui-ci restant fixe dans le tissu. Ce phénomène est dû à la flexibilité du tissu et à sa surface étendue laissée entre les deux mors qui le maintiennent.

Après déformation maximale du tissu (Figure 1.39 2.), la force de traction sur le fil F_B va continuer d'augmenter progressivement durant la phase B jusqu'à atteindre une charge maximale $F_{N\text{ sta}}$. Durant cette phase, le fil perd de son ondulation et se tend jusqu'à repousser vers l'extérieur les fils transverses (Figure 1.39 3.). L'angle θ (« View A ») des surfaces de contact entre le fil et les fils transverses est alors plus petit que l'angle θ_0 (« View B ») des surfaces de contact de la configuration initiale. Cette charge maximale est celle nécessaire pour contrer les forces de frottement dites « statiques » qui existent entre le fil testé et les N fils transverses en contact, lui permettant de ne pas se mouvoir dans sa structure.

Durant la phase C, le fil est en translation dans le tissu et les forces de frottement ne sont plus dites statiques mais cinétiques ($F_{N\text{ ciné}}$). Ces forces, toujours dues aux contacts inter-fils, ralentissent le déplacement du fil dans sa structure. La baisse de la charge durant cette phase est due au fait que les forces de frottement cinétiques sont plus faibles que les forces de frottement statiques.

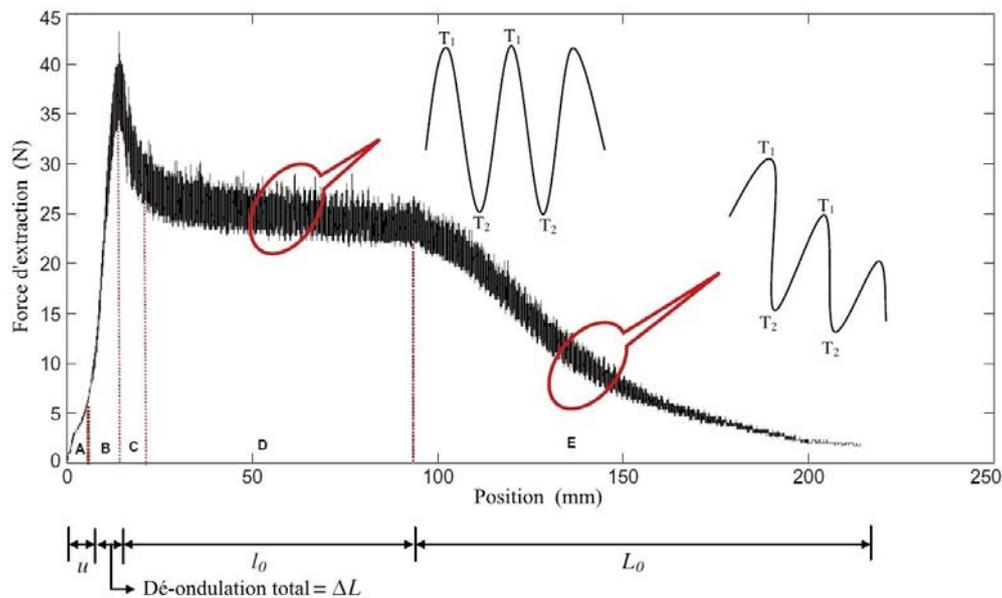


Figure 1.38 : Variation de la force d'extraction du fil en fonction de son déplacement durant un essai de « yarn pull-out » [74].

Des recherches [71, 80, 82, 84] ont permis d'établir la dépendance de ces forces de frottement inter-fils (statique et cinétique) F_{frot} telle que :

$$F_{\text{frot}} = f(\mu, N, L_t, S_{\text{contact}}, F_{PT}, \theta_{\text{crimp}}) \quad (1.31)$$

μ étant le coefficient de frottement intrinsèque au fil, N la densité de fils transverses, L_t la longueur de tissu dans le sens de la traction, S_{contact} la surface de contact réelle entre les fils à chaque point de croisement, F_{PT} la force de pré-tension appliquée sur toute la longueur du tissu dans le sens transverse et θ_{crimp} l'angle d'ondulation du fil testé.

La surface de contact réelle S_{contact} correspond à la surface de contact entre le fil testé et chaque fil transverse après tension et aplanissement du fil dans sa structure (Figure 1.39 3.).

Durant la phase D (Figure 1.39 4.), le fil est translaté dans le tissu avec cette force cinétique sur une longueur l_0 , longueur laissée initialement libre en bout de fil.

Enfin, la phase E (Figure 1.39 5.) correspond au désentrelacement du fil dans sa structure. Le fil libère les uns après les autres ses entrecroisements avec chaque fil transverse, réduisant ainsi de façon progressive la force cinétique mesurée. Les oscillations présentes dans les phases C, D et E, et définies par les amplitudes T_1 et T_2 (Figure 1.38), correspondent alternativement au phénomène de « glissement (Sp) /adhérence (Sk) » entre fils et à la force de rétraction accumulée par la structure tissée (Af) dues au passage du fil testé entre les N entrecroisements transverses (Figure 1.40) [71, 74, 81, 85, 86].

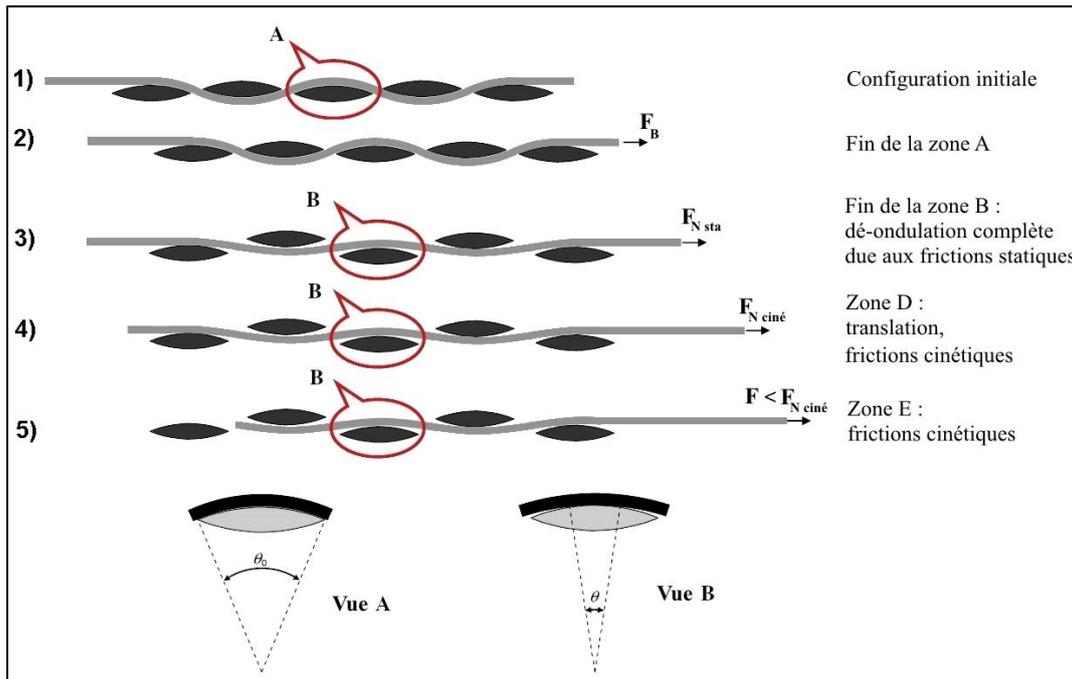


Figure 1.39 : Etapes de déformation de la structure tissée au niveau du fil testé durant l'essai de « yarn pull-out » _ Réduction de l'angle d'ouverture de la surface de contact inter-fils [74].

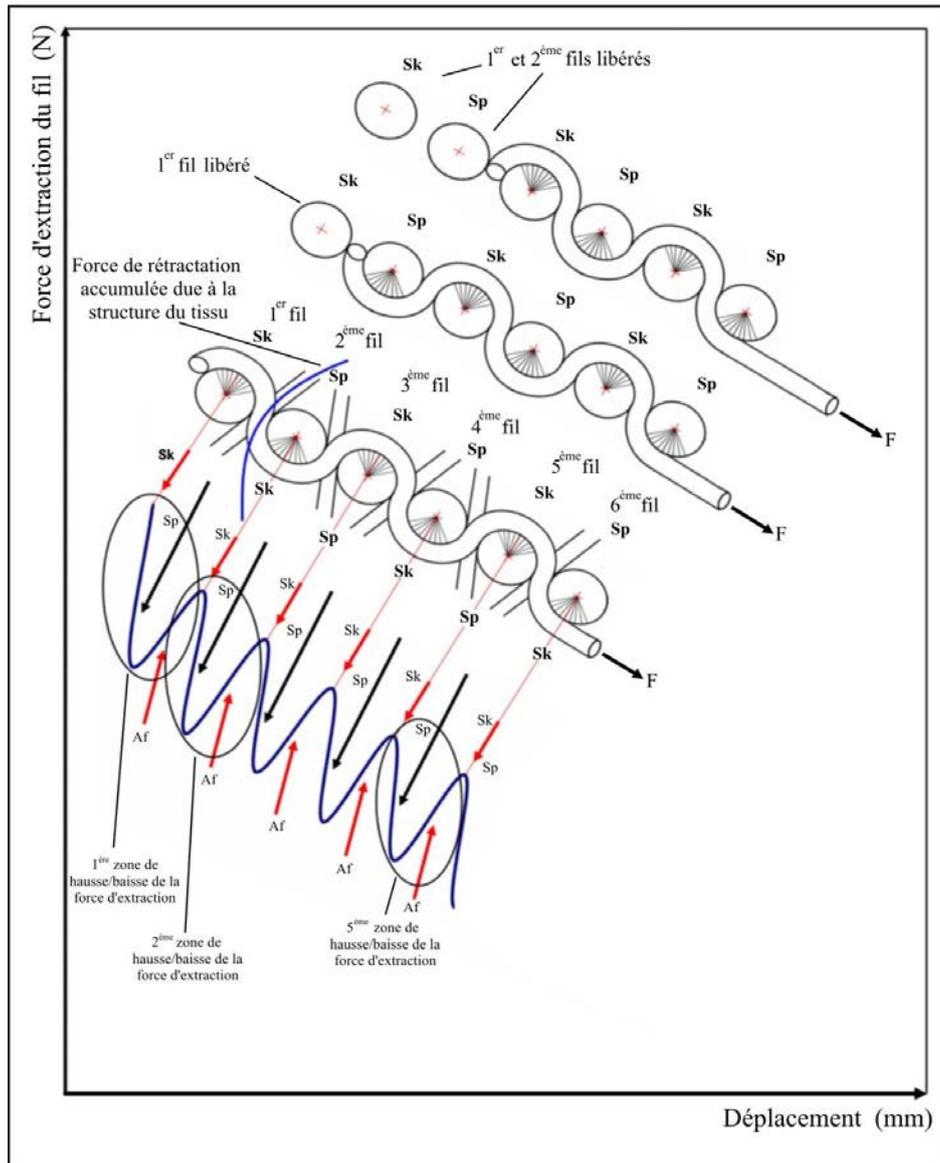


Figure 1.40 : Représentation schématique du phénomène « glissement (Sp) / adhérence (Sk) » sur la courbe Force-Déplacement de l'essai de « yarn pull-out » [81].

Exemple de résultats obtenus :

Les essais de « yarn pull-out » réalisés sur tissus d'aramide ont permis de retrouver les forces maximales nécessaires à l'extraction d'un fil, correspondant aux forces de frottement statique ($F_{N\ sta}$) et cinétique ($F_{N\ ciné}$).

Les forces de frottement, F_{sta} et $F_{ciné}$, présent entre deux fils entrecroisés se définissent par les formules [74] :

$$F_{sta} = \frac{F_{N\ sta}}{N} \quad (1.32)$$

$$F_{ciné} = \frac{F_{Nciné}}{N} \quad (1.33)$$

Il est ensuite possible de retrouver les coefficients de frottement, statique (μ_{sta}) et cinétique ($\mu_{ciné}$), grâce à la formule d'Euler [73, 74, 87] :

$$\mu_{sta} = \frac{1}{N \cdot \theta} \cdot \ln \left[\frac{F_{sta}}{F_B} \right] \quad (1.34)$$

$$\mu_{ciné} = \frac{1}{N \cdot \theta} \cdot \ln \left[\frac{F_{ciné}}{F_B} \right] \quad (1.35)$$

Ainsi, pour des essais réalisés sur des tissus aramide (fils de 600 deniers _ Kevlar KM2) type toile de hauteur 119 mm [74], les forces de frottement statique et cinétique sont respectivement de 49,2 N et de 26 N. Les coefficients de frottement statique et cinétique qui en découlent sont respectivement de 0,189 et de 0,173.

Des études ont également été menées sur l'influence de la pré-tension sur ces forces de frottement [72, 82, 86, 88]. Nous constatons alors que la force nécessaire à l'extraction du fil augmente significativement avec l'augmentation de la pré-tension du fil (Figure 1.41). Ce phénomène est dû à l'application de forces transverses sur le fil testé par les fils avec lesquels il est entrelacé (Figure 1.42). Ces forces viennent s'ajouter aux forces transverses initialement présentes dans la structure tissée. L'ajout de ces forces transverses influe sur les coefficients de frottement inter-fils qui augmentent. De ce fait, la force nécessaire à l'extraction du fil est plus importante pour contrer l'augmentation des forces de frottement inter-fils [86].

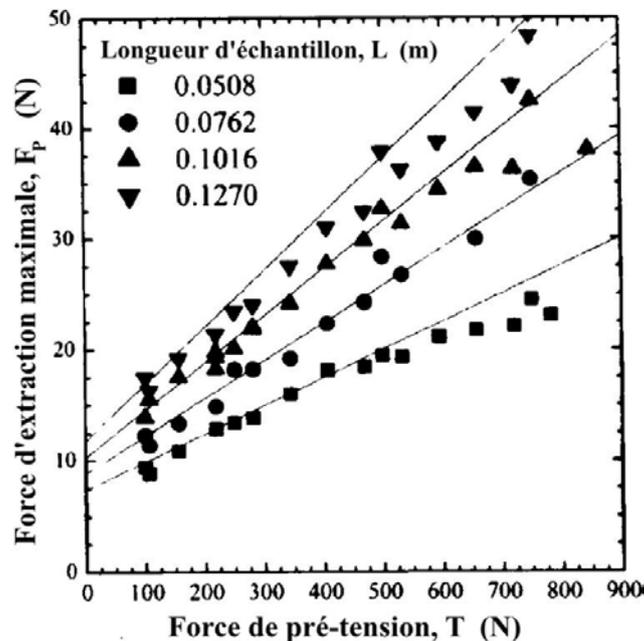


Figure 1.41 : Influence de la force de pré-tension appliquée sur le tissu par rapport à la force d'extraction du fil testé pour différentes longueurs de tissu [71].

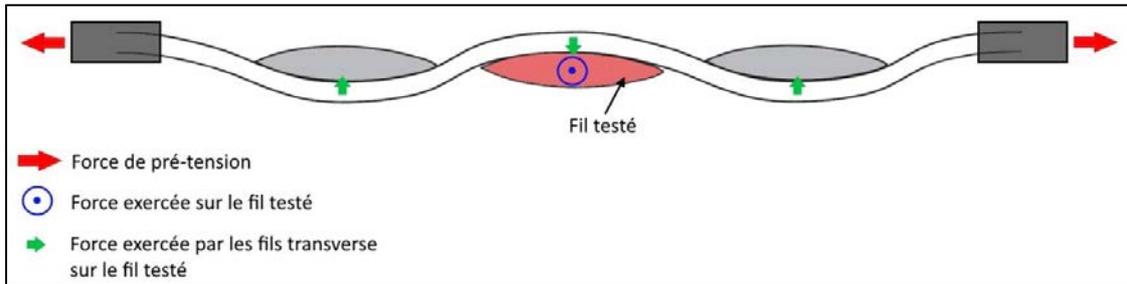


Figure 1.42 : Vue schématique du dessus de l'essai de « yarn pull-out » _ Création de forces des fils transverse exercées sur le fil testé due à la force de pré-tension appliquée sur le tissu.

Les paramètres mécaniques recueillies par les essais réalisés sur le dispositif de traction quasi-statique (contrainte à rupture σ_r , déformation à rupture ε_r , module d'Young axial E_{11}) et par les essais de « yarn pull-out » (coefficient de frottement μ) peuvent être par la suite utilisés dans des simulations numériques d'impact balistique pour décrire le comportement mécanique du fil dans une structure tissée qui sera soumise à un impact, et ainsi prendre en compte plus de paramètres entrant en jeu dans les mécanismes de déformation et de rupture de la structure tissée.

Toutefois, ces données correspondent à un état de sollicitation quasi-statique, et pour se rapprocher au mieux de la réalité d'un impact balistique, il serait donc préférable d'utiliser les paramètres mécaniques correspondant à une sollicitation dynamique.

1.2.2.2. Moyen dynamique: Yarn pull-out test

Description du dispositif :

Guo et al. [86, 89] ont réalisé un nouveau dispositif expérimental pour les essais de « yarn pull out » avec un système de pendule (Figure 1.43) permettant d'appliquer des vitesses de sollicitation comprises entre 0,9 et 1,2 m/s. Cet ordre de grandeur est loin de celui atteint lors des conditions réelles d'impacts balistiques mais est environ 7.10^5 fois supérieur à celui obtenu lors des essais « yarn pull-out » en sollicitation quasi-statique. Ce nouveau dispositif a ainsi permis de mener une étude concernant l'influence de la vitesse de sollicitation sur les propriétés tribologiques d'une interaction fil-fil dans une structure tissée. Des essais dits « dans le plan » ont été réalisés mais aussi des essais dits « hors plan » (Figure 1.44) qui se rapprochent beaucoup plus des mécanismes d'extraction de fils qui ont lieu lors d'un impact balistique [89].

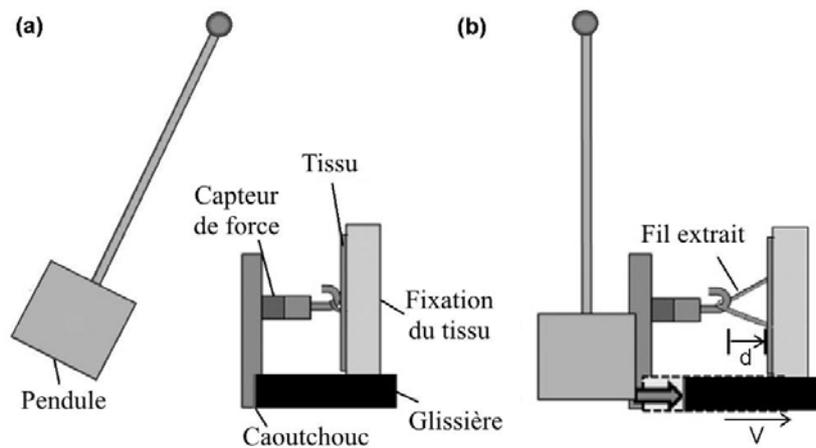


Figure 1.43 : Représentation schématique de l'essai de « yarn pull-out » avec dispositif de pendule [89].

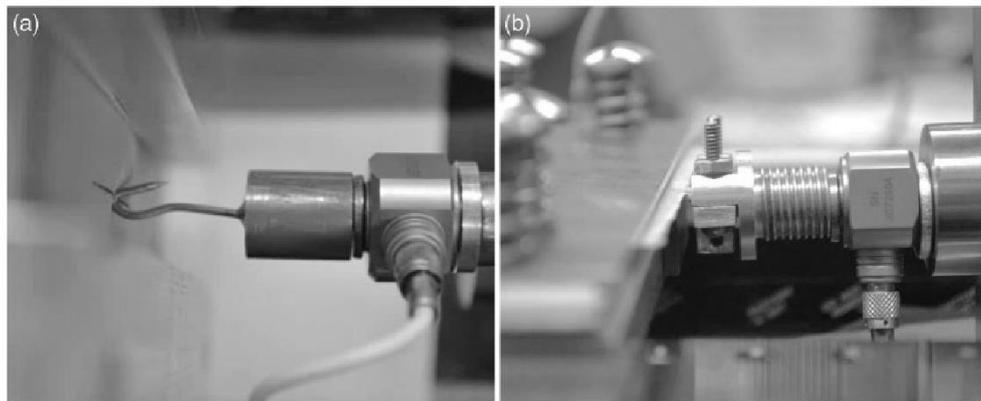


Figure 1.44 : Systèmes d'attache du fil pour les essais de « yarn pull out » (a) dit « hors plan » et (b) dit « dans le plan » [89].

Exemple de résultats obtenus :

Les essais « out-of-plane » de « yarn pull-out » réalisés par Guo et al. [86] en sollicitations quasi-statique et dynamique nous révèlent l'influence de la vitesse de déformation et de la pré-tension du tissu sur la force d'extraction du fil. Dans un premier temps, les résultats de ces essais (Tableau 1.3) nous montrent une dépendance de la force d'extraction du fil en fonction de la vitesse de sollicitation. Nous retrouvons ici le même phénomène qu'à l'échelle des chaînes macromoléculaires lors d'une traction dynamique. L'énergie de traction est fournie au fil en un temps beaucoup plus court en sollicitation intermédiaire qu'en sollicitation quasi-statique (1000 fois). De ce fait, le glissement entre les fils dispose de très peu de temps pour se réaliser et la cohésion inter-fils est plus importante. Ainsi, les coefficients de frottement dépendent de la vitesse de sollicitation [90] et augmentent avec celle-ci [23] ce qui induit donc une augmentation des forces de frottement inter-fils. La force nécessaire à l'extraction du fil est alors plus importante pour contrer cette augmentation.

Ces résultats nous montrent également que, contrairement en régime quasi-statique, l'augmentation de la force de pré-tension sur le tissu n'influe pas, ou très peu, sur la force d'extraction

en régime intermédiaire. Ceci peut s'expliquer par le fait que les forces transverses induites par la force de pré-tension deviennent négligeables par rapport aux forces de frottement inter-fils qui ont augmenté avec la vitesse de sollicitation.

	Quasi-statique (1 mm/s)			Intermédiaire (1 m/s)		
	0 kPa	21,4 kPa	85,4 kPa	0 kPa	21,4 kPa	85,4 kPa
Pré-tension du tissu	0 kPa	21,4 kPa	85,4 kPa	0 kPa	21,4 kPa	85,4 kPa
Direction chaîne	7 N	10 N	18 N	13,4 N	-	13,5 N
Direction trame	5 N	6 N	8 N	10,0 N	-	10,5 N

Tableau 1.3 : Tableau comparatif des forces nécessaires à l'extraction des fils de chaîne et de trame (Kevlar) lors d'essais transverses « out-of-plane » de « yarn pull out », avec et sans pré-tension du tissu, en régime quasi-statique et dynamique [89].

Certains dispositifs expérimentaux permettent de tester le fil seul, extrait de sa structure tissée ou seul, pour définir son comportement mécanique ainsi que l'influence de ses paramètres intrinsèques (nature, nombre de filament, longueur, masse linéique) sur celui-ci. D'autres sont conçus de sorte à pouvoir tester le fil au sein même de sa structure tissée dans le but de caractériser l'influence de paramètres liés au tissu (ondulation, densité de fil, surface de contact inter-fil, points de liage) sur son comportement mécanique.

CONCLUSION

Les bancs d'essais qui viennent d'être décrits ont été développés pour répondre à un manque de connaissance du point de vue de la mécanique des matériaux, notamment celle des textiles balistiques, que ce soit dans des domaines de sollicitations quasi-statique ou bien, plus récemment, dans des domaines de sollicitations dynamiques. Ils permettent ainsi d'étudier le comportement mécanique de structures textiles (tissus, fils, filaments) et d'en extraire les paramètres mécaniques qui leur sont propres.

Les dispositifs de traction quasi-statique et de barres Hopkinson permettent d'appliquer respectivement des sollicitations uniaxiales en traction quasi-statique et dynamique sur le fil et d'en extraire la courbe de contrainte appliquée en fonction de la déformation qu'il subit, décrivant ainsi son comportement mécanique. Plus les contraintes et déformations à rupture du fil sont importantes, plus celui-ci peut résister à une sollicitation en traction.

Les essais d'extraction de fils dans leur structure tissée, appelés essais de « yarn pull-out », permettent d'identifier les coefficients de frottements inter-fil qui ont lieu lors d'extractions réalisées à des vitesses de sollicitation quasi-statique et intermédiaire. Ces coefficients sont représentatifs de la cohésion qui réside au sein de la structure tissée. Il a pu être observé que la force nécessaire à l'extraction d'un fil dans sa structure tissée s'accroît avec la vitesse de sollicitation ainsi qu'avec la force de pré-tension à de faibles vitesses de sollicitation. Cela implique alors une augmentation des coefficients de frottement et donc une meilleure cohésion inter-fils dans la structure tissée lors d'une sollicitation en traction. Cette amélioration de la cohésion inter-fils entraîne une propagation plus rapide de la sollicitation entre les fils grâce à leurs points de liages, soit une plus grande quantité de matière sollicitée au sein de la structure tissée qui devient alors plus résistante face à un impact.

Enfin, les essais de tirs transverses sur fils nous permettent de mesurer les vitesses de propagation des ondes longitudinale et transverse au sein de celui-ci. Une augmentation de ces vitesses d'onde a pour effet d'accroître la quantité de matière sollicité le long d'un même fil ce qui donne au matériau fibreux une résistance plus importante aux impacts.

Peu d'études ont été menées sur le dispositif de barres Hopkinson pour définir le comportement mécanique d'un fil balistique de par la flexibilité et l'homogénéité d'un tel matériau. Ce procédé se base sur le principe de propagation d'ondes. Or, les systèmes d'attache actuellement utilisés pour maintenir le fil entre les barres se constitue de plusieurs pièces susceptibles de perturber la propagation des ondes dans le fil.

Dans le même principe que ces dispositifs expérimentaux, nous avons élaboré un nouveau banc d'essai permettant d'étudier le comportement mécanique d'un fil en traction dynamique uniaxiale et dans différentes conditions : seul, dans sa structure tissée, imprégné.

Dans le chapitre qui suit, nous commencerons par une description de ce moyen d'essai et des conditions expérimentales à respecter suivi d'un rapide historique de ses évolutions jusqu'à sa version optimisée. Nous détaillerons ensuite les procédures de traitement du signal qui nous permettent de caractériser le comportement mécanique d'un fil.

CHAPITRE II : LE DISPOSITIF DE TRACTION PAR IMPACT SUR FIL

Sommaire

II.1. Développement du dispositif de traction	74
II.1.1. Principes et Définitions.....	74
II.1.1.1. Le Dispositif de Traction par Impact sur Fil (DTIF)	74
II.1.1.2. Version initiale du dispositif.....	75
II.1.1.3. Conditions de tir à respecter	77
II.1.2. Développement du dispositif et conditions d'essais	78
II.1.2.1. Optimisation du système d'attache du fil.....	78
II.1.2.2. Optimisation de la rupture du fil.....	80
II.1.2.3. Version finale du dispositif.....	83
II.1.2.4. Conditions de tir.....	84
II.2. Dispositif de mesure et traitement des données	85
II.2.1. Le dispositif de mesure laser	85
II.2.1.1. Définition	85
II.2.1.2. Principe	86
II.2.1.3. Calibration	88
II.2.1.4. Validation	89
II.2.2. Traitement de données numériques	91
II.2.2.1. Définition	91
II.2.2.2. Application	92
II.2.2.3. Validation	94
II.2.2.4. Délimitation des phases d'élongation et de rupture du fil	96
CONCLUSION	97

II.1. Développement du dispositif de traction

L'objectif de ce moyen d'essais est d'étudier le comportement mécanique du fil au travers du profil de vitesse d'un projectile exerçant une traction sur celui-ci. Cette variation de vitesse dépend directement des propriétés mécaniques du fil testé. Ainsi, il nous sera possible de définir l'influence de certains paramètres, mécaniques et matériaux, sur le comportement dynamique du fil en observant son évolution. Ces résultats complètent la base de données déjà obtenue grâce aux dispositifs d'essais présentés dans le chapitre précédent.

Ces courbes de vitesse permettront par la suite de dégager les tendances du comportement mécanique du fil en fonction de ces paramètres et dans différentes configurations telles que : le fil seul et le fil dans sa structure tissée ou bien imprégné d'une résine.

Les essais de traction nécessitent d'être réalisés dans de bonnes conditions de tirs afin de pouvoir en extraire des données exploitables. De nombreuses versions du dispositif de traction ont donc été proposées afin de répondre à ces critères.

Dans ce chapitre, nous commencerons par décrire le principe même de notre dispositif ainsi que la première version dans laquelle il a été proposé. Nous aborderons les divers problèmes auxquels nous étions confrontés avec cette version d'origine ainsi que les critères d'essais que nous nous sommes fixés pour réaliser les essais de traction dans de bonnes conditions. Puis nous discuterons des arrangements réalisés sur le design du dispositif afin de résoudre les problèmes rencontrés.

II.1.1. Principes et Définitions

II.1.1.1. Le Dispositif de Traction par Impact sur Fil (DTIF)

Un nouveau banc de traction sur fil en sollicitation dynamique a été développé au sein des laboratoires de l'ISL: le Dispositif de Traction par Impact sur Fil (DTIF). En parallèle, Lopatnikov [91] propose la même idée de développement. Le principe est de propulser au moyen d'un canon à gaz un dispositif à une vitesse initiale V_0 .

Ce dispositif se compose de deux pièces : un support cylindrique, de diamètre égal à celui du diamètre intérieur du canon, et un projectile cylindrique, entre lesquels est fixé le fil à tester. Une réduction de diamètre au bout du canon vient alors stopper l'avancée du support en laissant le projectile poursuivre sa trajectoire à la vitesse V_0 et ainsi exercer une traction uniaxiale sur le fil (Figure 2.).

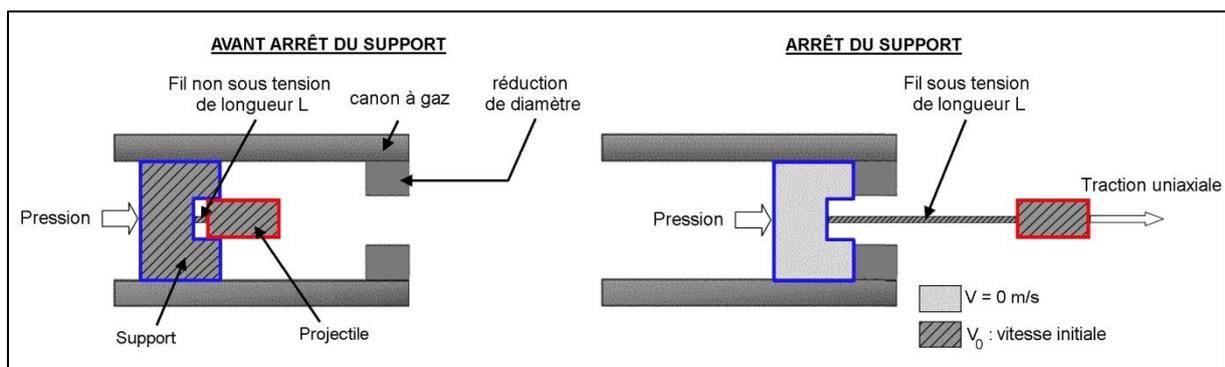


Figure 2.1 : Schéma du dispositif de traction longitudinale sur fil.

II.1.1.2. Version initiale du dispositif

La première version du Dispositif de Traction par Impact sur Fil, proposée en 2012 au sein de l’institut de recherche ISL, a fait l’objet d’une première campagne d’essais dans le cadre de la thèse de M Ha Minh [19]. Cette version initiale du dispositif est schématisée dans la Figure 2.2.

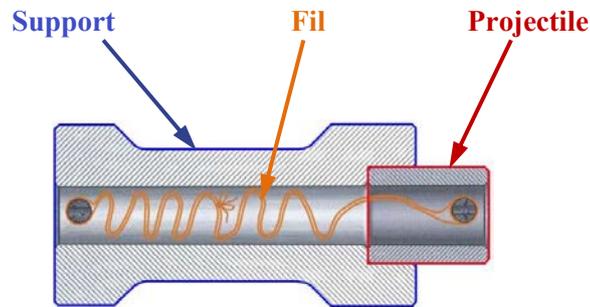


Figure 2.2: Schéma de la version 0 du DTIF.

Le support et le projectile disposent chacun d’un cylindre d’attache pour le fil. Celui-ci est enroulé deux fois autour du cylindre du projectile et une fois autour de celui du support. La longueur de fil testé comporte alors deux fils dont les extrémités sont raccordées par un double nœud.

Cette première version nous a permis de nous familiariser avec ce nouveau moyen expérimental et d’obtenir de premiers résultats sur l’ordre de grandeur de l’énergie à rupture du fil à une vitesse de déformation de 20 m/s.

De plus, la masse du projectile est très faible (1 g), ce qui a permis d’observer une nette variation de la vitesse du projectile.

Cependant, cette version d’origine présente plusieurs inconvénients liés au maintien du fil. En effet, l’enroulement du fil autour du cylindre d’attache du projectile (Figure 2.3) et le double nœud pour raccorder ses extrémités (Figure 2.4) sont des zones d’amorces de rupture par cisaillement dans le fil qui nous renvoient à une mauvaise interprétation du déroulement de l’essai.

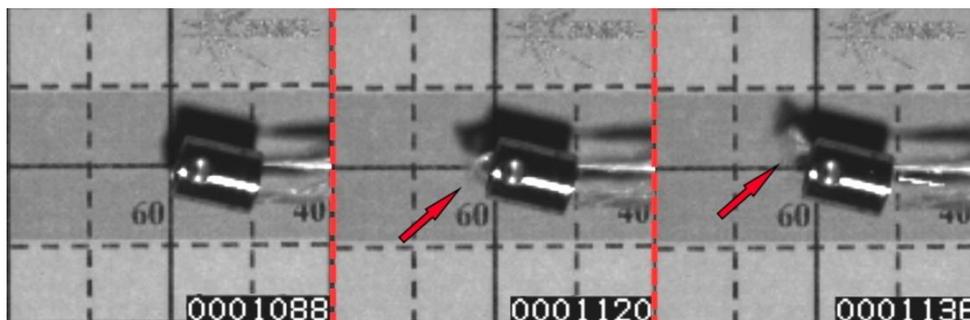


Figure 2.3: Captures vidéo à différents temps (μ s) illustrant l’amorce de rupture par cisaillement dans le fil testé au niveau du cylindre d’attache du projectile _ version initiale du Dispositif de Traction par Impact sur Fil.

De plus, le fil n’est initialement pas droit (Figure 2.5) ce qui rend la direction de la force appliquée inconnue.

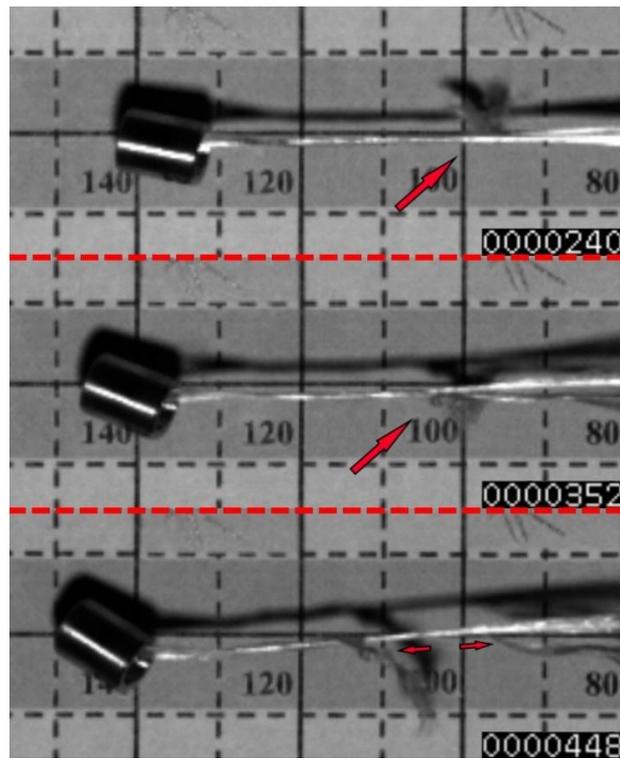


Figure 2.4: Captures vidéo à différents temps (μs) illustrant l'amorce de rupture par cisaillement sur le fil testé au niveau du double nœud _ version initiale du Dispositif de Traction par Impact sur Fil.

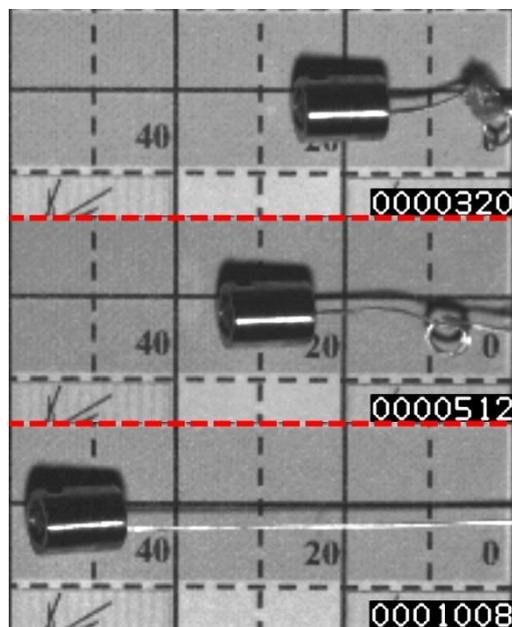


Figure 2.5: Captures vidéo à différents temps (μs) illustrant l'enroulement du fil sur lui-même lors de sa mise en tension _ version initiale du Dispositif de Traction par Impact sur Fil.

II.1.1.3. Conditions de tir à respecter

- Alignement du fil

Il est à la fois nécessaire de maintenir le fil dans l'axe de la sollicitation et de pouvoir guider le projectile dans ce même axe. Ainsi, le projectile applique une traction longitudinale au bout du fil sans composantes transverses.

Parce que la présence de nœuds ou d'enroulements sur le fil engendreraient des amorces de rupture par cisaillement du fil, ce qui fausserait les mesures expérimentales, il est nécessaire de conserver le fil droit.

Enfin, la mise en tension du fil provoque l'entrechoquement des filaments entre eux. Plus le fil est détendu, plus le risque d'endommagement des filaments est important. Cet endommagement du fil à l'échelle des filaments peut alors s'ajouter à celui du fil dû à la traction, et de ce fait, avoir une influence sur les résultats souhaités et fausser les mesures expérimentales.

- Glissement du fil

Un glissement du fil au niveau du support ou du projectile induirait une absorption de l'énergie fournie par le projectile au fil. La rupture du fil ne se déroule alors pas dans les conditions expérimentales souhaitées. De plus, un glissement du fil fausserait l'analyse du déplacement du projectile lors de l'essai. Il est donc important que le fil ait une bonne adhérence au niveau des systèmes d'attache du support et du projectile.

- Rupture du fil

Une rupture du fil dans le projectile ou dans le support indiquerait un mauvais maintien du fil à ses extrémités. Ces ruptures ne correspondent pas à la rupture du fil en lui-même et faussent les mesures expérimentales. Il est donc nécessaire que la rupture ait lieu dans la longueur utile testée du fil.

- Masse du projectile

La masse du projectile doit être adaptée au fil testé. En effet, l'énergie fournie au fil par le projectile doit être supérieure à celle nécessaire à sa rupture et bien inférieure à celle obtenue avec une vitesse critique V_{CR} du projectile, définie dans le chapitre I (§ I.2.1.2.), correspondant à une rupture instantanée du fil sans élongation. Cette énergie fournie au fil doit rester suffisamment proche de son énergie à rupture pour pouvoir observer de façon précise les phénomènes d'élongation et de rupture du fil.

Après avoir défini les différents critères à respecter durant chacun des essais pour qu'ils aient lieu dans des conditions de tirs correctes et répétables, nous allons détailler les évolutions du dispositif de sa version initiale à sa dernière version fonctionnelle.

II.1.2. Développement du dispositif et conditions d'essais

II.1.2.1. Optimisation du système d'attache du fil

- Alignement du fil et guidage du projectile

Les designs du support et du projectile ont été entièrement redéfinis dans le but de maintenir le fil dans l'axe de la sollicitation et d'éviter la présence d'amorces de rupture.

La géométrie du support a donc été pensée de façon à distancer le projectile d'une longueur l_0 par rapport au système d'attache du fil qu'il comporte. Le système d'attache du support, tout comme celui du projectile, se compose d'une vis creuse, d'une pièce de resserrage cylindrique et de deux pièces de maintien (Figure 2.6).

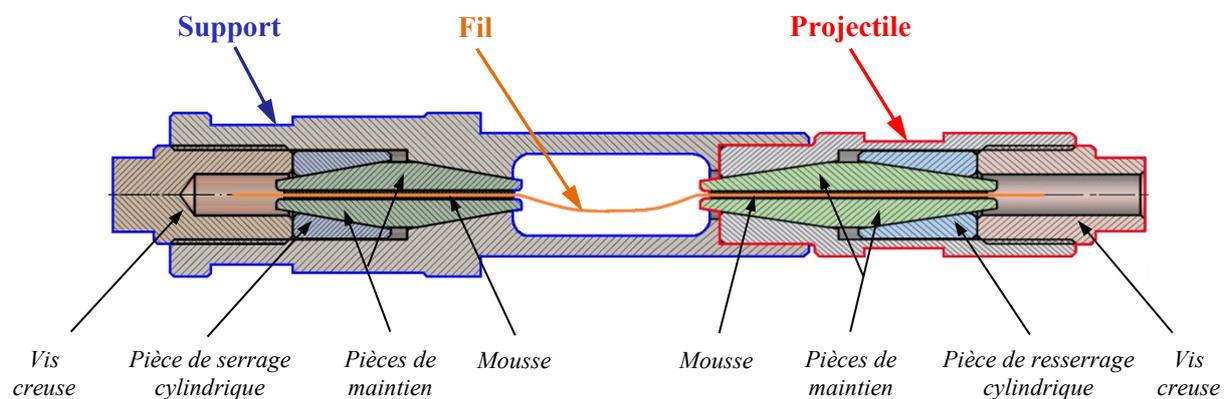


Figure 2.6: Modification complète de la géométrie de la version d'origine du dispositif de traction.

Lors du montage du système d'attache dans le support, la vis, une fois serrée, exerce une force sur la pièce de resserrage cylindrique qui, à son tour, exerce une force sur les pièces de maintien. Celles-ci appliquent alors une force de compression transverse sur la longueur du fil.

Malgré une amélioration du temps d'alignement du fil qui passe de $624 \mu\text{s}$ (Figure 2.5) à $80 \mu\text{s}$ (Figure 2.7), on observe un problème d'alignement du fil qui intervient lors de sa fixation au niveau du projectile. Du fait de la géométrie des pièces de maintien, la compression transverse exercée par la pièce de resserrage cylindrique sur celles-ci va générer simultanément une compression axiale vers l'intérieur du dispositif. L'extrémité du fil étant fixe au niveau du support, sa longueur se voit donc augmenter et être supérieure à la longueur utile l_0 supposée (Figure 2.8).

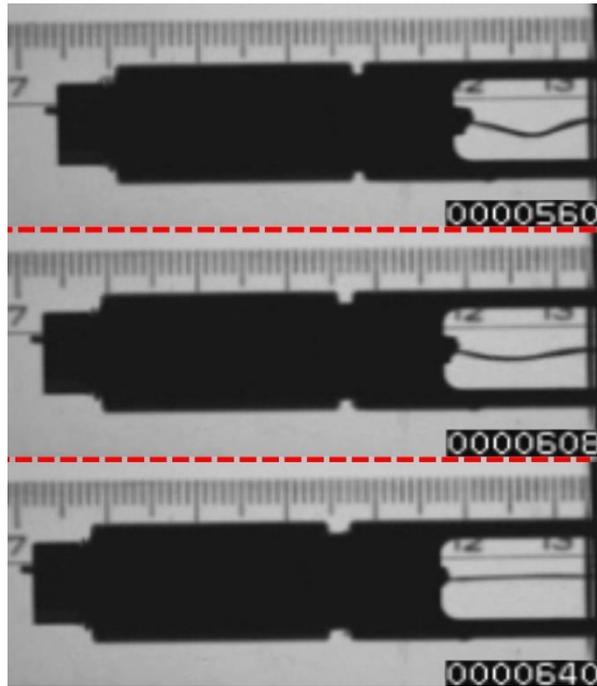


Figure 2.7 : Captures vidéo à différents temps (μs) illustrant le temps d'alignement du fil.

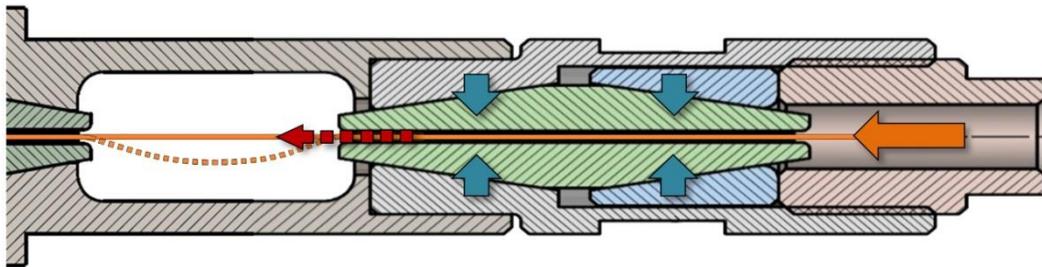


Figure 2.8: Schéma du montage du système d'attache dans le projectile créant une détente du fil.

Pour parer à ce problème d'alignement du fil, la géométrie des systèmes d'attache dans le projectile et le support a donc été modifiée (Figure 2.9).

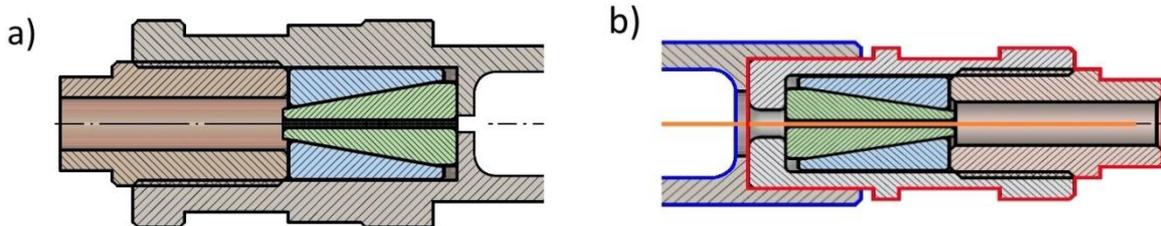


Figure 2.9: Modification de la géométrie du support (a) et du projectile (b) pour parer au problème d'alignement du fil.

- Glissement du fil

Afin d'éviter la présence de contraintes au contact direct des pièces de maintien contre le fil, une fine couche de mousse en polyuréthane est rajouté sur chacune de leur surface. La mousse permet également de comprimer le fil sur toute sa surface et non partiellement ce qui implique une meilleure adhérence du fil et ainsi moins de possibilité de glissement (Figure 2.10). Le coefficient de frottement du contact fil (polymère) / mousse (polymère) augmente avec la vitesse de sollicitation [23] mais n'est pas suffisamment élevé dans notre cas pour éviter le glissement du fil dans notre gamme de vitesse. Une fine couche de résine époxy est ajoutée entre les couches de mousse et le fil afin de consolider l'ensemble et empêcher le fil de glisser.

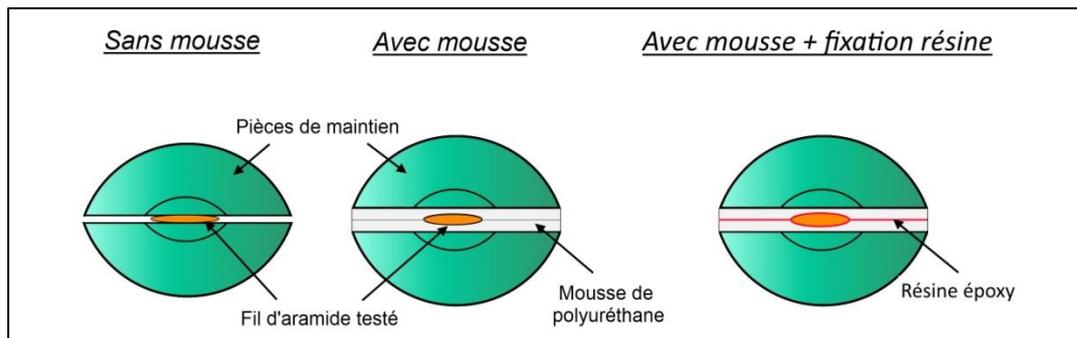


Figure 2.10 : Schéma d'une coupe transversale au niveau des pièces de maintien, sans mousse (à gauche) et avec mousse (à droite).

II.1.2.2. Optimisation de la rupture du fil

- Masse du projectile

De premiers essais réalisés avec la version modifiée du projectile (Figure 2.11) nous permettent de constater que la différence entre les vitesses initiale et finale est peu remarquable. Ceci s'explique par une masse trop importante du projectile (6g) qui lui confère une énergie bien supérieure à celle nécessaire à la rupture du fil. De ce fait, l'absorption d'énergie par le fil est masquée par l'énergie fournie au fil lors de l'essai et les phénomènes d'élongation et de rupture du fil ne sont pas remarquables.

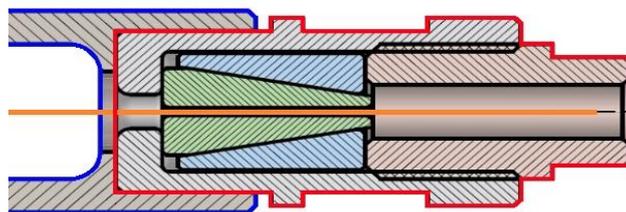


Figure 2.11 : Première version modifiée de la géométrie du projectile.

Le design et la composition du projectile a donc été entièrement repensé afin de l'alléger tout en conservant un bon maintien du fil (Figure 2.12).

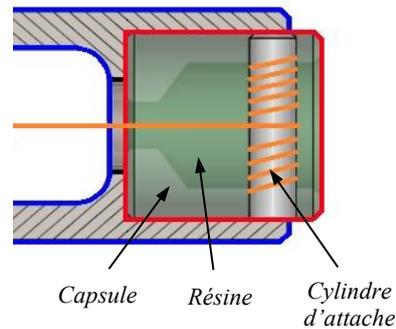


Figure 2.12: Deuxième version modifiée de la géométrie du projectile.

La masse du projectile seul, en plus de son enrobage, permet d'atteindre la rupture d'un fil de 2 cm avec une vitesse minimale de 30 m/s. Afin d'élargir notre gamme de vitesse, la masse du projectile est augmentée avec l'ajout d'une masse supplémentaire (Figure 2.13). Ainsi, il nous est possible d'atteindre la rupture d'un fil de 2 cm avec une vitesse initiale de traction de 20 m/s.

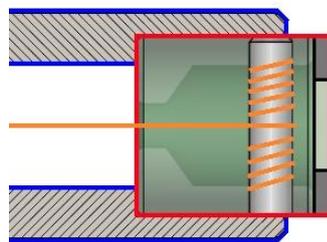


Figure 2.13 : Ajout d'une masse supplémentaire au projectile.

- La réalisation du projectile

Le projectile se compose d'un cylindre d'attache autour duquel le fil est enroulé plusieurs fois (Figure 2.14_n°1). La courbure du cylindre, plus grande que celle des cylindres présents dans la version initiale du Dispositif de Traction par Impact sur Fil, permet d'éviter une concentration de contrainte et donc une amorce de rupture dans le fil.

La capsule est ensuite introduite dans un moule en téflon adapté (Figure 2.14_n°2) pour pouvoir y déverser une résine polyester qui va figer le fil dans la capsule et empêcher ainsi tout glissement (Figure 2.14_n°3). Afin d'empêcher la résine d'imprégner par capillarité la longueur utile du fil, de l'eau est introduite par-dessus une pièce de séparation (Figure 2.14_n°4). La capsule est démoulée après polymérisation de la résine (Figure 2.14_n°5).

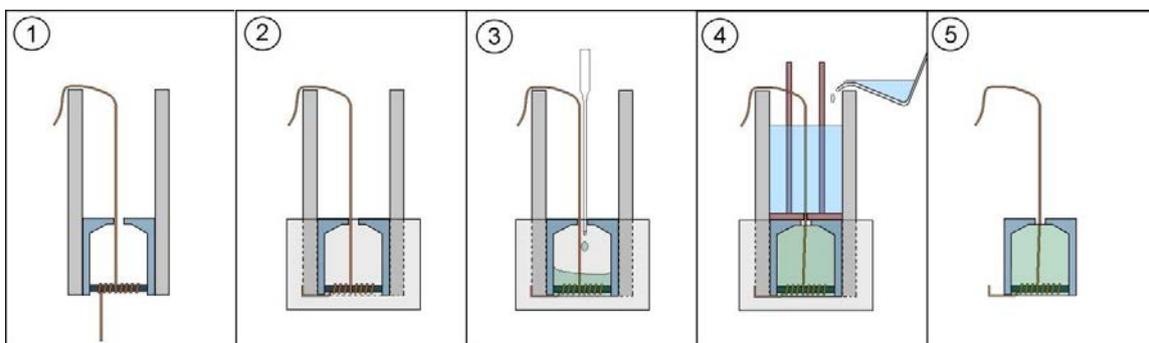


Figure 2.14 : Schémas des différentes étapes de production d'un échantillon de fil d'aramide dans le projectile de polycarbonate.

II.1. Développement du dispositif de traction

Le choix de l'eau comme fluide pour contrer la capillarité de la résine dans le fil s'est fait selon deux critères :

- Le contact de l'eau sur le fil pendant une période de 24 heures, à température ambiante et pH neutre, n'a aucun effet sur ses propriétés mécaniques.
- Le débit volumique (m^3/s) de l'eau Q_{eau} est supérieur à celui de la résine $Q_{résine}$.

En effet, d'après la loi de Darcy :

$$Q = K \cdot A \cdot \frac{\Delta H}{L} \quad (2.1)$$

Avec K le coefficient de perméabilité du milieu poreux (m/s), A la surface de la section du fil (m^2) et $\frac{\Delta H}{L}$ le gradient hydraulique.

Le coefficient de perméabilité dépend à la fois des propriétés du milieu poreux et de la viscosité du fluide tel que :

$$K = \frac{k \cdot g}{\nu} \quad (2.2)$$

Avec k la perméabilité (m^2) du matériau, g l'accélération de la pesanteur (m/s^2) et ν la viscosité cinématique du fluide (m^2/s).

Si l'on compare les débits volumiques de l'eau et de la résine, nous obtenons à l'aide des formules (2.1) et (2.2) :

$$\frac{Q_{résine}}{Q_{eau}} = \frac{\nu_{eau}}{\nu_{résine}} < 1 \quad (2.3)$$

L'eau étant beaucoup plus fluide que la résine ($\nu_{eau} \ll \nu_{résine}$). Elle va imprégner le fil plus rapidement que la résine et ainsi l'empêcher d'imprégner la longueur utile de fil à tester.

Enfin, l'énergie fournie au fil E_f par le projectile doit être supérieure ou égale à l'énergie nécessaire à la rupture du fil $E_{rupt\ fil}$:

$$E_f = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V_i^2 \geq E_{rupt\ fil} \quad (2.4)$$

Avec m la masse du projectile et V_i la vitesse initiale de propulsion du projectile.

II.1.2.3. Version finale du dispositif

- Fil seul

Après modification de la géométrie du système d'attache dans le support, nous obtenons une dernière version (Figure 2.15 et Figure 2.16) compatible avec les critères définis initialement.

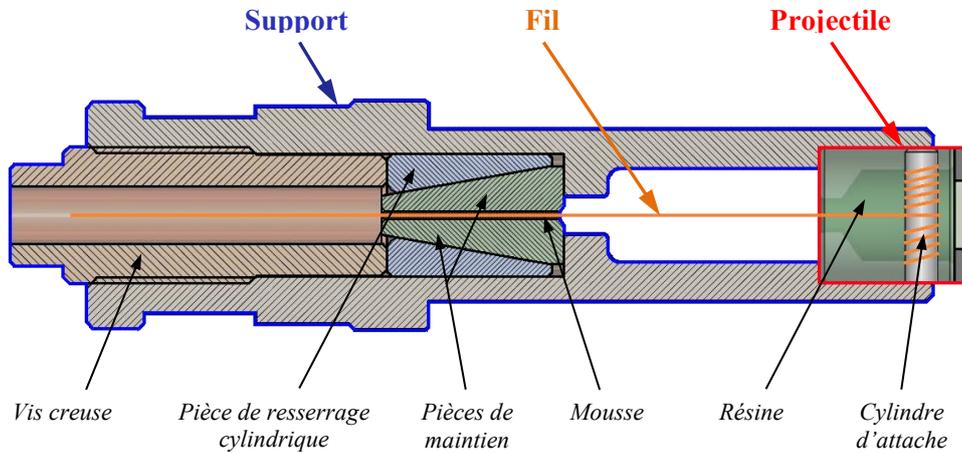


Figure 2.15 : Schéma de la dernière version du Dispositif de Traction par Impact sur Fil.

Cette version est déclinée sous deux formes de façon à tester des fils de 2 cm et des fils de 5 mm.

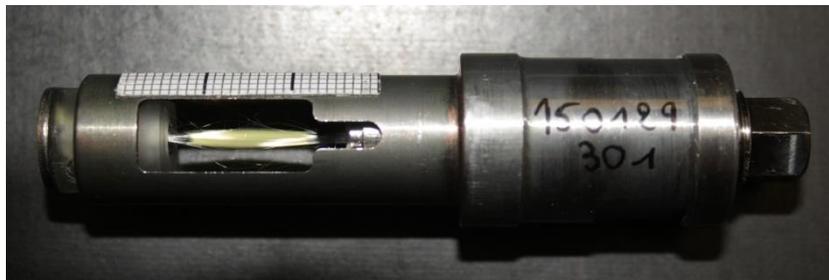


Figure 2.16 : Photo du Dispositif de Traction par Impact sur Fil pour tester des fils de 2 cm.

- Fil dans sa structure tissée

La version « 2 cm » permet de tester des fils seuls mais également des fils dans leur structure tissée (Figure 2.17). Les échantillons sont découpés comme décrit dans la Figure 2.18.

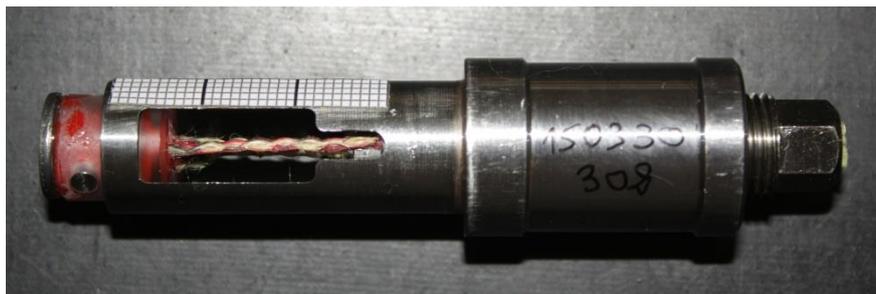


Figure 2.17 : Photo du Dispositif de Traction par Impact sur Fil adapté au test sur fil de 2 cm testé dans sa structure tissée.

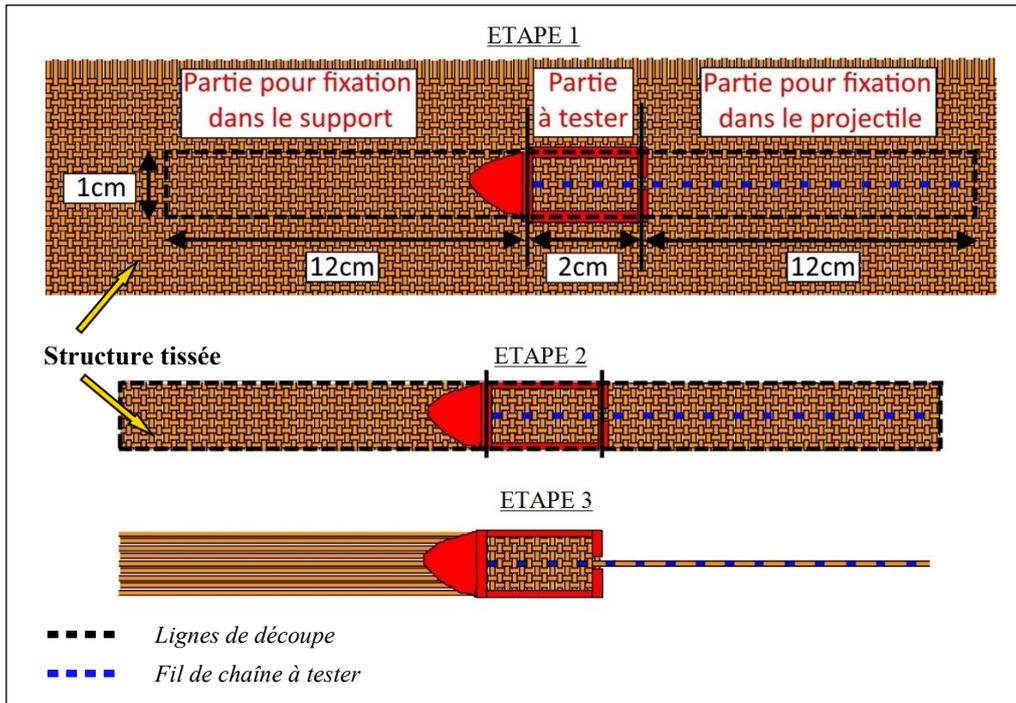


Figure 2.18 : Illustrations des trois étapes dans la préparation des échantillons de fils testés dans leur structure tissée.

II.1.2.4. Conditions de tir

Dans notre cas d'étude, nous utilisons un canon à gaz qui nous permet d'atteindre des vitesses comprises entre 20 et 50 m/s. En effet, avec un projectile d'une masse totale de 2,6 g, il est possible d'atteindre la rupture d'un fil de 2 cm à une vitesse de propulsion minimale de 20 m/s.

L'embout du canon, qui comprend une réduction de diamètre pour stopper le support, est une pièce réalisée en acier inoxydable tandis que le support est en acier simple (acier 11SMnPb37). Il est possible d'atteindre une vitesse de propulsion de 50 m/s. Au-delà de cette vitesse, le support subirait une déformation plastique dû à l'impact contre l'embout ce qui, à la fois, fausserait la mesure du déplacement du projectile et rendrait le support non-réutilisable.

Le Dispositif de Traction par Impact sur Fil peut donc être propulsé au travers du canon à une vitesse comprise entre 20 et 50 m/s.

Une première version du Dispositif de Traction par Impact sur Fil a été mise au point mais celle-ci présentait des inconvénients majeurs pour la caractérisation du comportement dynamique des fils. De nombreuses améliorations ont alors été apportées au niveau de la géométrie du dispositif ainsi qu'au niveau du maintien du fil. Après avoir proposé quatre versions différentes, nous sommes arrivés à une dernière version opérationnelle du Dispositif de Traction par Impact sur Fil permettant de respecter toutes les conditions de tirs nécessaires à la bonne réalisation des essais de traction sur fil.

Dans la suite de ce chapitre, nous décrivons les procédés de mesures expérimentaux que nous utilisons pour notre moyen d'essai ainsi que la procédure de traitement des données mis en place afin d'obtenir des résultats optimaux.

II.2. Dispositif de mesure et traitement des données

II.2.1. Le dispositif de mesure laser

II.2.1.1. Définition

Afin d'obtenir le profil de vitesse du projectile, nous utilisons un dispositif de mesure laser basé sur le principe développé par Starratt et al. [92] en 2000 et couplé à un laser discontinu.

Ce dispositif utilise la détection de position par projection d'ombre du projectile à travers un faisceau laser homogène. Un laser continu est émis et passe au travers d'un séparateur de faisceau lumineux. Cette dispersion de faisceaux lumineux passe ensuite à travers une lentille convexe afin de les paralléliser les uns par rapport aux autres et d'obtenir un faisceau laser continu. Lors du passage du projectile devant ce faisceau laser continue, la variation du flux lumineux qui en découle est mesurée par une photodiode puis retranscrite sous forme de tension électrique à l'aide d'un oscilloscope (Figure 2.19 et Figure 2.20).

Comme il est décrit dans la suite de ce chapitre, la tension mesurée permet, grâce à une calibration, de retrouver le déplacement du projectile. De là, un traitement de données numérique nous amène à retrouver le profil de vitesse du projectile.

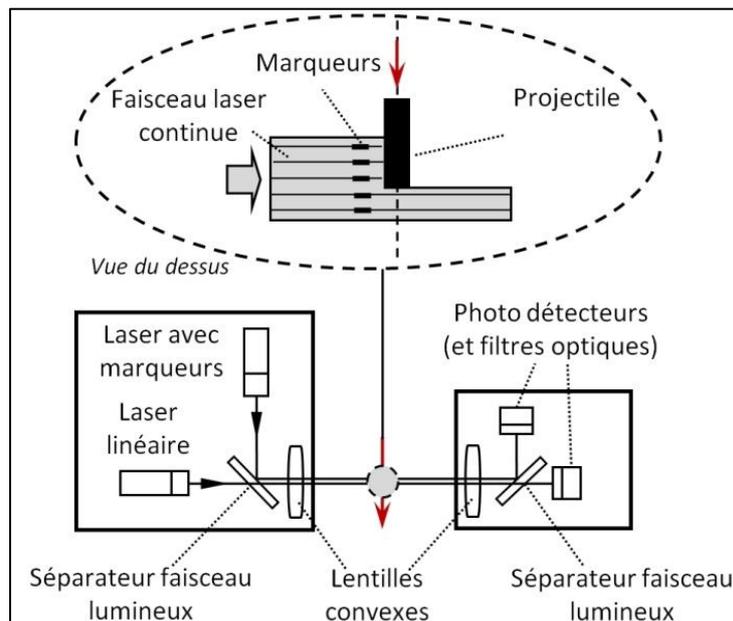


Figure 2.19 : Schéma du dispositif de mesure laser.

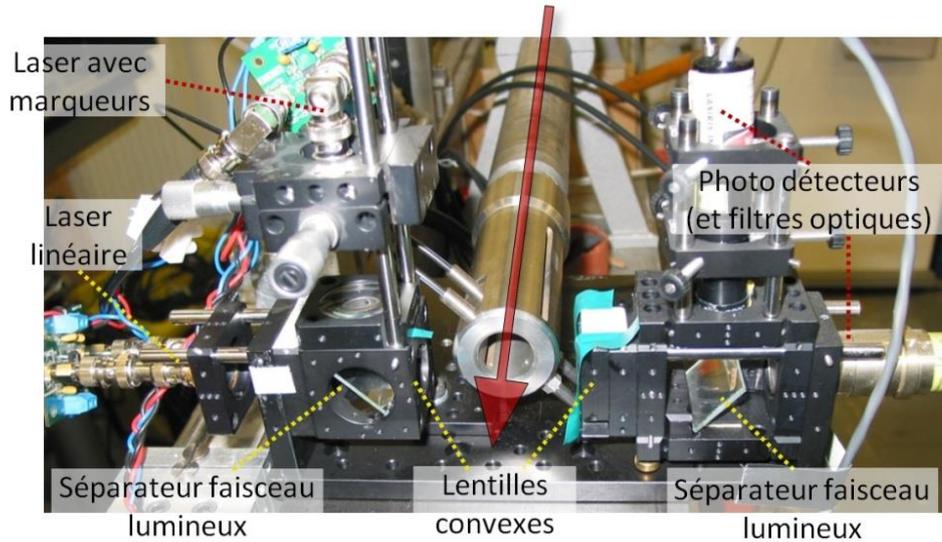


Figure 2.20 : Photo du dispositif de mesure laser.

Afin de corrélérer le positionnement du faisceau laser avec celui du projectile à chaque moment de l'essai, nous utilisons un second faisceau laser que l'on superpose au premier. Il se compose de cinq marqueurs dont les distances entre eux et par rapport à l'embout du canon sont connues (Figure 2.21). Ainsi, il est possible d'étudier chacun des signaux dans le même intervalle de données.

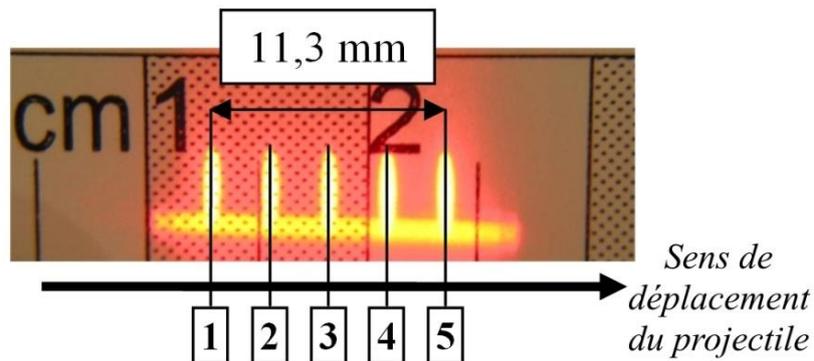


Figure 2.21 : Photo du faisceau laser discontinu composé de cinq marqueurs.

II.2.1.2. Principe

Le support et le projectile du dispositif sont propulsés le long du canon. Jusqu'à ce que le support soit arrêté par l'embout du canon, le projectile débute son passage devant le faisceau lumineux à une vitesse initiale V_0 sans exercer de traction sur le fil (Figure 2.22 et Figure 2.23_n°1).

Dès l'arrêt du support à un moment t , le projectile commence à exercer une traction uniaxiale sur le fil qui subit une élongation Δl_t . Les propriétés mécaniques du fil lui permettent de répondre par une force opposée freinant ainsi l'avancée du projectile qui possède alors une nouvelle vitesse $V_{t+\Delta t}$ telle que $V_{t+\Delta t} < V_t$. Ainsi, la variation d'intensité lumineuse qui en découle est enregistrée par la photodiode (Figure 2.22 et Figure 2.23_n°2). Ce phénomène d'élongation du fil, durant lequel il oppose une résistance contre la force de traction appliquée, continue jusqu'à atteindre le début de sa rupture (voir § II.2.2.4. Délimitation des phases d'élongation et de rupture du fil). Durant ce

phénomène de rupture progressive du fil, celui-ci continue de s'allonger et d'opposer une force contraire à celle appliquée. La vitesse du projectile continue donc de baisser jusqu'à la rupture complète du fil (Figure 2.22 et Figure 2.23_n°3) où le projectile atteint sa vitesse résiduelle V_r telle que $V_r < V_{i+\Delta t}$. La variation d'intensité lumineuse décroît proportionnellement à celle de la vitesse du projectile.

Après rupture complète du fil, le projectile conserve sa vitesse résiduelle en continuant de traverser le faisceau lumineux (Figure 2.22 et Figure 2.23_n°4, n°5 et n°6).

La variation d'intensité lumineuse mesurée par la photodiode est convertie en tension. Nous obtenons ainsi le graphe présenté dans la Figure 2.23.

Seules les phases 1 à 4, qui correspondent respectivement aux phases d'avant rupture, d'élongation, de rupture et d'après rupture du fil, nous intéressent dans la suite de notre étude.

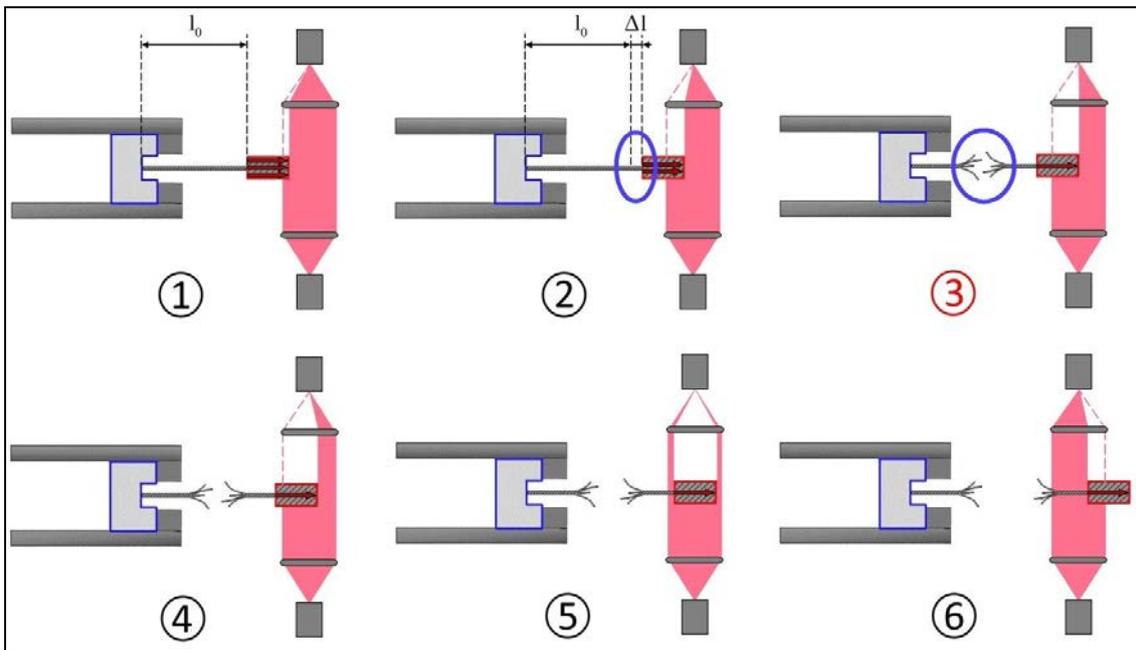


Figure 2.22 : Schémas des différentes étapes de passage théoriques du projectile à travers le faisceau laser.

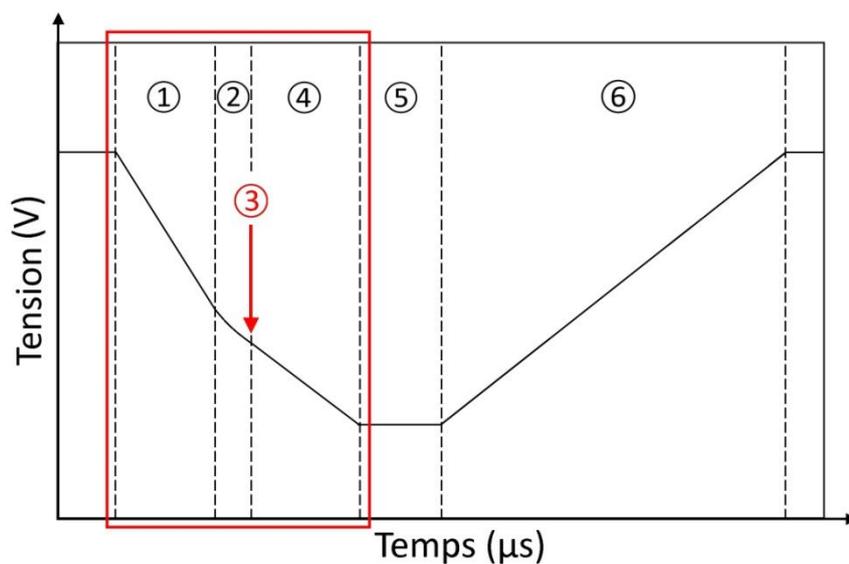


Figure 2.23 : Courbe de tension en fonction du temps déterminé à partir de la mesure de la variation d'intensité lumineuse dû au passage du projectile.

II.2.1.3. Calibration

Afin de pouvoir obtenir une mesure du déplacement du projectile, il est nécessaire de réaliser au préalable une calibration du dispositif de mesure par rapport au déplacement du projectile.

Plusieurs essais sans fil sont ainsi réalisés à différentes vitesses, correspondant à différentes pressions de tir, afin d'établir la relation qui relie la tension mesurée V au déplacement du projectile D (Figure 2.24).

Les essais représentés sur les Figures Figure 2.24 et Figure 2.25 nous permettent ainsi d'établir la relation suivante entre le déplacement du projectile D et la tension mesurée V :

$$D = \frac{V_{max} - V}{A} \tag{2.5}$$

Avec V_{max} la tension maximale mesurée et A le coefficient de conversion entre la tension et le déplacement.

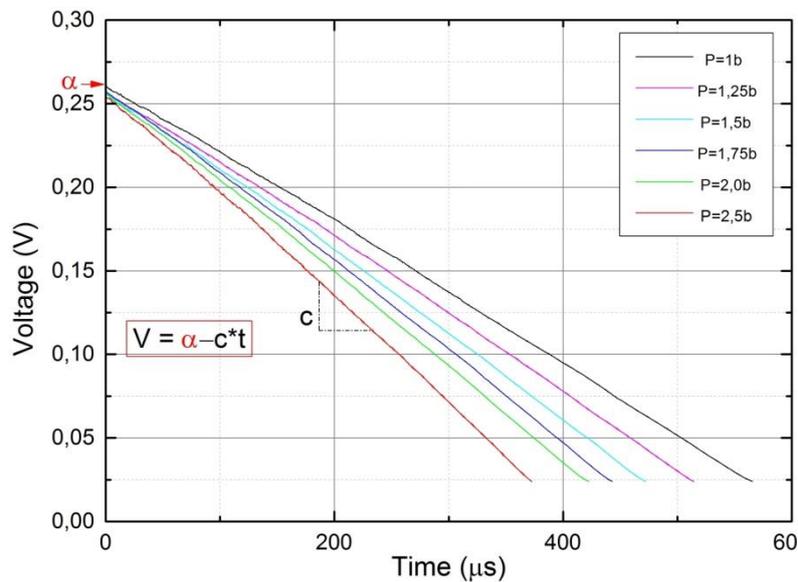


Figure 2.24 : Variation de la tension mesurée en fonction du temps à différentes pressions appliquées.

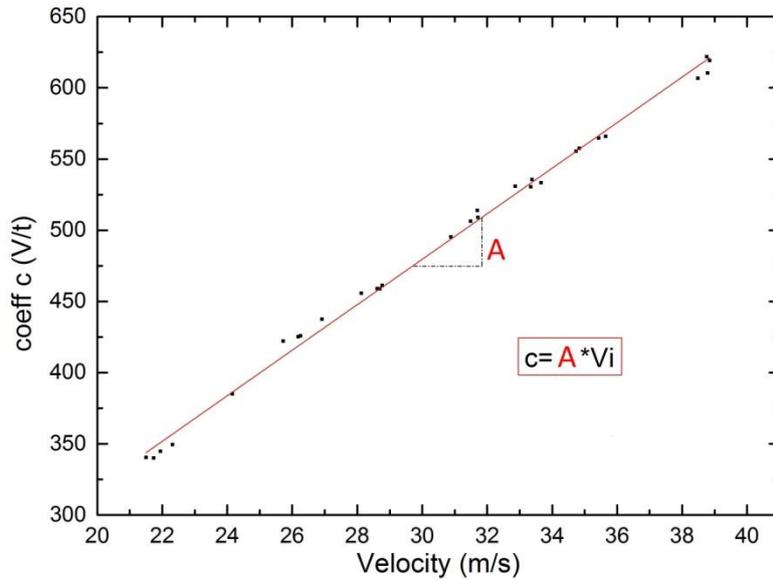


Figure 2.25 : Relation entre le coefficient directeur c et la vitesse.

II.2.1.4. Validation

Pour s'assurer du bon fonctionnement du dispositif de mesure laser et de la validité des données extraites, une vérification de mesure est réalisée sur les données de tension en fonction du temps. Cette vérification consiste à calculer la longueur du projectile.

La mesure de la tension mesurée suite au passage du projectile à travers le faisceau laser continue est représentée sur la Figure 2.26 :

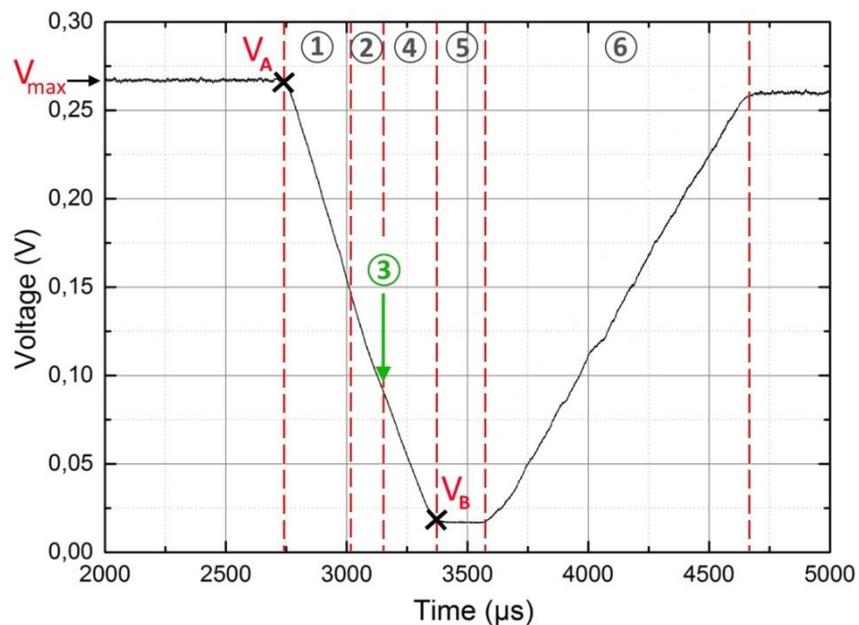


Figure 2.26 : Variation de la tension mesurée en fonction du temps lors d'un essai avec le DTIF sans fil.

La longueur du projectile l_{proj} se calcule suivant la formule [92]:

$$l_{proj} = \frac{l_{laser}}{V_{max} - V_{min}} (V_A - V_B) \quad (2.6)$$

Avec l_{laser} la longueur du faisceau laser continu, V_{max} la tension maximale qu'il est possible d'obtenir avec le faisceau laser, V_{min} la tension minimale qu'il est possible d'obtenir en obturant complètement le faisceau laser, V_A la tension au point A correspondant à l'entrée de la première extrémité du projectile dans le faisceau laser, et V_B la tension au point B correspondant à l'entrée de la seconde extrémité du projectile dans le faisceau laser. V_A est toujours égale à V_{max} tandis que V_B est supérieure ou égale à V_{min} si, respectivement, la longueur du projectile est plus petite ou égale à la longueur du faisceau laser continu.

Le Tableau 2.1 répertorie les longueurs calculée et mesurée du projectile. L'erreur est seulement de 3% ce qui permet de valider l'utilisation de ce dispositif de mesure laser.

Longueur calculée (mm)	Longueur mesurée (mm)
12,6	12,2

Tableau 2.1 : Longueur du projectile, calculée à l'aide du dispositif de mesure laser, et mesurée à l'aide d'un pied à coulisse.

Une campagne d'essais a été réalisée avec notre dispositif de traction sans fil. La vitesse du projectile est mesurée à l'aide d'une barrière optique située en bout de canon. Il nous est alors possible de redéfinir le profile théorique de déplacement du projectile et de le comparer avec son profile réel obtenu grâce à la mesure de tension.

Nous obtenons alors la Figure 2.27 représentant le pourcentage d'erreur de la mesure de tension par la photodiode sur toute la longueur du faisceau laser continu. La mesure de la tension pour chaque essai, entre le début de la tension exercée sur le fil et sa rupture (représenté en rouge), est inférieure ou égale à 5%. L'erreur de mesure de la tension est donc suffisamment faible pour pouvoir valider notre dispositif de mesure laser.

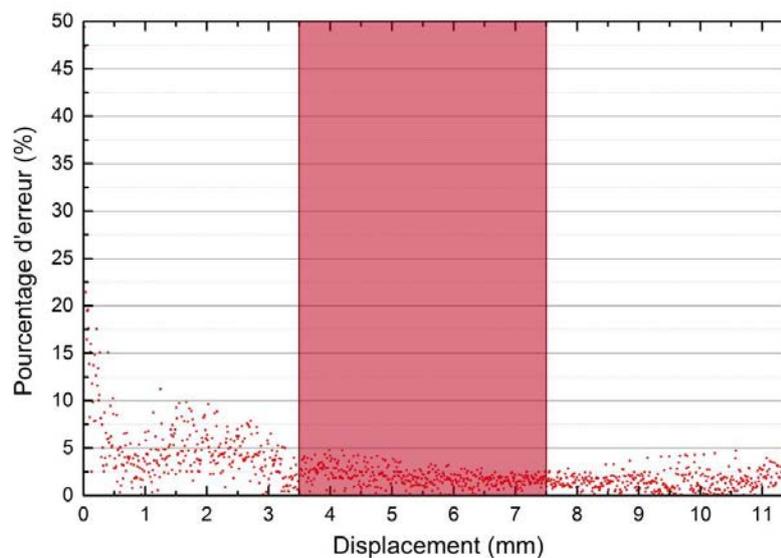


Figure 2.27 : Pourcentage d'erreur de la mesure de tension par la photodiode sur toute la longueur du faisceau laser continu _représentation des phases 1 à 4 (en rouge).

II.2.2. Traitement de données numériques

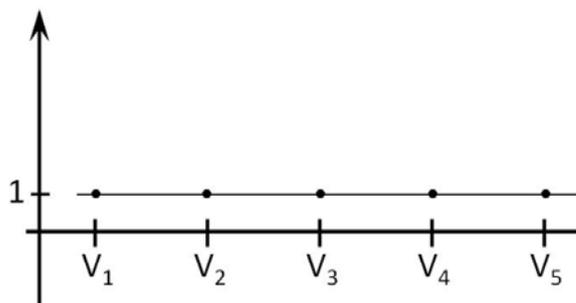
II.2.2.1. Définition

Pour obtenir les profils de vitesse du projectile que nous souhaitons étudier, un traitement des données expérimentales obtenues est nécessaire. La présence de câbles électriques et de diverses machines aux alentours du banc d'essai génèrent des champs électromagnétiques qui viennent perturber les signaux électriques que nous mesurons. Ces perturbations aléatoires, ou « bruits », s'ajoutent à l'information principale, dans notre cas il s'agit de la variation d'intensité lumineuse. Il faut alors pouvoir extraire ce bruit sans déformer, réduire, voire supprimer totalement l'information principale.

La méthode Savitzky-Golay est un algorithme de lissage permettant de conserver l'information tout en réduisant le bruit à l'aide d'une régression polynomiale effectuée sur un intervalle de longueur $2i+1$ centré en x , $[x-i; x+i]$. Une régression polynomiale de degré 2 permet de conserver au mieux les courbures générales de la courbe traitée. Cette régression va induire une pondération progressive des valeurs de l'intervalle, à l'aide de coefficients appelés « nombres entiers de convolution », afin de déterminer la valeur « lissée » de x .

Exemple de traitement du signal par régression polynomiale de degré 2 sur un intervalle de 5 valeurs :

Initialement, les valeurs de l'intervalle entre t_0 et t_4 , centré en V_3 , ont toutes une pondération de « 1 » (Figure 2.28).



Temps	Tension
s	V
t_0	V_1
t_1	V_2
t_2	V_3
t_3	V_4
t_4	V_5
t_5	V_6
t_6	V_7
t_7	V_8

Figure 2.28 : Graphe explicite de pondération des valeurs avant traitement.

La suite de nombres entiers de convolution pour une régression polynomiale de degré 2 sur un intervalle de 5 valeurs est : -3, 12, 17, 12 et -3. Ces coefficients sont affectés à chacune des valeurs correspondantes (Figure 2.29).

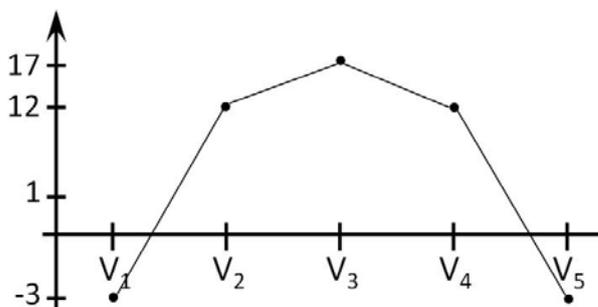


Figure 2.29 : Graphe explicite de pondération des valeurs après traitement.

La valeur « lissée » de x est alors calculée suivant la formule :

$$\frac{1}{N} \sum_{k=x-i}^{x+i} c_k \cdot V_k \quad (2.7)$$

Avec N la normalisation correspondant à la somme des coefficients de convolution, c_k les coefficients de convolution et V_k les valeurs de l'intervalle.

Après traitement numérique de la valeur V_3 , la fenêtre de lissage se déplace sur l'intervalle $[t_1; t_5]$ pour continuer le lissage sur la valeur V_4 . Le lissage s'effectue ainsi tout le long de l'axe des abscisses.

II.2.2.2. Application

Le signal obtenu expérimentalement est dérivé afin d'obtenir le déplacement du projectile en fonction du temps. Un premier lissage, de degré 2 sur un intervalle de 900 points (S900), est appliqué sur cette courbe (Figure 2.30). La zone bleutée délimite les phases à étudier soient les phases 1 à 4.

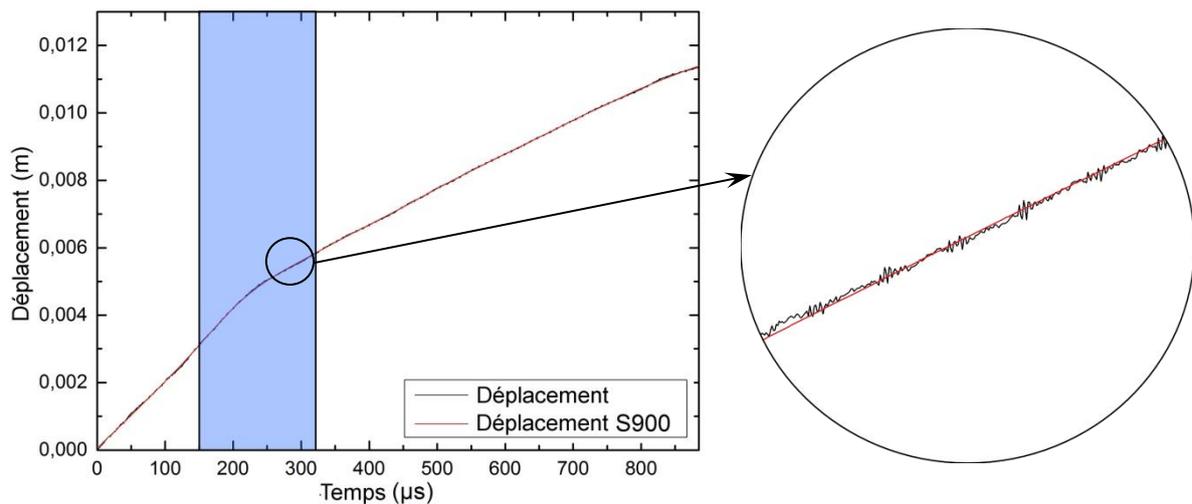


Figure 2.30 : Lissage de la courbe de déplacement du projectile en fonction du temps avec représentation des phases 1 à 4 (zone bleutée).

Afin d'obtenir la variation de vitesse du projectile, la courbe de déplacement est dérivée en fonction du temps. Un second lissage, de degré 2 sur un intervalle de 400 valeurs (S400), est alors appliqué sur cette dernière (Figure 2.31).

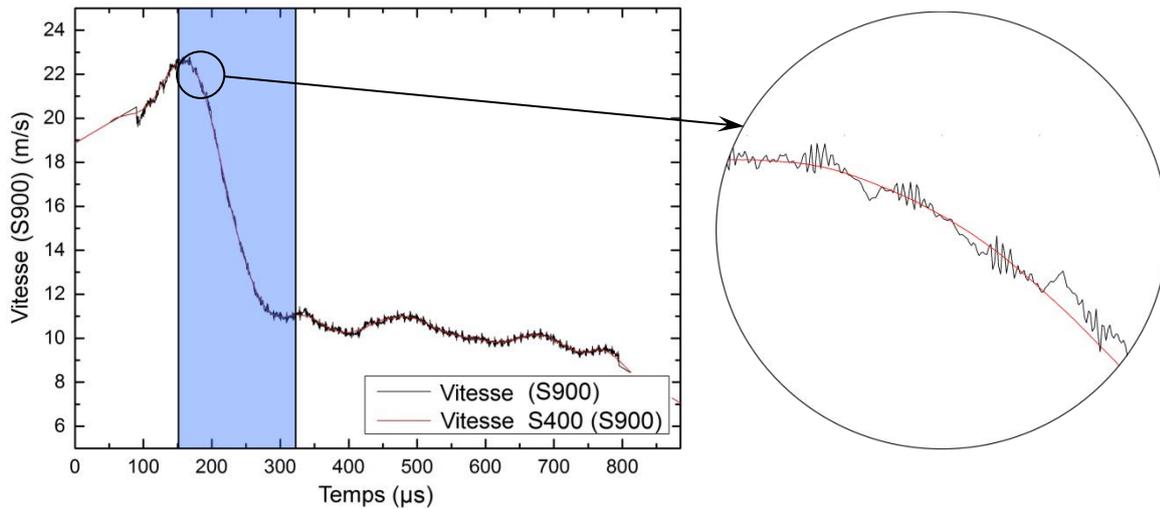


Figure 2.31 : Lissage de la courbe de vitesse du projectile en fonction du temps avec représentation des phases 1 à 4 (zone bleutée).

Grâce à la calibration du canon ainsi qu'au traitement numérique par régression polynomiale, la courbe de vitesse du projectile en fonction du temps a pu être obtenue à partir de la mesure d'intensité lumineuse effectuée par le système de mesure laser (Figure 2.32).

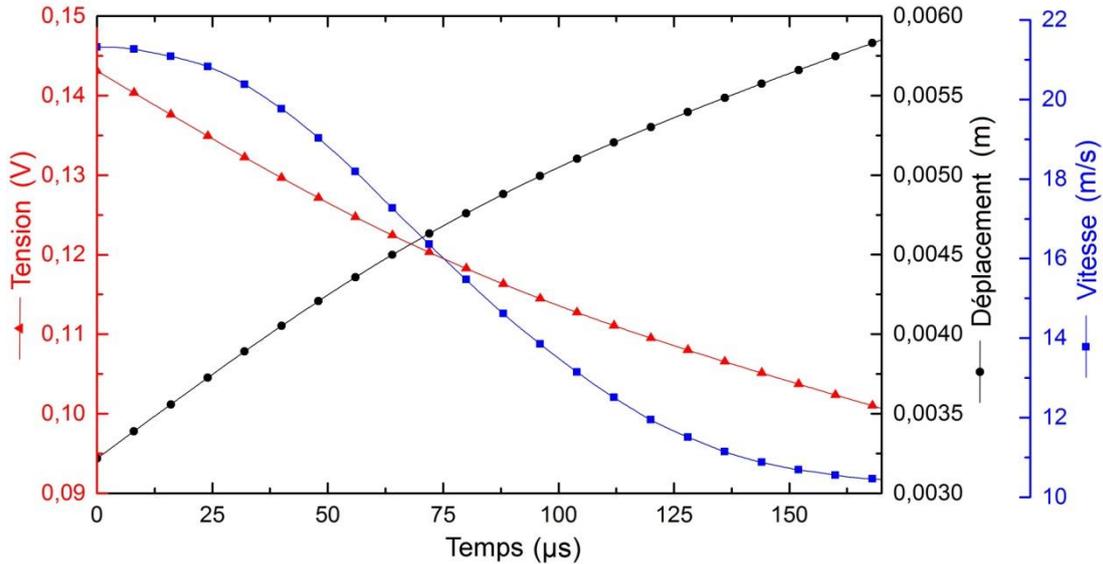


Figure 2.32 : Courbe de tension (rouge), de déplacement du projectile (noir) et de la vitesse du projectile (bleu) en fonction du temps durant les phases 1 à 4.

II.2.2.3. Validation

En dernier lieu, il est nécessaire de valider la cohérence des données obtenues avec la réalité de l'essai. Pour cela, nous réalisons une campagne d'essais avec la présence de deux dispositifs de mesure (Figure 2.33): notre dispositif de mesure laser et un dispositif de mesure par photo-vélocimétrie, appelé PDV (Photo Doppler Velocimetry).

Le PDV se compose de plusieurs éléments [10]: un laser monochromatique dont le flux lumineux circule au travers d'une fibre optique, un circulateur permettant de séparer le flux revenant de la cible de celui qui l'éclaire, une sonde optique située en bout de fibre optique et permettant à la fois d'éclairer et de collecter la lumière retour, et une chaîne d'acquisition opto-électronique composée d'une photodiode, d'un amplificateur et d'un numériseur.

Ce dispositif de mesure se base sur l'effet Doppler en mesurant le décalage en fréquence entre un faisceau lumineux émis et le faisceau lumineux réfléchi contre la surface du projectile. Cette variation de fréquence est mesurée au cours du temps durant tout l'essai. Après avoir été amplifié, l'amplitude de la variation de fréquence est représentée en fonction du temps. A l'aide d'une transformée de Fourier, le signal est ensuite traité afin d'obtenir le profil de vitesse du projectile en fonction du temps (Figure 2.34).

Les mesures effectuées par le vélocimètre permettent ainsi d'obtenir une mesure assez précise de la variation de vitesse du projectile. Nous avons alors exploité cette méthode de référence pour corroborer les résultats obtenus avec la méthode par laser (Figure 2.35).

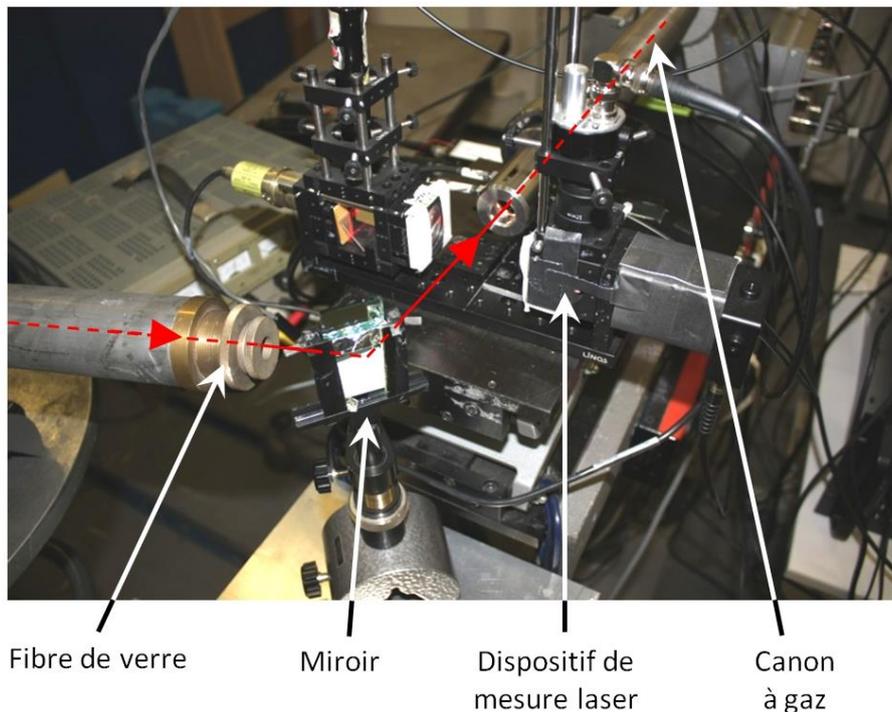


Figure 2.33 : Photo du montage du dispositif de mesure laser et du PDV.

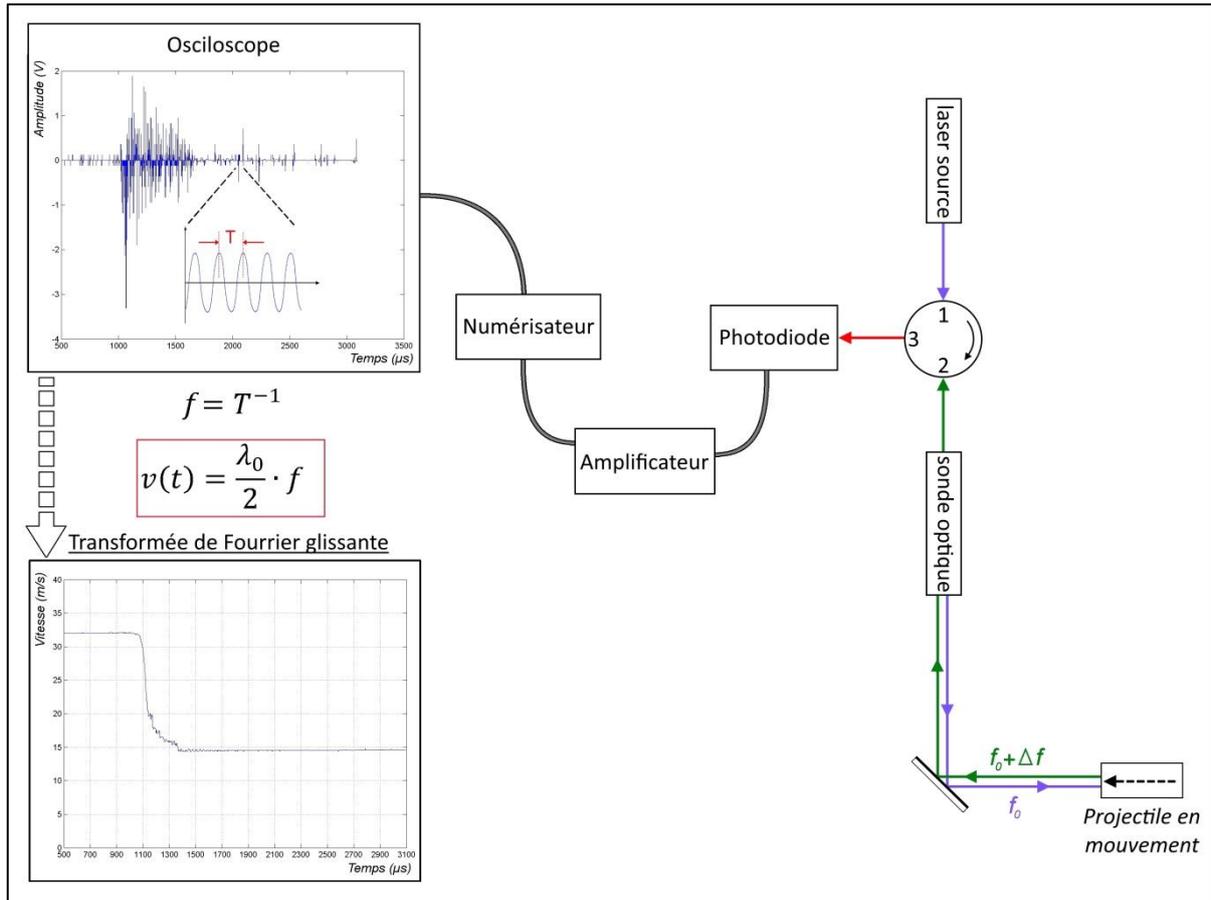


Figure 2.34 : Schéma explicatif du vélocimètre à effet Doppler (PDV).

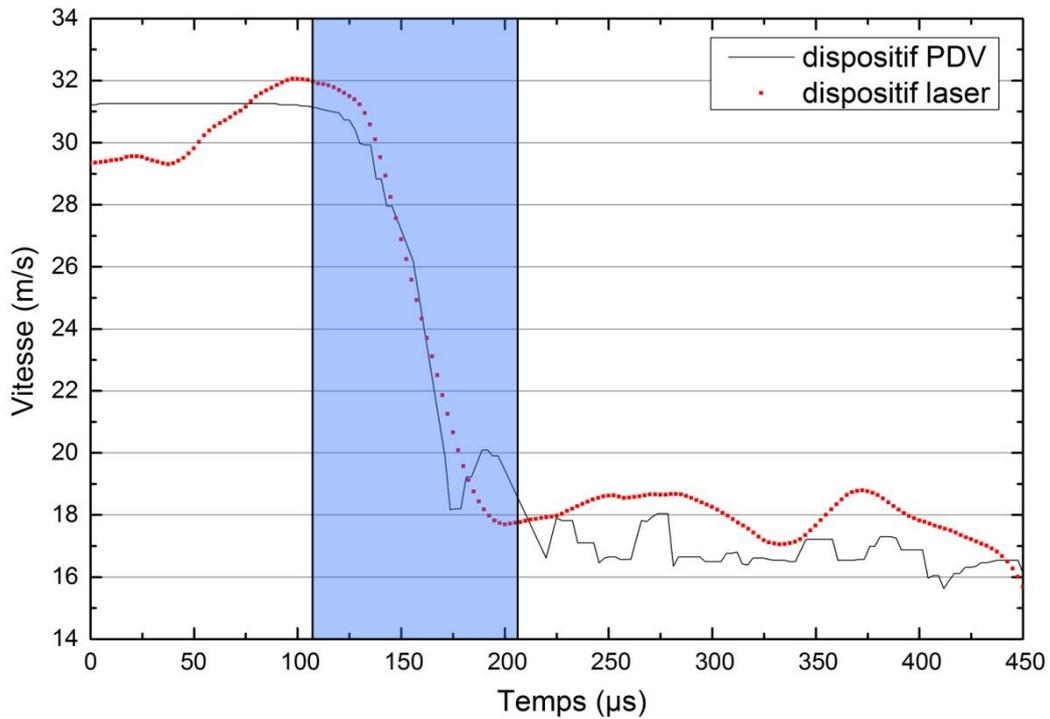


Figure 2.35 : Comparaison des mesures de la vitesse du projectile réalisées par le dispositif laser et par le vélocimètre durant un même essai de traction sur fil.

II.2.2.4. Délimitation des phases d'élongation et de rupture du fil

La phase n°2 regroupe la phase d'élongation du fil jusqu'au début de sa rupture (point B) et sa phase de rupture jusqu'à rupture complète (point 3) (Figure 2.37).

On représente la force de traction $F(t)$ appliquée à l'extrémité du fil telle que :

$$F(t) = -m \cdot a(t) \tag{2.8}$$

Avec m la masse du projectile et $a(t)$ son accélération.

Le début d'élongation du fil (point A) se définit par une force appliquée au fil nulle et une pente de début de courbe de la force positive. Il se caractérise également par le point maximal et tangent à la courbe de vitesse, soit la vitesse initiale appliquée au projectile.

La rupture complète du fil (point B) se définit également par une force appliquée au fil nulle et, à l'inverse, une pente de fin de courbe de la force négative. Elle correspond au point minimal et tangent à la courbe de vitesse, soit la vitesse résiduelle du projectile après rupture complète du fil.

Pour ce qui est de la définition du début de la rupture du fil (point B), nous nous basons sur la caractérisation de la rupture d'un fil en sollicitation quasi-statique (Figure 2.36). Celle-ci correspond à la force maximale atteinte. Dans le cas d'une sollicitation dynamique comme le nôtre (Figure 2.37), le début de rupture du fil se définit également comme étant le point de force maximale situé sur la tangente horizontale de la courbe de force.

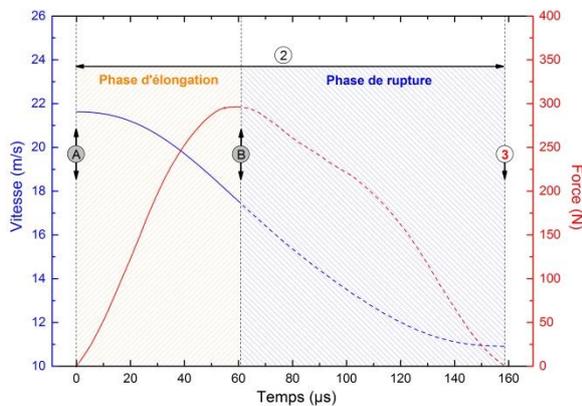


Figure 2.36 : Courbe de force en fonction du temps pour une moyenne d'essais de traction quasi-statique réalisés à $10^{-3} s^{-1}$ sur fil de para-aramide (168Tex _ Twaron). Délimitation des phases d'élongation et de rupture du fil.

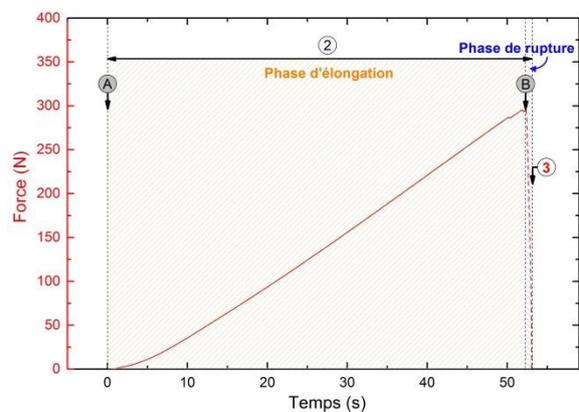


Figure 2.37 : Courbes de vitesse et de force en fonction du temps pour une moyenne d'essais de traction dynamique réalisés à $1000 s^{-1}$ sur fil de para-aramide (336Tex _ Twaron). Délimitation des phases d'élongation et de rupture du fil.

CONCLUSION

Nous avons développé un nouveau dispositif de traction uniaxiale sur fil en sollicitation dynamique afin de proposer une alternative aux moyens d'essais déjà existants comme le dispositif de barres Hopkinson en traction.

Notre dispositif de traction, appelé Dispositif de Traction par Impact sur Fil (DTIF) ou Dispositif de Traction par Impact sur Fil (DTIF) en anglais, s'est vu subir de nombreuses modifications afin de respecter de bonnes conditions de sollicitation du fil lors de chaque essai.

L'intérêt de ce dispositif est de caractériser le comportement mécanique du fil à partir du profil de vitesse du projectile lors de l'essai. Pour cela, un dispositif de mesure par système laser a été mis au point. La variation d'intensité lumineuse due au passage du projectile est captée par une photodiode. Une calibration du laser permet ensuite de convertir ce signal en déplacement du projectile. Enfin, une procédure de lissage du signal basée sur la méthode de Savitzky-Golay nous amène vers le profil de vitesse du projectile souhaité.

Afin de valider la mesure de notre dispositif laser ainsi que la procédure de traitement du signal effectuée, des essais ont été réalisés mettant en commun notre dispositif laser et un Vélocimètre à effet Doppler. Ce dernier peut calculer directement la vitesse instantanée du projectile en mesurant le décalage en fréquence entre un faisceau lumineux émis et le faisceau lumineux réfléchi contre la surface du projectile. Ce dispositif, réputé et très utilisé pour sa mesure précise de la vitesse, nous permet ainsi de confirmer la validité de notre dispositif de mesure laser.

Après conception et validation du nouveau banc d'essai proposé, plusieurs campagnes d'essais sont réalisées pour tester le fil sous différentes conditions. Tout d'abord, le fil sera testé seul dans le but de caractériser le comportement mécanique qui lui est propre dans différentes conditions (plusieurs vitesses de sollicitation et imprégnation). Il sera ensuite testé dans différentes structures tissées (variation des densités de fils, du nombre de points de liage et des surface de contact) afin d'identifier et de comprendre ses interactions avec les autres fils.

CHAPITRE III : ETUDES EXPERIMENTALES

Sommaire

INTRODUCTION	100
III.1. Comportement mécanique du fil seul	101
III.1.1. Influence de la vitesse de déformation	101
III.1.1.1. Description du protocole d'essai	101
III.1.1.2. Résultats expérimentaux.....	103
III.1.2. Effets de l'arrangement structurel d'un tissu sur le comportement mécanique d'un de ses fils testé isolément.	112
III.1.2.1. Description du protocole d'essai	112
III.1.2.2. Résultats expérimentaux.....	116
III.2. Comportement mécanique du fil testé dans sa structure tissée.....	121
III.2.1. Influence du nombre de points de liage à surfaces de contact totales égales	121
III.2.1.1. Protocole d'essai.....	121
III.2.1.2. Résultats expérimentaux.....	122
III.2.2. Influence de la surface de contact totale à points de liage équivalent	127
III.2.2.1. Protocole d'essai.....	127
III.2.2.2. Résultats expérimentaux.....	128
III.2.3. Impacts du changement de l'arrangement structural d'un tissu sur le comportement mécanique d'un de ses fils testé au sein de cette même structure.	132
III.2.3.1. Protocole d'essai.....	132
III.2.3.2. Résultats expérimentaux.....	136
CONCLUSION	145

INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous présentons les différentes campagnes d'essais réalisées au moyen de notre dispositif expérimental. Ces essais ont pour objectif d'étudier le comportement mécanique de fils balistiques isolés suite aux variations de paramètres tels que la vitesse de déformation appliquée au fil et l'usure du fil associée au procédé de tissage. Une étude est également réalisée sur le fil au sein de sa structure tissée afin d'analyser l'influence des paramètres d'interaction liés au tissage.

Nous ciblons chaque étude sur un seul type de fil balistique : le fil de para-aramide (voir § I.2) et plus spécifiquement le fil Twaron _ 336 Tex (g/km) _ 2000 filaments. Seul les fils de chaîne sont testés lors de chaque essai afin qu'ils puissent être comparable entre eux.

Nous négligeons également les phénomènes de propagation d'ondes au sein du fil. En effet, la vitesse de sollicitation appliquée au fil est 200 fois plus faible que la vitesse de propagation d'onde dans le fil. On considère alors que la rupture du fil est entièrement due à la traction longitudinale appliquée en bout de fil et que celle-ci est homogène sur l'ensemble du volume du fil.

Durant chaque campagne d'essais, nous pouvons observer que les résultats expérimentaux de deux fils testés dans les mêmes conditions ne sont pas identiques. Ceci est dû à la présence de défauts, comme des ruptures de filaments, plus ou moins prononcée d'un fil à l'autre. A cela s'ajoute également la variabilité dans la réalisation des échantillons. Plusieurs essais sont donc réalisés pour une même expérience afin de vérifier la reproductibilité et de faire une analyse statistique des résultats.

Pour chaque lot d'essais réalisé, nous obtenons des courbes de vitesse en fonction du temps à partir des données de déplacement du projectile obtenues expérimentalement (Figure 3.1).

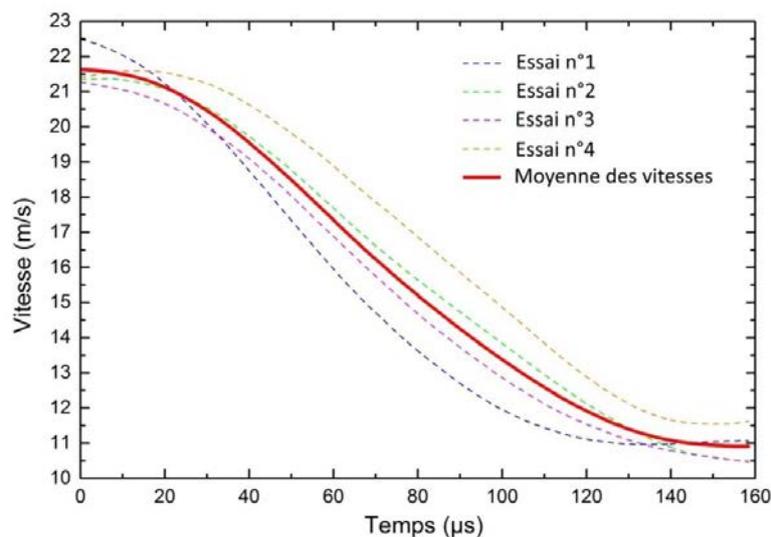


Figure 3.1 : Moyenne des courbes de vitesse du projectile en fonction du temps pour différents essais réalisés dans les mêmes conditions.

L'erreur standard sur la moyenne e est ensuite calculée à partir des essais réalisés suivant la formule :

$$e = \sqrt{\frac{s}{n}} \quad (3.1)$$

Avec n le nombre d'essais et s la variance telle que :

$$s = \sum_0^i \frac{(X_i - m)^2}{n+1} \quad (3.2)$$

Avec X_i les valeurs des différents essais réalisés et m la valeur moyenne.

On obtient ainsi le graphe de la Figure 3.2 présentant la zone de marge d'erreur autour de la courbe de vitesse moyennée. Plus l'erreur standard sur la moyenne est petite, plus la courbe de vitesse moyennée est précise. Dans l'exemple présenté ci-dessous, le pourcentage d'erreur standard sur la moyenne est inférieur à 4%.

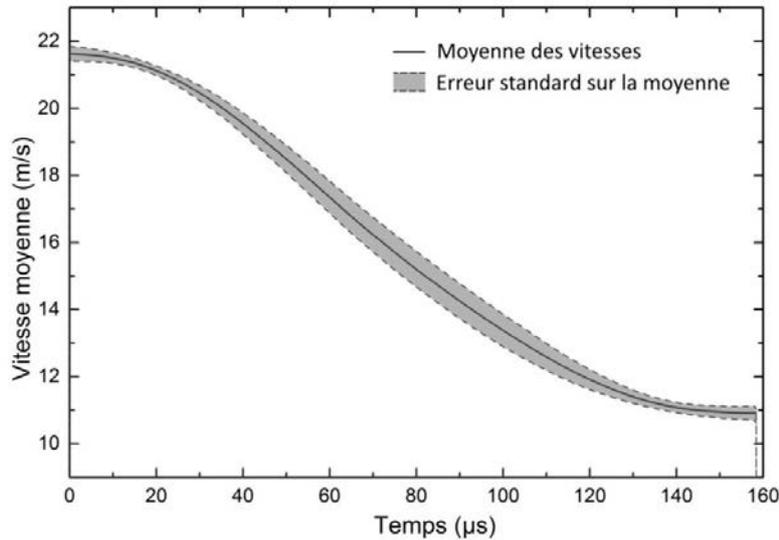


Figure 3.2 : Courbe de vitesse moyennée en fonction du temps et son erreur standard relative.

Dans ce chapitre, nous mettons à profit le développement de notre dispositif expérimental pour étudier le comportement mécanique d'un fil de para-aramide dans des conditions bien spécifiques.

Dans une première partie, nous testons le fil de façon isolée afin d'éliminer tous paramètres influant en rapport avec une structure tissée. Nous pouvons ainsi déterminer le comportement mécanique propre au fil avec pour seuls paramètres influant ses paramètres physiques et matériaux tels que le nombre de filament, leur densité linéique et leur nature. Dans cette partie, nous poursuivons l'étude en faisant varier la vitesse de déformation appliquée au fil durant l'essai. Pour ce faire, la longueur de fil et la vitesse de sollicitation sont adaptées.

Dans une seconde partie, notre étude du comportement mécanique du fil s'élargie en testant le fil directement dans sa structure tissée. Ainsi, nous constatons l'évolution de son comportement mécanique en fonction de paramètres structuraux qui sont le nombre de points de liage et la surface de contact inter-fils au sein de l'échantillon testé. Ces deux paramètres sont testés séparément d'une part, puis combinés.

III.1. Comportement mécanique du fil seul

III.1.1. Influence de la vitesse de déformation

III.1.1.1. Description du protocole d'essai

Dans ce paragraphe, nous caractérisons le comportement mécanique du fil hors de sa structure tissée et nous évaluons de quelle façon la vitesse de déformation influe sur celui-ci.

Pour cette étude, 30 essais au total ont été réalisés à des vitesses initiales de traction V_{i0} et des longueurs initiales de fil L_0 différents :

- à $V_{i0} = 20$ m/s sur des fils de longueur $L_0 = 20$ mm
- à $V_{i0} = 30$ m/s sur des fils de longueur $L_0 = 20$ mm
- à $V_{i0} = 20$ m/s sur des fils de longueur $L_0 = 5$ mm
- à $V_{i0} = 40$ m/s sur des fils de longueur $L_0 = 5$ mm

Les vitesses initiales de traction et les longueurs de fils ont été modifiés afin d'obtenir des vitesses de déformation différentes. Nous considérons que la sollicitation apportée au fil durant l'essai est homogène et uniaxiale. Ainsi, nous pouvons calculer la déformation vraie $\varepsilon_v(t)$ et la vitesse de déformation $\dot{\varepsilon}_v(t)$ subies par le fil telles que :

$$\varepsilon_v(t) = \ln\left(\frac{L(t)}{L_0}\right) = \ln\left(1 + \frac{\Delta L(t)}{L_0}\right) \quad (3.3)$$

$$\dot{\varepsilon}_v(t) = \frac{d\varepsilon_v(t)}{dt} = \frac{Vi(t)}{L(t)} = \frac{Vi(t)}{L_0 + \Delta L(t)} \quad (3.4)$$

Avec $L(t)$ la longueur instantanée du fil, L_0 la longueur initiale, $\Delta L(t)$ l'allongement du fil correspondant également au déplacement mesuré du projectile et $Vi(t)$ la vitesse instantanée du projectile.

De par la diminution de la vitesse instantanée du projectile et l'augmentation de la longueur instantanée du fil, la vitesse de déformation varie et reste connue à chaque instant de l'essai (Figure 3.3). Les vitesses de déformation théoriques initialement appliquées pour chaque essai sont respectivement de 1000 s^{-1} , 1500 s^{-1} , 4000 s^{-1} et 8000 s^{-1} . Les différences observées entre ces valeurs et celles que l'on retrouve sur le graphe de la Figure 3.3 sont dues aux conversions mathématiques réalisées pour obtenir la vitesse de déformation. En effet, l'opération de dérivation amplifie les erreurs de mesure du déplacement obtenue par le dispositif de mesure laser.

Pour ces mêmes raisons, nous retrouvons également des différences entre les vitesses initiales appliquées expérimentalement et les vitesses initiales retranscrites sur les graphes. L'écart observé entre ces vitesses reste cependant faible ce qui permet de comparer ces courbes avec les autres.

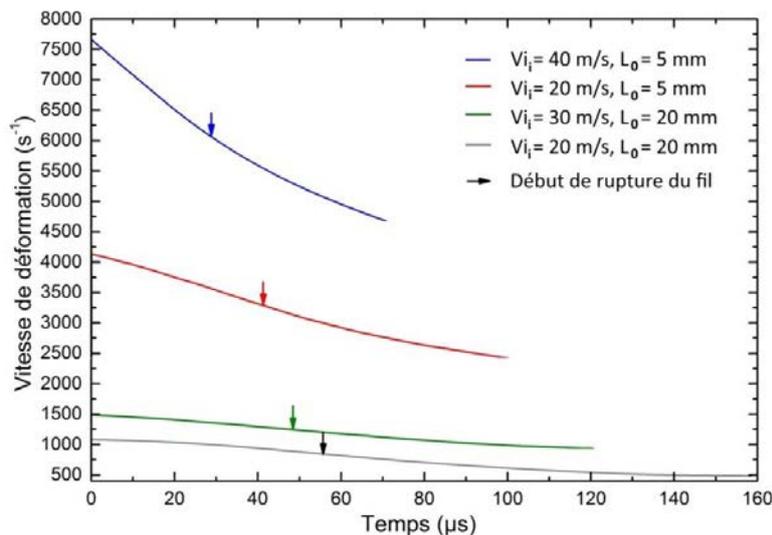


Figure 3.3 : Variation de la vitesse de déformation durant la phase d'élongation jusqu'à rupture pour des essais réalisés à différentes vitesses initiales de propulsion du projectile.

III.1.1.2. Résultats expérimentaux

A l'aide de notre dispositif expérimental, nous obtenons les courbes de vitesse en fonction du temps, pour les fils de 20 mm (Figure 3.4) et pour les fils de 5 mm (Figure 3.5).

On note que l'erreur standard sur la moyenne de chaque courbe est très faible. Elle est de 4% pour les essais sur fil de 20 mm à 20 m/s et inférieure à 2% pour les trois autres essais. De plus, l'allure des quatre courbes de vitesse correspond à celle définie dans le chapitre précédent et est conforme au profil de vitesse attendu. On retrouve sur ces courbes de vitesse une première courbure correspondant à l'élongation du fil. Celle-ci est délimitée par les moments de début de traction sur le fil et de début de rupture progressive des filaments dans le fil. S'en suit la deuxième courbure correspondant à la rupture progressive des filaments. Celle-ci se termine par la rupture complète du fil.

On note également une réduction de la durée des phénomènes d'allongement avant rupture, première courbure, et de rupture progressive du fil, deuxième courbure, avec l'augmentation des vitesses de sollicitation. Toutes ces observations suggèrent une bonne reproductibilité de l'essai sur fil seul et valident la bonne conformité des résultats obtenus.

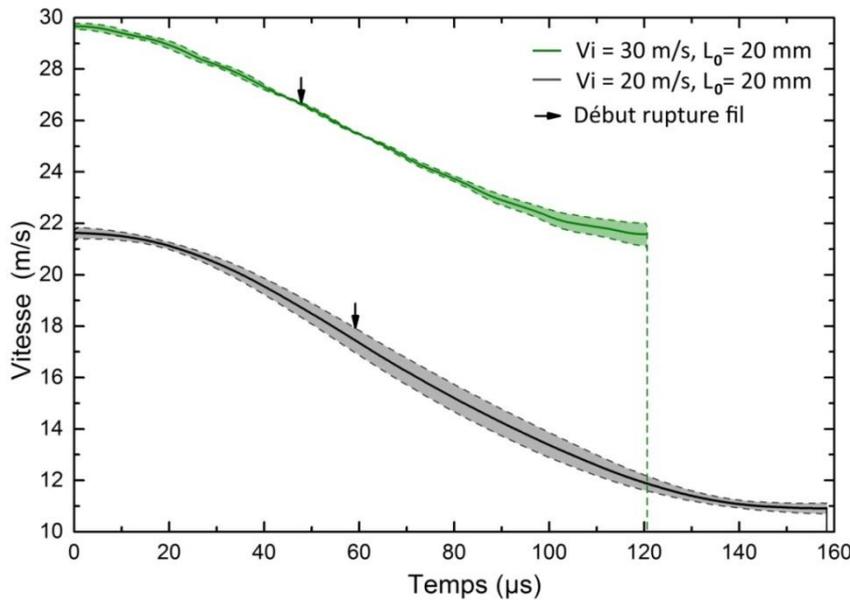


Figure 3.4 : Courbes de vitesse en fonction du temps pour les essais sur fil seul de 20 mm testé à 20 et 30 m/s. Marquage du début de la rupture progressive du fil.

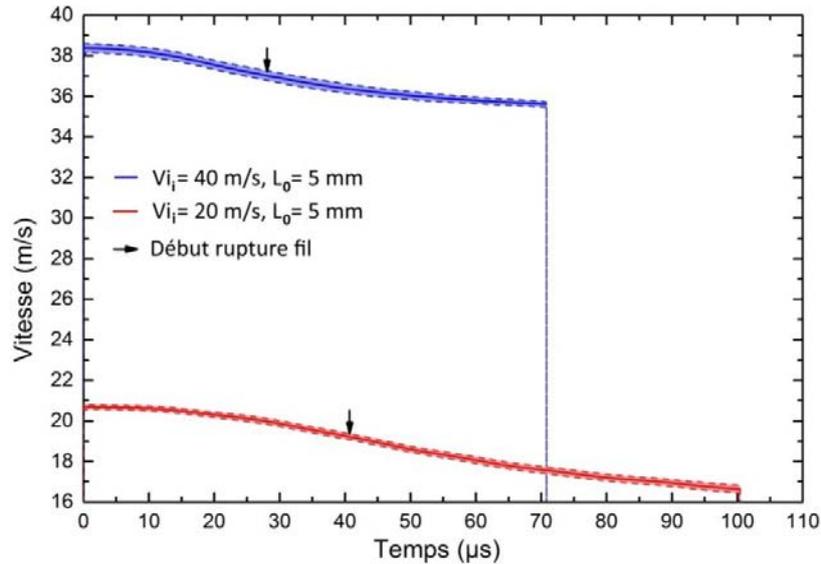


Figure 3.5 : Courbes de vitesse en fonction du temps pour les essais sur fil seul de 5 mm testé à 20 et 40 m/s. Marquage du début de la rupture progressive du fil.

Si l'on observe les graphes de la Figure 3.6 et de la Figure 3.7 illustrant respectivement les courbes de force appliquée au fil et la densité d'énergie volumique absorbée par le fil en fonction de sa déformation vraie, il nous est possible de répertorier d'une part les données de forces et d'allongements à rupture dans le Tableau 3.1 et d'autre part les données énergétiques dans les Tableaux 3.2, 3.3 et 3.4.

On remarque une augmentation de la déformation vraie à rupture du fil avec l'augmentation de la vitesse de déformation. Cette élongation est relative à la déformation élastique du fil avant rupture. Celle-ci augmente avec la vitesse de déformation jusqu'à tendre vers un seuil limite comme illustré sur le graphe de droite de la Figure 3.8. Lors d'un essai de traction à faible vitesse de déformation, les liaisons atomiques sont sollicitées et subissent un étirement dans le sens de la sollicitation. L'ensemble de ces étirements atomiques correspond à la déformation élastique du fil à l'échelle macroscopique. Dans le cas d'un fil de para-aramide, les liaisons primaires intramoléculaires Carbone-Carbone et Carbone-Azote, dites liaisons fortes, subissent donc un étirement. De même, les liaisons secondaires intermoléculaires, dites liaisons faibles, subissent également un étirement. Les cycles benzéniques sont aussi susceptibles de subir un étirement de par leur géométrie (Figure 3.9). Une augmentation de la vitesse de déformation a deux effets sur ces allongements. D'une part, elle réduit la mobilité des chaînes macromoléculaires entre-elles qui n'ont plus le temps de se mouvoir, ce qui réduit de ce fait les allongements des liaisons faibles intermoléculaires. D'autre part, elle impose une plus grande sollicitation et permet à un plus grand nombre de liaisons primaires de s'allonger ce qui explique cette augmentation de la déformation à rupture. Une diminution jusqu'à la disparition des ruptures de liaisons faibles avec l'augmentation de la vitesse de déformation peut expliquer ce ralentissement de la diminution de la déformation vraie à rupture.

Cette facilité d'allongement des chaînes macromoléculaires qui augmente avec la vitesse de déformation implique une réduction de la raideur des filaments et donc du fil comme observé sur la Figure 3.6.

L'augmentation de la vitesse de déformation implique une augmentation de la densité d'énergie volumique fournie au fil. En effet, d'après les formules respectives de la vitesse de déformation $\dot{\epsilon}(t)$ et de la densité d'énergie volumique fournie $E_{\text{spe fournie}}(t)$ décrites ci-dessous :

$$E_{spe \text{ fournie}}(t) = \frac{m_p \cdot Vi(t)^2}{2 \cdot V_{ol}} = \frac{m_p \cdot Vi(t)^2}{2 \cdot (S_f)_i \cdot (L_f)_i} \quad (3.5)$$

Avec m_p = cte la masse du projectile, $(S_f)_i$ = cte la section transverse initiale du fil testé supposée constante, $(L_f)_i$ = cte la longueur initiale du fil testé et $Vi(t)$ la vitesse instantanée du projectile lors de l'essai.

$$\dot{\epsilon}(t) = \frac{Vi(t)}{\ln\left(1 + \frac{L_f(t) - (L_f)_i}{(L_f)_i}\right)} \quad (3.6)$$

Avec $L_f(t)$ la longueur instantanée du fil testé.

Nous pouvons noter qu'à un instant t , une augmentation de la vitesse de déformation implique une augmentation de la vitesse de sollicitation et/ou une diminution de la longueur initiale du fil testé et de ce fait une augmentation de la densité d'énergie volumique fournie.

Cette augmentation de la vitesse de déformation implique également une augmentation de la densité d'énergie volumique nécessaire pour atteindre la rupture du fil et de celle nécessaire à la rupture complète du fil. Malgré ces augmentations, leurs proportions par rapport à la densité d'énergie volumique fournie au fil est de plus en plus faible au fur et à mesure de l'augmentation de la vitesse de déformation comme le montre l'évolution des ratios $E_{abs \ spe} / E_f$ et $E'_{abs \ spe} / E_f$ par rapport à la vitesse de déformation dans les Tableaux 3.2 et 3.3.

Ainsi, le ratio $E_f / E_{abs \ spe \ tot}$ (Tableau 3.4) entre la densité d'énergie volumique fournie au fil

et la densité d'énergie volumique nécessaire à la rupture du fil est de plus en plus important malgré cette augmentation de la densité d'énergie volumique absorbée jusqu'à rupture du fil. Or, une énergie fournie trop importante par rapport à l'énergie de rupture du fil entraîne des conséquences à l'échelle macromoléculaire. L'énergie fournie devient suffisamment grande pour atteindre la rupture des liaisons primaires Carbone-Carbone. Aussi, les chaînes macromoléculaires n'ont plus le temps de se mouvoir entre elles ce qui empêche la rupture des liaisons faibles ainsi que la formation de fibrilles à l'échelle filamentaire.

En ce qui concerne l'évolution de la force appliquée au fil en fonction de la vitesse de déformation, celle-ci dépend de l'allongement possible du fil et de sa capacité à emmagasiner de l'énergie. Les fils de 5 mm ont un volume plus petit et emmagasinent alors beaucoup moins d'énergie que les fils de 20 mm. La force nécessaire à appliquer pour atteindre la rupture des fils de 5 mm est donc inférieure à celle nécessaire à la rupture des fils de 20 mm. Ils absorbent néanmoins une densité d'énergie volumique plus importante due à l'évolution des mécanismes de rupture.

Longueur du fil (mm)	Vitesse de traction du projectile (m/s)	Vitesse de déformation initiale (s ⁻¹)	Force à rupture (N)	Allongement à rupture (mm)	Déformation vraie à rupture (%)
20	20	1000	313	1,17	5,7
20	30	1500	245	1,59	7,6
5	20	4000	166	0,82	15
5	40	8000	178	0,86	16

Tableau 3.1 : Données de force, allongement et déformation vraie à rupture extrait du graphe de la Figure 3.6 en fonction de la vitesse de déformation initiale de chaque essai.

III.1. Comportement mécanique du fil seul

Longueur du fil (mm)	Vitesse de traction du projectile (m/s)	Vitesse de déformation initiale (s ⁻¹)	Energie spécifique absorbée jusqu'à début de rupture $E_{abs\ spe}$ (MJ/m ³)	Energie spécifique fournie E_f (MJ/m ³)	Ratio $E_{abs\ spe} / E_f$
20	20	1000	42	108	0,39
20	30	1500	55	244	0,22
5	20	4000	64	433	0,15
5	40	8000	83	1733	0,05

Tableau 3.2 : Données énergétiques extrait du graphe de la Figure 3.7 pour la partie de courbe jusqu'au début de rupture du fil de chaque essai.

Longueur du fil (mm)	Vitesse de traction du projectile (m/s)	Vitesse de déformation initiale (s ⁻¹)	Energie spécifique absorbée du début de rupture jusqu'à rupture complète $E'_{abs\ spe}$ (MJ/m ³)	Energie spécifique fournie E_f (MJ/m ³)	Ratio $E'_{abs\ spe} / E_f$
20	20	1000	52	108	0,48
20	30	1500	57	244	0,23
5	20	4000	89	433	0,20
5	40	8000	134	1733	0,07

Tableau 3.3 : Données énergétiques extrait du graphe de la Figure 3.7 pour la partie de courbe du début de rupture du fil jusqu'à sa rupture complète pour chaque essai.

Longueur du fil (mm)	Vitesse de traction du projectile (m/s)	Vitesse de déformation initiale (s ⁻¹)	Energie spécifique totale absorbée $E_{abs\ spe\ tot}$ (MJ/m ³)	Energie spécifique fournie E_f (MJ/m ³)	Ratio $E_f / E_{abs\ spe\ tot}$
20	20	1000	94	108	1,1
20	30	1500	112	244	2,2
5	20	4000	153	433	2,8
5	40	8000	217	1733	8,0

Tableau 3.4 : Données énergétiques globales extrait du graphe de la Figure 3.7 pour chaque essai.

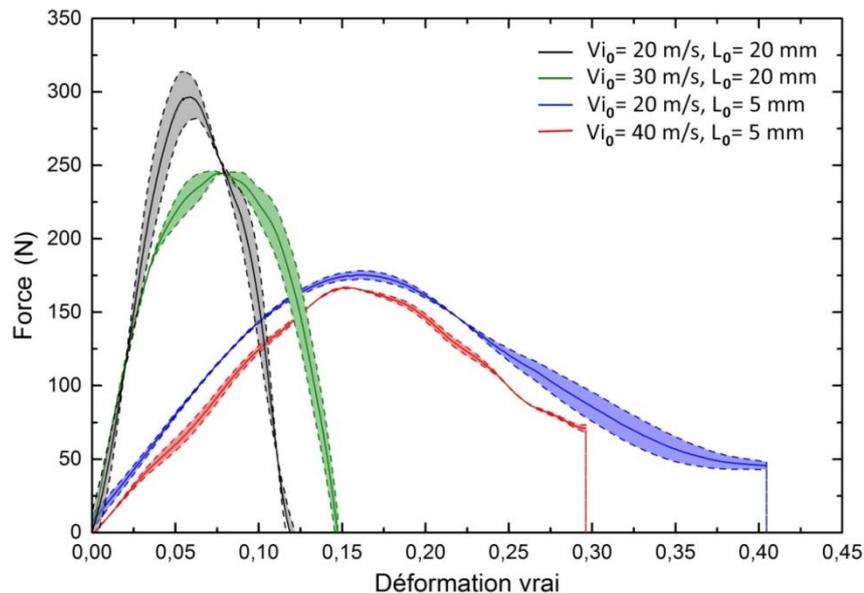


Figure 3.6 : Courbes de force appliquée à l'extrémité du fil testé en fonction de la déformation vraie du fil pour les essais sur fil seul de 20 mm testé à 20 et 30 m/s et de 5 mm testé à 20 et 40 m/s.

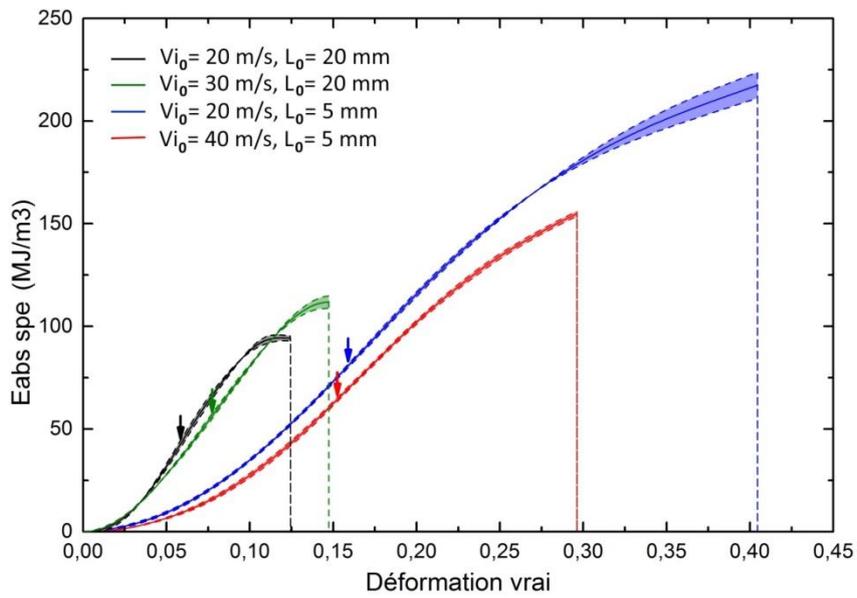


Figure 3.7 : Courbes de densité d'énergie volumique absorbée par le fil en fonction de la déformation vraie du fil pour les essais sur fil seul de 20 mm testé à 20 et 30 m/s et de 5 mm testé à 20 et 40 m/s.

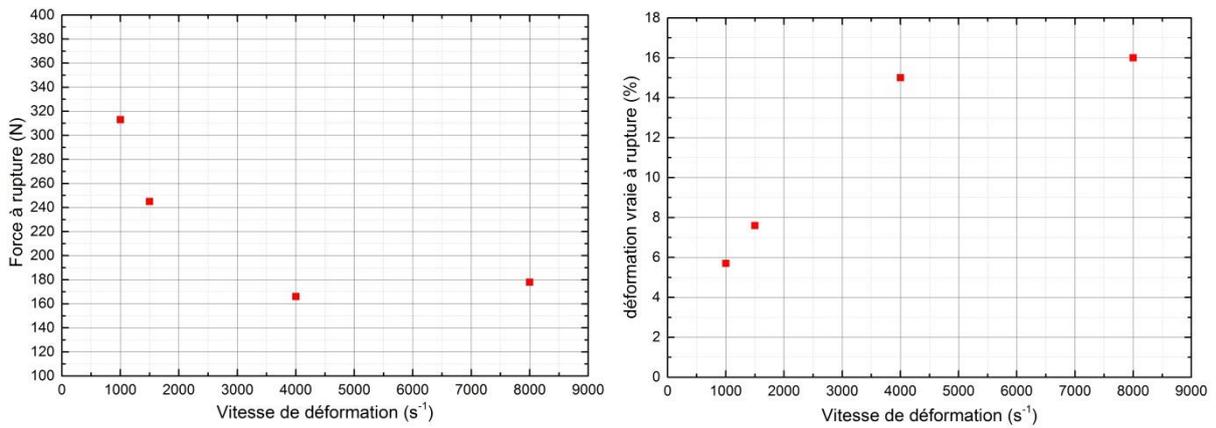


Figure 3.8 : A gauche, variation de la force nécessaire à la rupture du fil en fonction de la vitesse de déformation. A droite, variation de la déformation vraie à rupture subie par le fil en fonction de la vitesse de déformation.

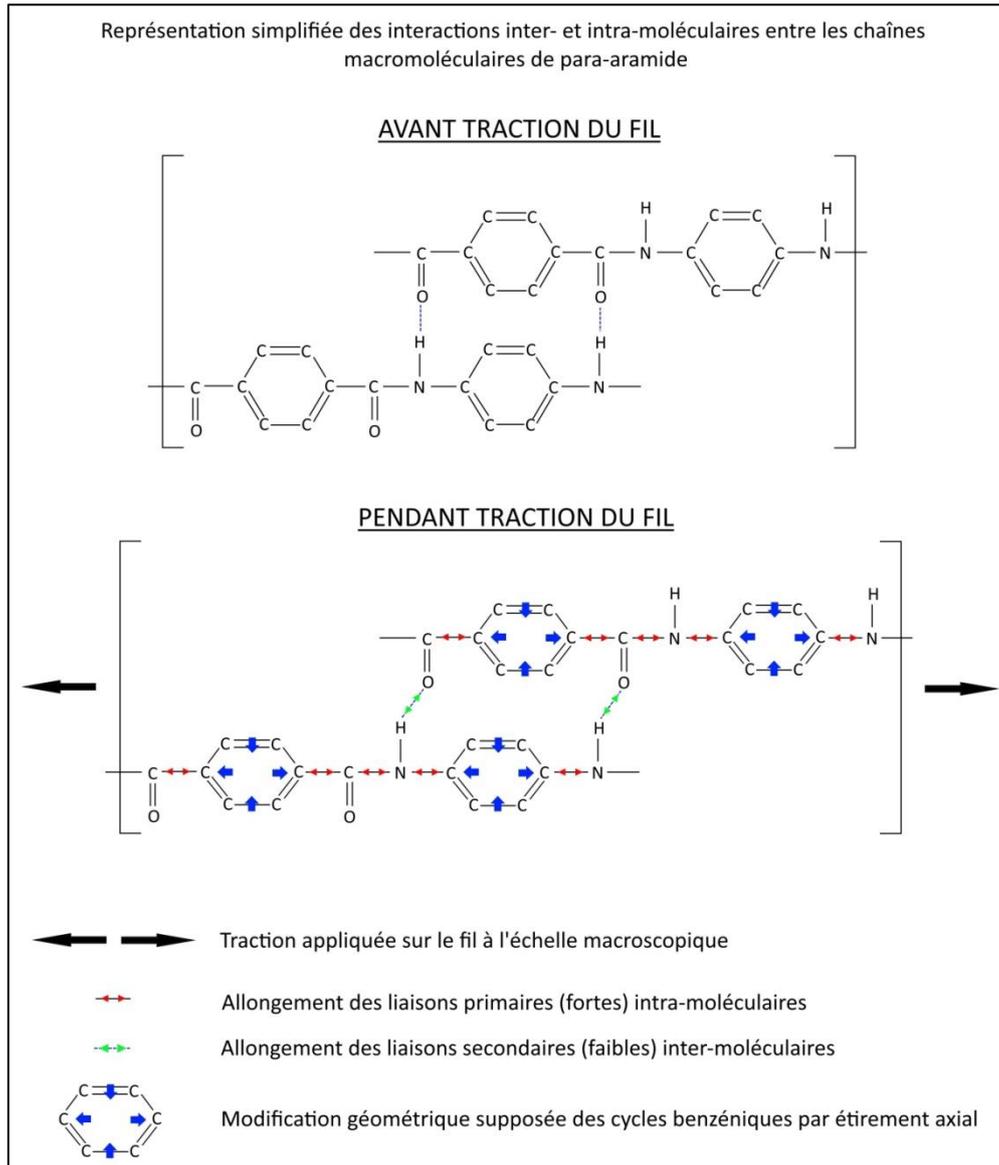


Figure 3.9 : Représentation simplifiée des interactions inter- et intra-moléculaire entre les chaînes macromoléculaires de para-aramide avant et pendant l'application d'une traction axiale sur le fil.

A l'aide de captures d'images réalisées au Microscope Electronique à Balayage (MEB), nous observons les différents types de rupture de filaments extraits des fils testés. Dans chacune des séries d'essais réalisées, nous retrouvons quatre catégories de rupture du filament que nous répertorions ci-dessous :

- Rupture n°1 : Une élévation du filament sur plusieurs centaines de micromètres (Figure 3.10).
- Rupture n°2 : Une élévation du filament sur plusieurs centaines de micromètres avec la formation de longues fibrilles d'environ 100 à 200 μm (Figure 3.11).
- Rupture n°3 : La formation de courtes fibrilles de longueur comprise entre 20 et 50 μm sans élévation dans la partie antérieure du filament (Figure 3.12).
- Rupture n°4 : Une coupe nette et transverse du filament sans élévation de sa partie antérieure (Figure 3.13).

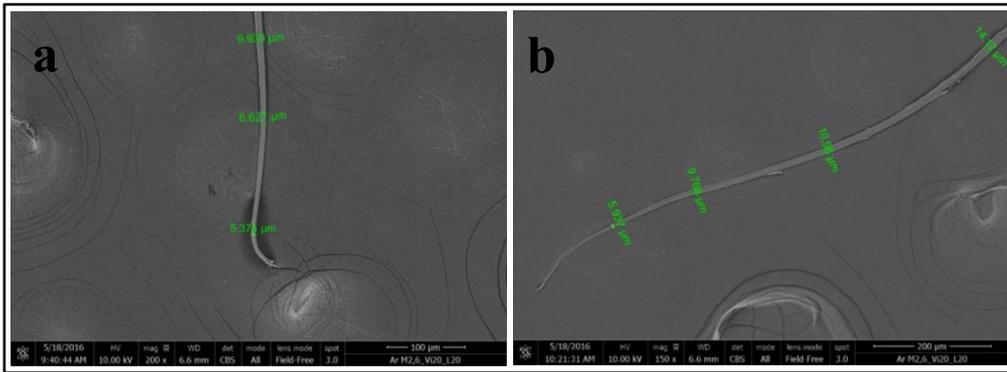


Figure 3.10 : Observation au Microscope Electronique à Balayage de la rupture n°1.

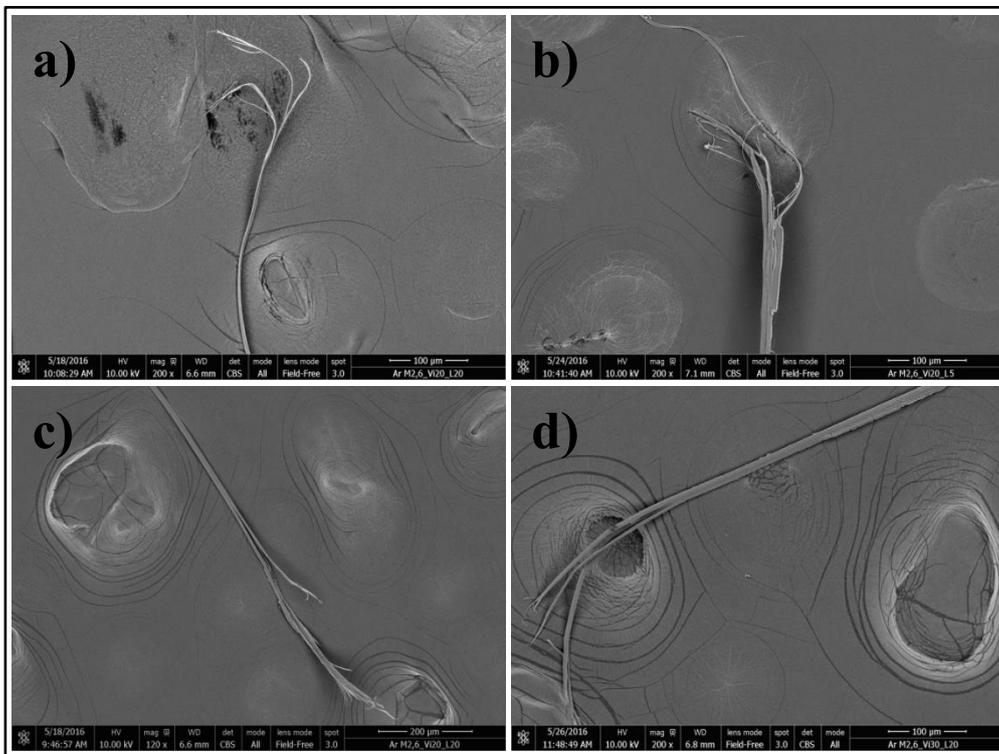


Figure 3.11 : Observation au Microscope Electronique à Balayage de la rupture n°2.

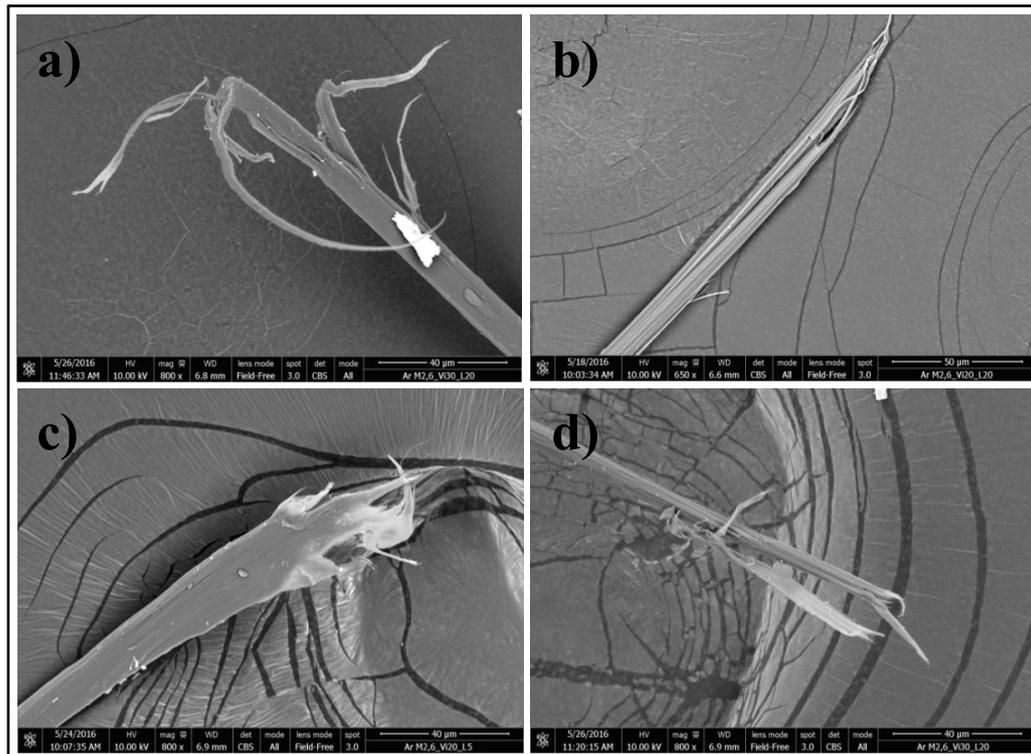


Figure 3.12 : Observation au Microscope Electronique à Balayage de le rupture n°3.

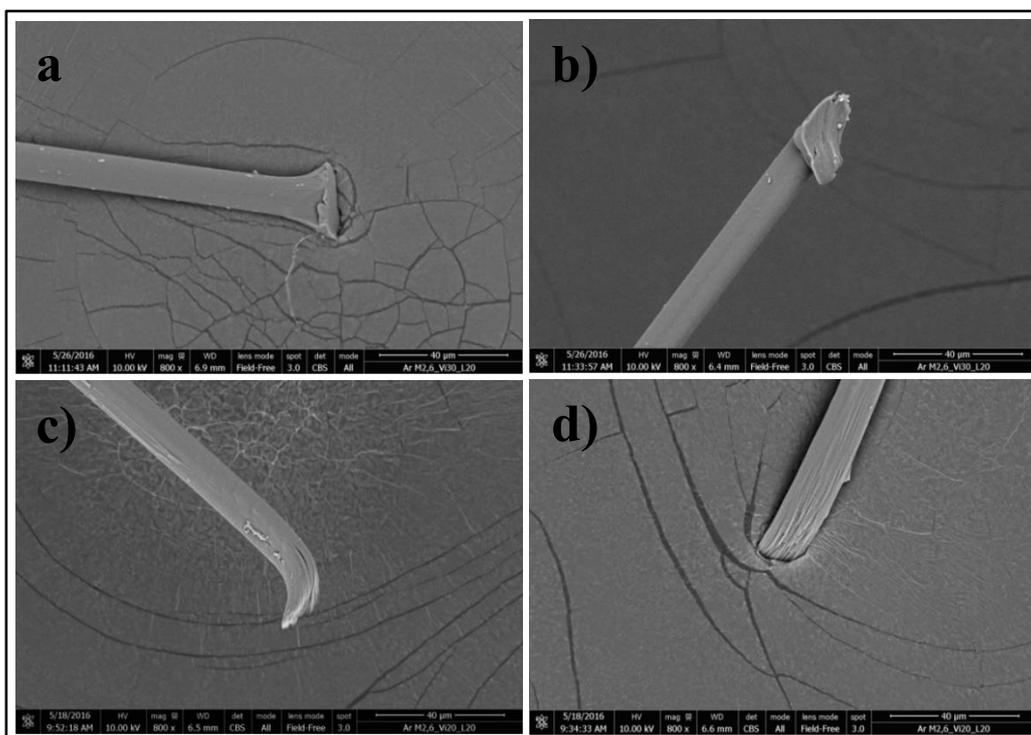


Figure 3.13 : Observation au Microscope Electronique à Balayage de le rupture n°4.

Il existe donc une gamme de vitesse de déformation pour laquelle les mécanismes de rupture du fil varient que l'on nomme gamme « transitoire » de vitesse de déformation [1].

Pour une vitesse de déformation en dessous de cette gamme « transitoire », la densité d'énergie volumique fournie au fil est supérieure à la densité d'énergie volumique minimale nécessaire à sa rupture mais reste proche. La vitesse de déformation est suffisamment « faible » pour permettre aux chaînes macromoléculaires de se mouvoir entre elles. Ainsi, la traction appliquée à l'extrémité du fil provoque son allongement en sollicitant à la fois les liaisons primaires et secondaires. Le niveau énergétique fourni permet de rompre en grande majorité les liaisons secondaires créant au passage de longues fibrilles. Ces ruptures correspondent aux ruptures N°1 et N°2 décrites ci-dessus. La rupture de liaisons primaires due à la présence de défaut de structure par exemple peut se produire mais reste une minorité. De par sa « faible » valeur ainsi que les ruptures qui la représentent, la gamme de vitesse de déformation située avant la gamme « transitoire » peut être qualifiée de « quasi-statique ».

Pour une vitesse de déformation au-dessus de la gamme « transitoire », la densité d'énergie volumique fournie au fil est très supérieure à la densité d'énergie volumique minimale nécessaire à sa rupture. La vitesse de déformation est très élevée et ne laisse pas le temps aux chaînes macromoléculaires de se mouvoir entre elles. La traction appliquée à l'extrémité du fil peut alors provoquer un fort allongement du fil en sollicitant un plus grand nombre de liaisons primaires. Les liaisons secondaires ne participent pas à l'allongement du fil de par l'immobilité des chaînes macromoléculaires. Le niveau énergétique fourni est suffisamment élevé pour permettre en grande majorité la rupture des liaisons primaires que représente la rupture N°4. La rupture des liaisons secondaires peut se produire mais reste en minorité. De par sa valeur élevée ainsi que les ruptures qui la représentent, la gamme de vitesse de déformation située après la gamme « transitoire » peut être qualifiée de « dynamique ».

Enfin, pour une vitesse de déformation présente dans la gamme « transitoire », celle-ci n'est ni trop importante pour empêcher le mouvement des chaînes macromoléculaires entre-elles, ni trop faible pour pouvoir fournir au fil une densité d'énergie volumique suffisamment grande et ainsi permettre la rupture des liaisons primaires. Aussi, la mobilité des chaînes entre elles permet également la rupture des liaisons secondaires. Dans cette gamme transitoire de vitesse de déformation, on retrouve des ruptures par fibrillations, ainsi que des ruptures nettes, soient les ruptures N°1, N°2 et N°4, mais également des ruptures dites « transitoires » qui mêlent à la fois la présence de fibrilles et de ruptures nettes représentées par la rupture N°3. Au fur et à mesure de l'augmentation de la vitesse de déformation dans cette gamme, les proportions de ces ruptures évoluent pour passer d'une majorité de ruptures par fibrillation à une majorité de ruptures nettes.

Ces trois gammes de vitesse de déformation : « quasi-statique », « transitoire » et « dynamique », sont représentées sur la Figure 3.14 avec l'évolution de l'allongement moyen à rupture des filaments en fonction de la vitesse de déformation.

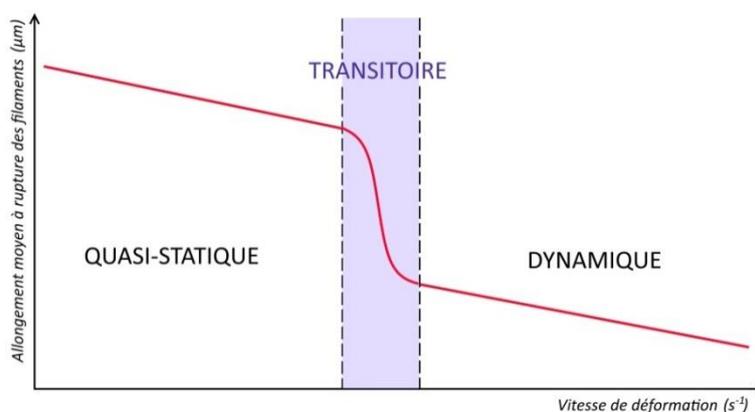


Figure 3.14 : Allure de la variation de l'allongement moyen à rupture des filaments en fonction de la vitesse de déformation subie par le fil. Représentation des gammes de vitesse de déformation dites « Quasi-statique », « Transitoire » et « Dynamique ».

III.1.2. Effets de l'arrangement structurel d'un tissu sur le comportement mécanique d'un de ses fils testé isolément.

III.1.2.1. Description du protocole d'essai

Les fils utilisés dans la conception de tissus subissent de nombreuses déformations tout au long du processus de tissage. Ces déformations ont un impact plus ou moins important sur le comportement mécanique de ces fils. Dans une structure tissée, les fils de chaîne et de trame (duite) ont une ondulation, un écrasement et un écartement des uns par rapport aux autres différents et bien spécifiques en fonction des densités de fils et des architectures qui sont imposées lors du tissage. Nous définissons plusieurs critères physiques qui peuvent influencer sur le comportement mécanique du fil de chaîne après extraction de sa structure tissée:

La densité de fils de chaîne, qui va jouer sur l'écrasement du fil de chaîne dans l'épaisseur.

Le nombre de croisement entre le fil de chaîne et les fils de trame transverses sur toute sa longueur, soit la densité de fils de trame.

L'amplitude d'ondulation du fil de chaîne qui correspond à l'épaisseur de la structure tissée d'où il provient.

L'angle d'ondulation du fil de chaîne qui découle de la densité de fils de trame et de l'amplitude d'ondulation.

L'écrasement transverse du fil de chaîne par les fils de trame, soit l'angle d'ondulation des fils de trame.

L'aspect structurel du tissu.

Nous étudions donc l'influence du changement de densités chaîne et trame, soit l'influence de l'ensemble des critères physiques définis ci-dessus, sur le comportement mécanique du fil extrait de sa structure tissée.

Trois structures Toile, de densités chaîne et trame différentes, ont été réalisées pour cette campagne. Seuls les fils de chaîne sont testés, c'est pourquoi nous différencions ces structures par l'angle de frisure de leurs fils de chaîne (Figure 3.15). L'angle de frisure de ces fils a été défini grâce à une coupe dans le sens chaîne des structures tissées suivantes :

Une Toile « B » avec 6,2 chaînes/cm et 6,8 duites/cm : frisure de fils de chaîne $\theta_B = 19^\circ$

Une Toile « G » avec 10,0 chaînes/cm et 5,3 duites/cm : frisure de fils de chaîne $\theta_G = 20^\circ$

Une Toile « A » avec 15,6 chaînes/cm et 3,9 duites/cm : frisure de fils chaîne $\theta_A = 27^\circ$

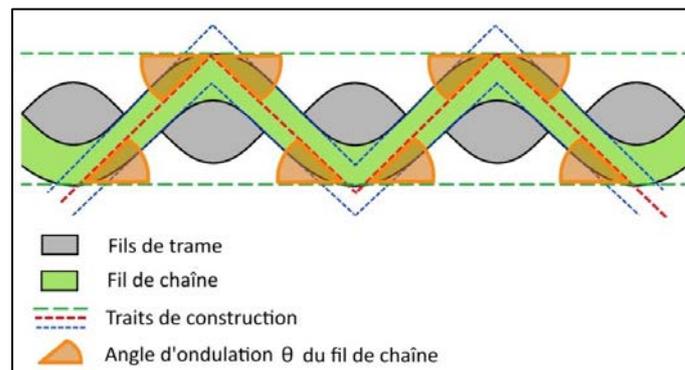


Figure 3.15 : Schéma descriptif de l'angle d'ondulation du fil de chaîne.

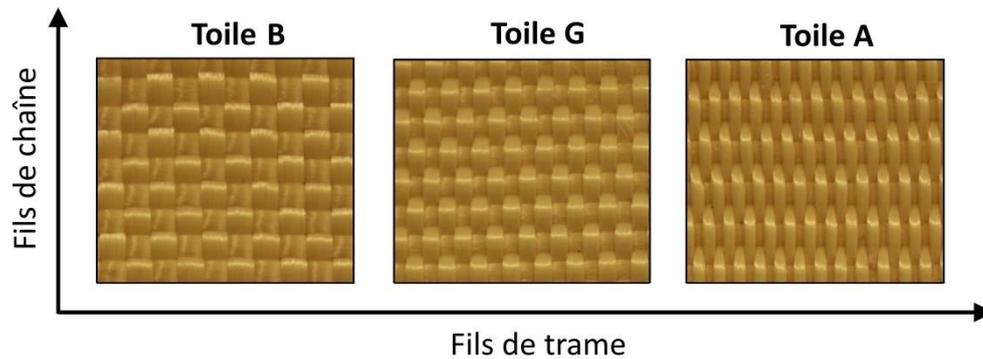


Figure 3.16 : Photos des structures tissées dont sont extraits les fils testés : tissu toile B, tissu toile G et tissu toile A. Disposition des structures tissées suivant les axes de fils de chaîne et de trame.

Nous répertorions dans le Tableau 3.5 les différents critères physiques associés à chacune des trois structures tissées :

- Densité chaîne : la densité chaîne de chaque structure est imposée lors du tissage. Elle génère un écrasement latéral du fil de chaîne qui augmente avec celle-ci. Les fils extraits des Toiles B, G et A possèdent respectivement des densités de 6.2, 10.0 et 15.6 duites/cm. Ainsi, le fil de chaîne testé subit un écrasement latéral de plus en plus important du tissu A au tissu B en passant par le tissu G.

- Densité trame : la densité trame est fixée en fonction de la densité chaîne imposée. Une réduction de celle-ci provoque une augmentation de la densité trame. Cette augmentation de la densité trame entraîne une plus grande ondulation du fil qui à son tour impose une « pliure » du fil plus prononcée. Les fils extraits des Toiles B, G et A possèdent respectivement des densités de 6.8, 5.3 et 3.9 chaîne/cm. Ainsi, le fil de chaîne testé subit un écrasement dans la longueur dû à la formation de plis de plus en plus important du tissu B au tissu G puis au tissu A.

- Amplitude d'ondulation chaîne : l'amplitude d'ondulation des fils de chaîne est définie par le réarrangement des fils de chaîne et trame entre eux au sein de la structure. Elle dépend notamment de la densité de fils de chaîne.

Pour les fils de chaîne présents dans le tissu B, la densité chaîne est telle que ceux-ci ne subissent qu'un faible écrasement latéral et ainsi un faible grossissement des fils dans la hauteur de par la conservation de leur volume. De plus, l'ondulation des fils de trame permet aux fils de chaîne et de trame de se positionner au même niveau. Ces deux phénomènes participent à la réduction de l'amplitude des fils de chaîne.

Pour les fils de chaîne présents dans le tissu G, l'absence d'ondulation des fils de trame impose un écartement plus important dans l'épaisseur des fils de chaîne ce qui augmente donc leur amplitude d'ondulation. Cependant, les proportions entre les densités chaîne et trame sont telles que la structure devient compacte. Les fils de trame exercent alors un resserrement des fils de chaîne dans l'épaisseur ce qui réduit leur amplitude d'ondulation.

Enfin, pour les fils de chaîne dans le tissu A, nous retrouvons l'absence d'ondulation des fils de trame qui implique une augmentation de l'amplitude d'ondulation des fils de chaîne. De plus, la forte densité de fils de chaîne leur impose un écrasement latéral important ce qui amplifie de façon considérable leur amplitude d'ondulation.

- Angle d'ondulation chaîne : l'angle d'ondulation des fils de chaîne est une combinaison des effets de la densité trame et de l'amplitude d'ondulation des fils de chaîne. Ainsi, on retrouve un angle d'ondulation chaîne similaire dans les structures B et G et une forte ondulation des fils de chaîne dans la structure A.

- Angle d'ondulation trame : le tissage des fils de chaîne et trame leur impose une certaine ondulation suivant la densité chaîne imposée. Initialement, lors du processus de tissage, les fils de trame sont

insérés sans ondulation dans la « foule » formé par les fils de chaîne paires et impaires. C'est la fermeture de la « foule » et le croisement inversé des fils de chaîne paires et impaires qui apportent une pression alternée sur le fil de trame (Figure 3.17).

Ainsi, une trop faible densité chaîne peut ne pas être suffisante pour imposer une ondulation aux fils de trame insérés dans la structure. Les densités de fils de chaîne des tissus B et G sont suffisamment faibles pour imposer aux fils de trame une ondulation quasiment nulle. Seule la densité de fils de chaîne du tissu A est assez élevée pour permettre aux fils de trame d'avoir une ondulation égale à 12° .

L'ondulation des fils de trame dans le tissu A implique alors un écrasement transverse sur les côtés du fil de chaîne contrairement à celles dans les tissus B et G qui n'imposent qu'un très faible écrasement, quasiment nul.

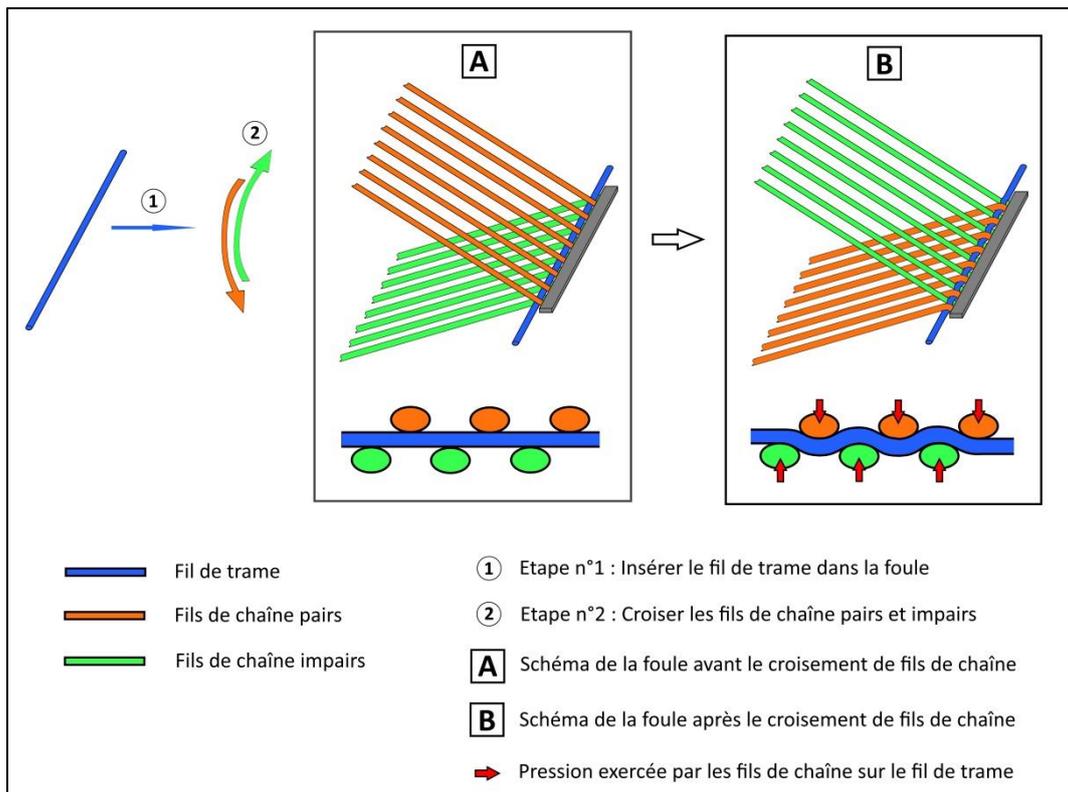


Figure 3.17 : Schéma explicatif de l'ondulation imposée au fil de trame lors du processus de tissage avec les croisements de fils de chaîne pairs et impairs dans la foule.

Les fils de chaîne extraits des structures tissées A, B et G sont testés sur une longueur de 2 cm et soumis à une vitesse de traction longitudinale de 20 m/s. Une série de 5 essais est réalisée pour chaque fil de chaîne à tester.

Lors de la préparation des échantillons, les fils de chaîne perdent leur ondulation initiale ce qui permet une synchronisation des débuts de traction dans le temps pour les trois séries d'essais. Cependant, les fils de chaîne testés gardent les empreintes laissées par les fils de trame dues à leur écrasement ainsi que leur usure.

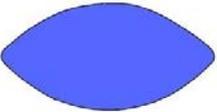
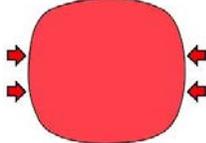
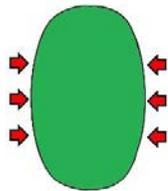
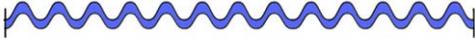
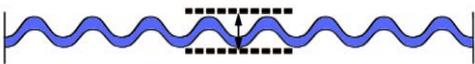
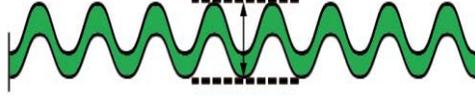
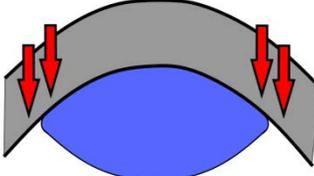
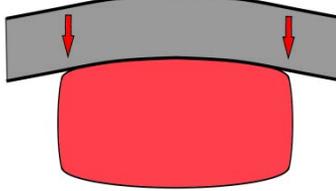
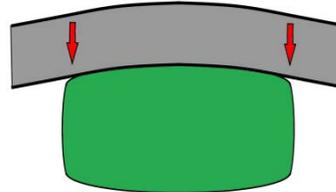
	TISSU B	TISSU G	TISSU A
Densité chaîne	 6,2 chaînes/cm	 10,0 chaînes/cm	 15,6 chaînes/cm
Densité trame	 6,8 duites/cm	 5,3 duites/cm	 3,9 duites/cm
Amplitude d'ondulation chaîne	 Amplitude B = 492 μm	 Amplitude G = 445 μm	 Amplitude A = 752 μm
Angle d'ondulation chaîne	$\theta_B = 19^\circ$	$\theta_G = 20^\circ$	$\theta_A = 27^\circ$
Angle d'ondulation trame	 Angle d'ondulation trame = 12° (écrasement important)	 Angle d'ondulation trame $\approx 0^\circ$ (écrasement quasi nul)	 Angle d'ondulation trame $\approx 0^\circ$ (écrasement quasi nul)
Aspect structure	Stable et souple	Stable et rigide	Instable et souple

Tableau 3.5 : Description des différentes déformations dues aux critères physiques liés à la structure tissée et subies par le fil de chaîne.

III.1.2.2. Résultats expérimentaux

On obtient ainsi les courbes de vitesse en fonction du temps illustrées sur la Figure 3.18.

L'erreur standard sur la moyenne de chaque courbe est très faible. Elle est de 5% pour les essais sur le fil vierge et de 3,5% pour les fils extraits des tissus A, B et G. De plus, les allures des quatre courbes de vitesse sont conformes au profil attendu. La dispersion observée entre les vitesses initiales de chaque courbe s'étale sur un intervalle de 2 m/s, soit 10 % de la vitesse initiale théorique ce qui reste acceptable pour pouvoir comparer les phénomènes observés. Toutes ces observations suggèrent une bonne reproductibilité de l'essai sur fil et valident la bonne conformité des résultats obtenus.

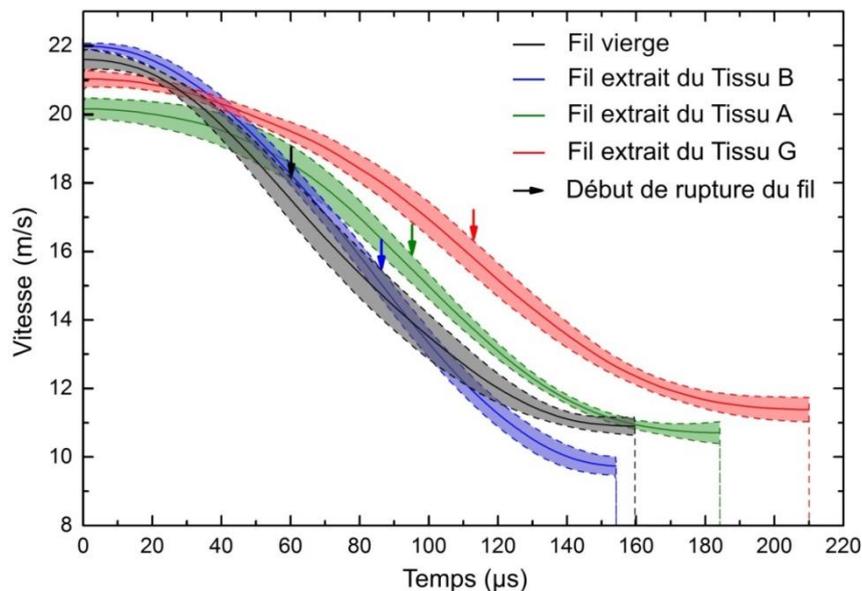


Figure 3.18 : Variation des densités chaîne et trame de la structure tissée dont est extrait le fil testé. Courbes de vitesses du projectile en fonction du temps pour les essais à 20 m/s sur fil seul de 20 mm extrait des tissus B, A et G et sur fil vierge de 20 mm. Marquage du début de la rupture progressive du fil.

En observant les graphes des Figures Figure 3.19 et Figure 3.20 illustrant respectivement les courbes de force appliquée au fil et l'énergie absorbée par le fil en fonction de son allongement, il nous est possible de répertorier d'une part les données de forces et allongements à rupture dans le Tableau 3.6 et d'autre part les données énergétiques dans le Tableau 3.7.

Elongation jusqu'au début de rupture du fil

Le fil vierge présente une force à rupture de 318 N et une déformation vraie à rupture de 5,7 %. On note une décroissance de la force à rupture des fils extraits de la structure A à la structure G, à l'exception de la structure B dont le fil présente une force à rupture supérieure à celle du fil vierge.

A l'inverse, leur déformation vraie est plus élevée et augmente de la structure B à la structure G en passant par la structure A. Leur énergie à rupture est également plus élevée que celle du fil vierge. Les raideurs des fils extraits des structures A et G sont plus faibles que celle du fil vierge, à l'exception de celle du fil extrait de la structure B qui est identique.

L'explication de la baisse de la raideur et de la force à rupture du fil ainsi que l'augmentation de sa déformation vraie à rupture pourrait se trouver dans la déformation du fil, et plus précisément des filaments qui le composent, occasionnée par l'arrangement des fils au sein de sa structure tissée.

Les pressions appliquées par les fils de trame sur le fil de chaîne testé ainsi que son confinement dans sa structure tissée génèrent des déformations locales de celui-ci qui peuvent amener à des compressions locales des filaments.

La compression du filament provoque une désorientation moléculaire qui augmente avec le niveau de déformation [2] et qui s'accompagne, à fort taux de déformation, de la formation de « kink bands » (bande de plissement) dues au flambage des chaînes macromoléculaires [3, 4]. La flexion du filament provoque également la formation de ces bandes de cisaillement après un certain niveau de déformation [5]. Celles-ci causent alors une perte des propriétés mécaniques dans le cas de fibres très orientées [5, 6] telles que les fibres de para-aramide que nous testons.

En effet, LIM et al. [7] ont découvert que la contrainte à rupture en traction d'un filament de para-aramide diminue lorsque celui-ci a subi auparavant une compression transverse. La formation de ces bandes de cisaillement, qui représentent des défauts de structure, induit des amorces de rupture ainsi qu'une baisse de l'énergie à rupture, ce qui explique cette baisse de la contrainte à rupture.

SINGLETARY [8, 9] a également découvert que le comportement mécanique d'un filament de para-aramide évoluait lors d'essais de compression transverse. Celui-ci se présente sous trois phases :

- Une première phase de déformation élastique jusqu'à 6 à 8% de déformation avec un module transverse de 2 à 2,5 GPa.
- S'en suit une seconde phase de déformation irréversible jusqu'à 20 à 40% de déformation qui s'accompagne d'une chute de la raideur transverse avec un module transverse de 0,2 à 0,5 GPa.
- Enfin, une phase de fibrillation avec une raideur transverse quasi-nulle.

Compte tenu des conséquences de la compression d'un filament sur son comportement mécanique longitudinal, on peut aller jusqu'à penser que la phase de déformation irréversible subit par celui-ci, qui provoque une chute de sa raideur transverse, peut également provoquer une chute de sa raideur longitudinale à partir d'un niveau de déformation transverse suffisamment élevé.

Cette phase de déformation plastique engendre également un phénomène d'hystérésis sur leur comportement viscoélastique. Ceci a pour conséquence un plus grand allongement à rupture des fils testés après les avoir extraits de leur structure respective et ainsi une énergie absorbée par le fil plus importante.

Le gain d'énergie absorbée par le fil dû au phénomène d'hystérésis est plus important que la perte d'énergie due à la formation d'amorces de rupture au sein des filaments. L'énergie absorbée par les fils extraits est ainsi plus importante que celle du fil vierge.

Le tissu B possède le meilleur arrangement possible entre les fils de chaîne et trame qui présentent les mêmes densités. L'amplitude d'ondulation reste alors petite malgré la forte densité trame. Cela confère ainsi aux fils de chaîne une ondulation de 19° dans sa structure.

Cet arrangement équilibré des fils de chaîne et trame dans l'espace implique une répartition équilibrée des pressions exercées par les fils de chaîne et trame entre eux. Ce phénomène se retrouve à plus grande échelle avec un aspect souple du tissu. Cela entraîne l'absence de surface de contact entre les fils de chaîne au niveau de leurs points d'intersection. Les pressions latérales entre les fils de chaîne sont alors inexistantes ce qui réduit leur confinement, et donc leur déformation.

Malgré un angle d'ondulation trame non négligeable, provoquant un écrasement latéral des fils de chaîne dans l'épaisseur, et une forte densité trame, les fils de chaîne subissent une faible déformation au sein de leur structure tissée. Celle-ci est suffisamment élevée pour modifier le comportement viscoélastique des filaments qui les composent et ainsi augmenter leur déformation vraie à rupture en traction. Cette capacité à pouvoir s'étirer plus facilement, liée à la désorientation moléculaire, cause une légère baisse de la raideur du fil, comme observée sur la Figure 3.19. Elle est

cependant suffisamment faible pour éviter la formation de défauts de structure au sein des filaments qui serait à l'origine d'amorces de rupture et qui impliquerait une baisse de la force à rupture, de l'énergie absorbée et de la déformation à rupture du fil, ainsi qu'une baisse plus prononcée de sa raideur.

Une ondulation des fils de chaîne de 19° dans sa structure n'est donc pas suffisamment élevée pour permettre la formation de bandes de cisaillement au sein des filaments qui les composent.

Avec une forte augmentation de sa déformation à rupture et une faible baisse de sa raideur, le fil de chaîne extrait de la structure B emmagasine alors plus d'énergie avant rupture lors de l'essai en traction, ce qui explique que sa force à rupture soit plus élevée que celle du fil vierge.

Du tissu B au tissu G, nous passons d'une structure équilibrée et souple à une structure plus déséquilibrée et très rigide. Cette rigidité est due à l'arrangement très confiné des fils de chaîne et trame entre eux. En effet, la densité chaîne augmente, et la densité trame, bien que celle-ci diminue, reste encore conséquente compte tenu de la grosseur du fil et continue d'assurer le bon maintien des fils de chaîne dans la structure tissée.

L'arrangement étroit des fils entre eux génère d'importantes pressions exercées par les fils de trame sur les fils de chaîne. La compression des fils de chaîne entre eux provoque une déformation de leur géométrie dans la section et accroît leur confinement. Tous ces phénomènes viennent amplifier la déformation des filaments. Celle-ci permet alors d'augmenter la déformation à rupture du fil mais est aussi suffisamment élevée pour permettre la formation de défauts de structure au sein des filaments qui composent les fils de chaîne.

L'ondulation de ces fils de chaîne est similaire à celle des fils de chaîne extrait de la structure B. La flexion des filaments n'intervient donc pas dans la formation de bandes de cisaillement. Seule la déformation géométrique induite, d'une part, par les fortes pressions exercées par les fils de trame sur les fils de chaîne et, d'autre part, par les pressions exercées par les fils de chaîne entre eux, entraîne une déformation plastique au sein des filaments et est ainsi en cause dans la formation de défauts de structure.

Cette déformation, plus importante que celle subie dans la structure B, implique alors une baisse de la force à rupture et de la raideur des fils de chaîne de la structure G, ainsi qu'une hausse de leur déformation vraie à rupture, par rapport aux fils de chaîne de la structure B.

Enfin, la structure A présente un déséquilibre des proportions entre les fils de chaîne et trame, plus important encore que celui de la structure G. La densité chaîne augmente à nouveau, tout comme la densité trame diminue. Mais celle-ci devient alors trop faible pour continuer d'assurer le bon maintien des fils de chaîne au sein de la structure malgré la grosseur des fils. Cela indique une baisse des pressions exercées par les fils de trame sur les fils de chaîne réduisant ainsi leur compression transverse. On retrouve ces phénomènes à plus grande échelle au niveau de l'aspect structurel du tissu. Celui-ci est souple de par la baisse des pressions exercées, et instable de par la mobilité des fils de chaîne dans la structure qui ne subissent que trop peu de maintien.

Les fils de chaîne ne subissent alors aucun confinement de la part des fils de trame. Seul la densité chaîne élevée génère une compression des fils de chaîne entre eux au niveau de leurs points d'intersection. Cela induit également une déformation géométrique des fils de chaîne dans leur section. L'arrangement des fils de chaîne et trame, qui découle du déséquilibre de leur densité, manifeste une indication que cette ondulation est suffisamment importante pour générer des défauts de structure au sein des filaments qui composent les fils de chaîne.

La déformation subie par les fils de chaîne de la structure A est plus élevée que celle subie par ceux de la structure B. En effet, la structure A présente une forte ondulation des fils de chaîne et un important confinement des fils de chaîne entre eux par rapport à la structure B occasionnant ainsi des défauts de structure à l'échelle du filament que ne présente pas la structure B. L'augmentation de l'allongement à rupture des fils de chaîne de la structure A est alors plus grande et leur force à rupture plus faible que pour les fils de chaîne de la structure B.

L'allure des courbes de force appliquée au fil en fonction de leur déformation vraie pour les fils extraits des tissus A et G nous indique que la déformation plastique des filaments au sein des fils de

chaîne de la structure G est plus élevée que celle pour la structure A. En effet, nous pouvons noter une plus forte déformation à rupture et réciproquement une plus faible force à rupture du fil extrait du tissu G par rapport à celui extrait du tissu A. Nous sommes alors amenés à déduire de ces résultats que le confinement et la compression du fil de chaîne par les fils de trame engendrent un endommagement des filaments qui le compose plus important que l'endommagement occasionné par sa flexion.

Début de rupture jusqu'à rupture complète du fil

On observe une réduction de l'énergie nécessaire à rompre complètement le fil avec la déformation et l'usure du fil occasionnée dans sa structure tissée.

Une fois la rupture des filaments amorcée, la déformation plastique transverse que ces derniers ont subie dans les tissus A, B et G, ainsi que l'usure apportée dans les tissus A et G semblent jouer des rôles d'amorceurs de contrainte qui accélèrent le processus de rupture des filaments restant dans le fil.

	Force à rupture F_r (N)	Déformation vraie à rupture ε_r (%)	Déformation vraie à rupture complète du fil ε'_r (%)
Fil vierge	318	5,7	11,9
Fil extrait du tissu B	345	8,0	11,6
Fil extrait du tissu A	280	8,7	13,4
Fil extrait du tissu G	221	10,3	15,7

Tableau 3.6 : Tableau comparatif des données de force à rupture et de déformation vraie à rupture pour le fil vierge et les fils extraits des structures tissées B, A et G.

	E_{abs}	E'_{abs}	$E_{abs\ tot}$
Fil vierge	0,19	0,26	0,45
Fil extrait du tissu B	0,33	0,18	0,51
Fil extrait du tissu A	0,22	0,17	0,39
Fil extrait du tissu G	0,25	0,16	0,41

Tableau 3.7 : Tableau répertoriant (1) l'énergie nécessaire à l'élongation jusqu'au début de rupture du fil $E_{abs\ spe}$, (2) l'énergie absorbée du début de la rupture jusqu'à la rupture complète du fil $E'_{abs\ spe}$, (3) l'énergie absorbée totale $E_{abs\ spe\ tot}$, pour le cas du fil vierge et des fils extraits des structures tissées B, A et G.

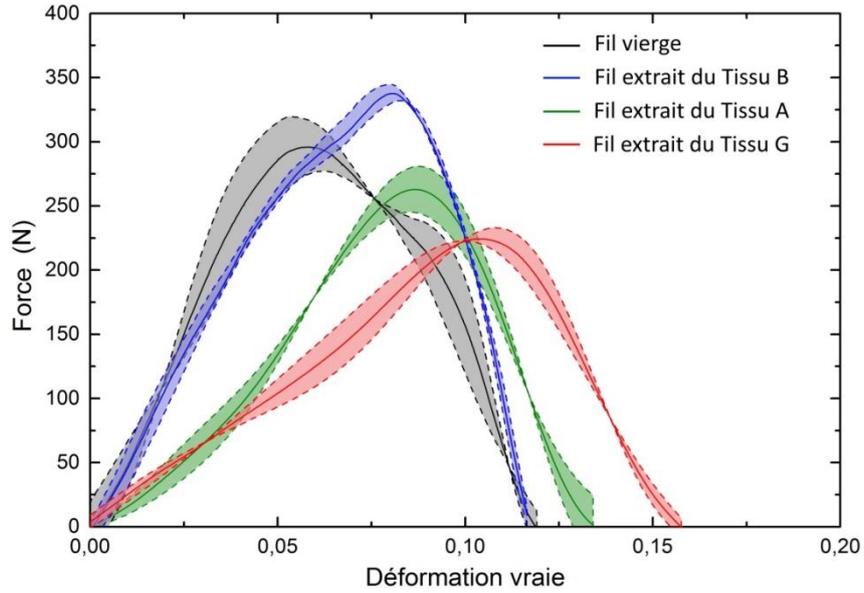


Figure 3.19 : Variation des densités chaîne et trame de la structure tissée dont est extrait le fil testé. Courbes de force exercée à l'extrémité du fil en fonction de sa déformation vraie pour les essais à 20 m/s sur fil vierge de 20 mm ainsi que sur fil seul de 20 mm extrait des tissus B, A et G.

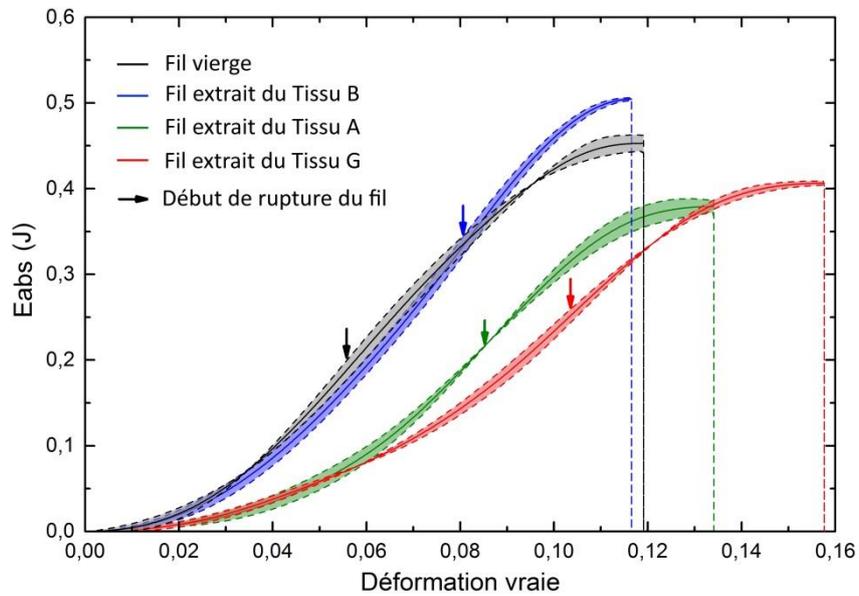


Figure 3.20 : Variation des densités chaîne et trame de la structure tissée dont est extrait le fil testé. Courbes d'énergie absorbée par le fil en fonction de sa déformation vraie pour les essais réalisés à 20 m/s sur fil vierge de 20 mm ainsi que sur fil seul de 20 mm extrait des tissus B, A et G. Marquage du début de la rupture progressive du fil.

III.2. Comportement mécanique du fil testé dans sa structure tissée

Dans une structure tissée, le comportement mécanique des fils qui la composent dépend de leurs paramètres physiques et matériaux tels que le nombre de filament, la nature du filament, la densité linéique du filament ainsi que l'usure due au processus de tissage. Il dépend également de paramètres mécaniques tels que la vitesse de déformation. Cependant, dans une structure tissée, les fils ne sont pas isolés et interagissent entre eux. Ainsi, le comportement mécanique des fils présents dans le tissu dépend également d'autres paramètres internes à la structure que nous définissons par la suite.

Dans cette partie de chapitre, les fils sont donc testés au sein de leur structure tissée.

La variation des densités chaîne et trame dans une structure tissée fait intervenir à la fois un changement du nombre de points de liage présents dans la structure tissée et une modification de la surface de contact totale entre le fil de chaîne testé et les fils de trame transverses en contact. C'est pourquoi nous commençons l'étude du comportement mécanique d'un fil testé dans sa structure tissée par rapport au nombre de points de liage et à surface de contact totale égale. Nous poursuivons cette étude en faisant varier la surface de contact totale avec un nombre de points de liage équivalent. Suite à l'étude séparée de l'influence de ces deux paramètres, nous finissons par étudier le comportement mécanique du fil testé dans sa structure tissée en modifiant les densités chaîne et trame.

III.2.1. Influence du nombre de points de liage à surfaces de contact totales égales

III.2.1.1. Protocole d'essai

Nous commençons notre étude par l'influence du nombre de point de liage sur le comportement mécanique d'un fil testé dans sa structure et à surface de contact totale équivalente.

Des structures tissées, dont l'architecture et la densité de fils trame varient, ont été réalisées. Une modification de ces deux critères permet de faire varier le nombre de points de liage de ces structures. Les points de liages correspondent aux points de contact entre un fil de chaîne et tous les fils de trame qui se trouve en travers et ce sur toute sa longueur (Figure 3.21).

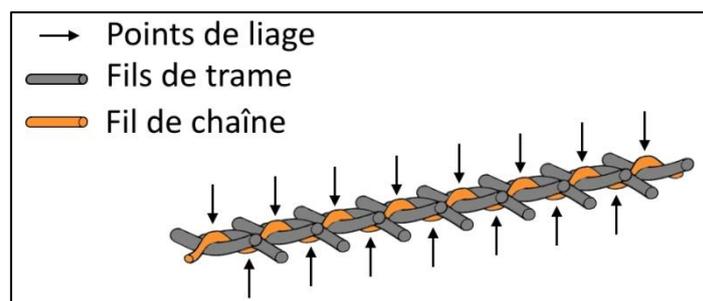


Figure 3.21 : Représentation des points de liage entre un fil de chaîne et les différents fils de trame transverses.

Quatre structures tissées d'architectures différentes sont étudiées. Elles ont été conçues de façon à ce que leur densité de fils de chaîne, et ainsi leur surface de contact inter-fil totale, soit identique (Figure 3.22). Une vérification des surfaces de contact a été réalisée à l'aide d'observation au

microscope de coupes transverses des différentes structures tissées. Ainsi, seul le nombre de points de liage varie.

Les structures tissées sont les suivantes :

- Une structure toile avec 5 fils de trame (duites) au cm ; soit 10 points de liage sur un fil de chaîne de 2 cm.
- Une structure cannelée 2.1.1.1. avec 5 duites au cm ; soit 8 points de liage sur un fil de chaîne de 2 cm.
- Une structure cannelée 2.2. avec 5 duites au cm ; soit 5 points de liage sur un fil de chaîne de 2 cm.
- Une structure cannelée 2.3 avec 5 duites au cm ; soit 4 points de liage sur un fil de chaîne de 2 cm.

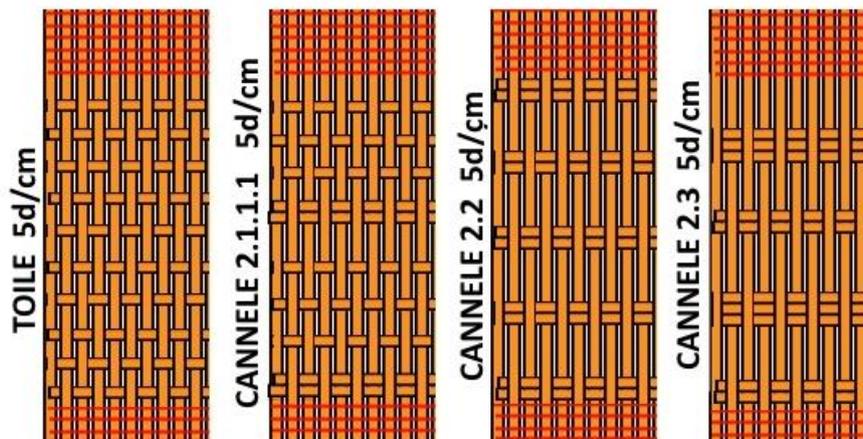


Figure 3.22 : Représentation des structures tissées à surfaces de contact inter-fils totales équivalentes dans lesquelles sont testées les fils de chaîne et dont le nombre de points de liage varie.

III.2.1.2. Résultats expérimentaux

Chaque essai consiste à exercer une sollicitation en traction sur un des fils présents dans sa structure tissée en rattachant une de ses extrémités au projectile, l'autre étant fixée avec le reste de la structure dans le support. Des séries de 3 à 6 essais ont été réalisées sur chacune des quatre structures à une vitesse de 20 m/s et ce pour une longueur d'échantillon de 20 mm.

D'après les courbes de vitesse illustrées dans la Figure 3.23, on remarque que les erreurs standards sur la moyenne sont deux fois plus importantes pour des essais sur fils testés dans leur structure tissée que pour des essais sur fils isolés. Ceci s'explique par la présence d'interactions entre le fil testé et ceux de la structure tissée ce qui ajoute une marge d'erreur supplémentaire sur la réaction du fil lors de sa sollicitation. Avec une erreur standard inférieure à 10%, les données restent néanmoins comparables entre elles. On note également une dispersion de 2 m/s entre les vitesses initiales de chaque courbe soit 10 % de la vitesse initiale théorique ce qui reste acceptable pour pouvoir comparer les phénomènes observés. Enfin, la correspondance de l'allure des courbes avec le profil attendu nous permet de valider la conformité des résultats obtenus.

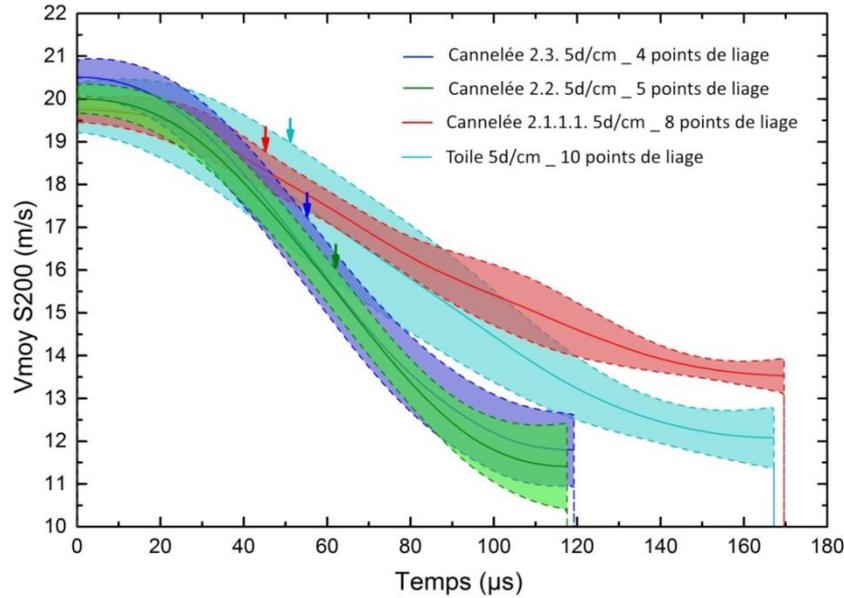


Figure 3.23 : Variation du nombre de points de liage dans la structure tissée testée.
 Courbes de vitesse du projectile en fonction du temps pour les essais sur fil de 20 mm testé à 20 m/s dans les structures tissées suivantes : Cannelée 2.3. 5d/cm, Cannelée 2.2. 5d/cm, Cannelée 2.1.1.1. d et Toile 5d/cm. Marquage du début de la rupture progressive du fil.

D'après les courbes de force appliquée en bout de fil en fonction de sa déformation vraie de la Figure 3.24 et les courbes d'énergie absorbée par le fil en fonction de sa déformation vraie de la Figure 3.25, nous obtenons les tableaux de données Tableau 3.8 et Tableau 3.9.

Elongation jusqu'au début de rupture du fil

Nous observons alors que les fils testés dans les structures à 4 et 5 points de liage ont un comportement à rupture similaire au fil vierge. En effet, leur énergie absorbée à rupture et leur déformation à rupture se retrouvent respectivement autour de 0,20 J et de 5,5 %, ce qui leur confère une force à rupture du même ordre que celle du fil vierge et une raideur identique.

En ce qui concerne les fils testés dans les structures à 8 et 10 points de liage, leurs comportements mécaniques sont identiques jusqu'à rupture du fil mais différent de ceux des fils testés dans les structures à 4 et 5 points de liage. Ils présentent en effet une énergie à rupture deux fois plus faible et une déformation à rupture autour de 4,4 %. De même, leur force à rupture est presque deux fois plus petite et leur raideur est plus faible.

Les surfaces de contact totales entre les fils de chaîne testés et les fils de trame transverses, respectif aux structures dans lesquels ils sont testés, sont équivalentes dans les quatre structures. Il n'y a donc pas plus de frottement inter-fils dans une structure que dans une autre.

Les points de contact présents le long du fil de chaîne exercent chacun une pression sur celui-ci. Plus le nombre de points de contact augmente, plus la pression globale sur le fil est importante pour le faire fléchir (Figure 3.26). Par analyse microscopique des coupes transverses de chaque structure, on retrouve une augmentation linéaire de l'angle d'ondulation du fil de chaîne avec le nombre de points de liage (Figure 3.27). La flexion du fil de chaîne, engendrée par les pressions locales des fils transverses aux points de contact, implique également une flexion des filaments qui le composent.

Des études ont été menées par Hearle [6] et Baley [5] concernant l'impact de la flexion d'un filament sur son comportement mécanique. Ils ont découvert que la courbure d'un filament provoque la formation de défauts sous forme de bandes de cisaillement dans sa structure. Celles-ci représentent alors des amorces de rupture et sont à l'origine d'une baisse de la force à rupture du filament.

Les fils de chaîne testés dans les structures à 4 et 5 points de liage possèdent une ondulation suffisamment faible pour ne pas provoquer la formation d'amorces de rupture au sein des filaments et conservent ainsi une force à rupture identique à celle du fil vierge.

Les fils testés dans les structures à 8 et 10 points de liage subissent quant à eux des amorces de rupture aux niveaux de leurs points de liage de par leurs ondulations plus élevées. Leurs énergies absorbées à rupture ainsi que leurs forces à rupture sont alors plus faibles que pour les fils testés dans les structures à 4 et 5 points de liage.

Nous avons vu dans le paragraphe précédent que la déformation du fil testé, lié à l'arrangement des fils de chaîne et trame entre eux, génère également un phénomène d'hystérésis sur son comportement viscoélastique qui se traduit par une plus grande capacité d'allongement jusqu'à rupture. Elle implique également un affaiblissement de la raideur du fil due à cette capacité d'allongement plus importante et à l'apparition de défauts de structure au sein des filaments.

Les fils testés dans les structures à 8 et 10 points de liage ont ainsi une plus grande capacité d'allongement jusqu'à rupture que les fils testés dans les structures à 4 et 5 points de liage, de par leur plus grande déformation dans leur structure tissée. Ce phénomène compense la perte d'allongement provoquée par l'amorce de leur rupture ce qui explique que leur déformation vraie à rupture soit proche de celle des fils des structures à 4 et 5 points de liage tout en restant plus faible.

Nous retrouvons également une baisse de la raideur des fils testés dans les structures à 8 et 10 points de liage par rapport à celle testée dans les structures à 4 et 5 point de liages due à leur plus grande déformation dans leur structure tissée.

Début de rupture jusqu'à rupture complète du fil

On observe une décroissance linéaire de la force appliquée au fil pour ceux testés dans les structures à 4 et 5 points de liage et une décroissance par paliers dans le cas des fils testés dans les structures à 8 et 10 points de liage.

Pour les fils présents dans les structures à 4 et 5 points de liage, après l'amorce de la rupture des filaments qu'ils contiennent, les déformations plastiques transverses engendrées dans les structures tissées jouent ici le rôle de concentrations de contraintes. De ce fait, leur rupture se déroule plus rapidement et leur déformation vraie ainsi que leur énergie absorbée après rupture complète sont plus faibles.

Dans les structures à 8 et 10 points de liage, ce phénomène est présent mais ces effets sont compensés par ceux d'un autre. Leur nombre de points de liage non négligeable confine les fils de chaîne dans ces structures. Les frottements engendrés entre le fil de chaîne testé et les autres de la structure viennent retarder la rupture progressive des filaments. Ce phénomène permet aux fils de chaîne testés dans ces structures d'atteindre un allongement après rupture complète similaire à celui d'un fil vierge. Cela indique une compensation totale des effets de la présence de concentrations de contraintes par ceux induits par les frottements inter-fils.

	Nombre points de liage	Force à rupture (N)	Déformation vraie à rupture (%)
Fil vierge	/	295 ± 23	5,6
Cannelée 2.3. 5d/cm	4	327 ± 8	5,4
Cannelée 2.2 5d/cm	5	320 ± 3	5,6
Cannelée 2.1.1.1. 5d/cm	8	153 ± 18	4,2
Toile 5d/cm	10	180 ± 18	4,6

Tableau 3.8 : Tableau comparatif des données de force à rupture et de déformation vraie à rupture en fonction du nombre de points de liage entre le fil vierge et les fils testés dans les structures suivantes : Cannelée 2.3. 5d/cm, Cannelée 2.2. 5d/cm, Cannelée 2.1.1.1. 5d/cm et Toile 5d/cm.

	Nombre points de liage	Energie nécessaire à l'élongation jusqu'à rupture du fil (J)	Energie nécessaire à la rupture complète du fil (J)	Energie totale absorbée (J)
Fil vierge	/	0,19	0,26	0,45
Cannelée 2.3. 5d/cm	4	0,20	0,17	0,37
Cannelée 2.2 5d/cm	5	0,21	0,14	0,35
Cannelée 2.1.1.1. 5d/cm	8	0,07	0,20	0,27
Toile 5d/cm	10	0,10	0,22	0,32

Tableau 3.9 : Tableau comparatif des données énergétiques en fonction du nombre de points de liage entre le fil vierge et les fils testés dans les structures suivantes : Cannelée 2.3. 5d/cm, Cannelée 2.2. 5d/cm, Cannelée 2.1.1.1. 5d/cm et Toile 5d/cm.

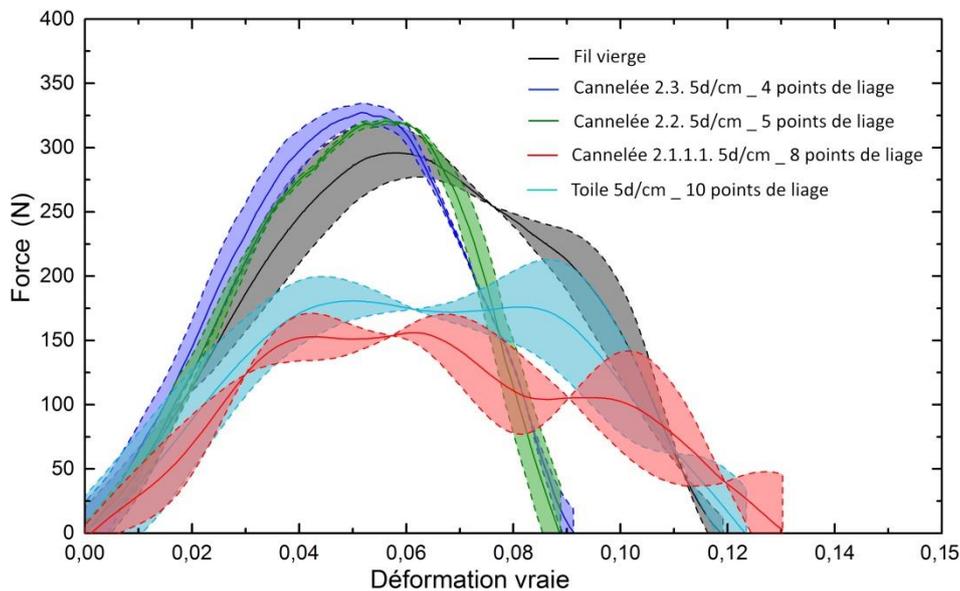


Figure 3.24 : Variation du nombre de points de liage dans la structure tissée testée. Courbes de force exercée à l'extrémité du fil en fonction de sa déformation vraie pour les essais à 20 m/s sur fil testé dans les structures tissées suivantes : Cannelée 2.3. 5d/cm, Cannelée 2.3. 5d/cm, Cannelée 2.1.1.1. 5d/cm et Toile 5d/cm, et sur fil vierge de 20 mm.

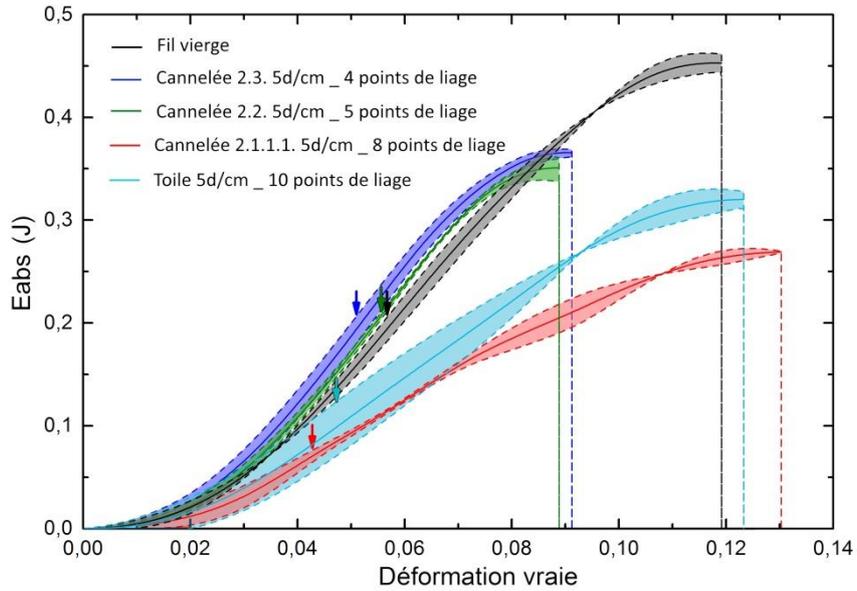


Figure 3.25 : Variation du nombre de points de liage dans la structure tissée testée. Courbes d'énergie absorbée par le fil en fonction de sa déformation vraie pour les essais à 20 m/s sur fil de 20 mm testé dans les structures suivantes : Cannelée 2.3. 5d/cm, Cannelée 2.2. 5d/cm, Cannelée 2.1.1.1. 5d/cm et Toile 5d/cm, et sur fil vierge de 20 mm. Marquage du début de la rupture progressive du fil.

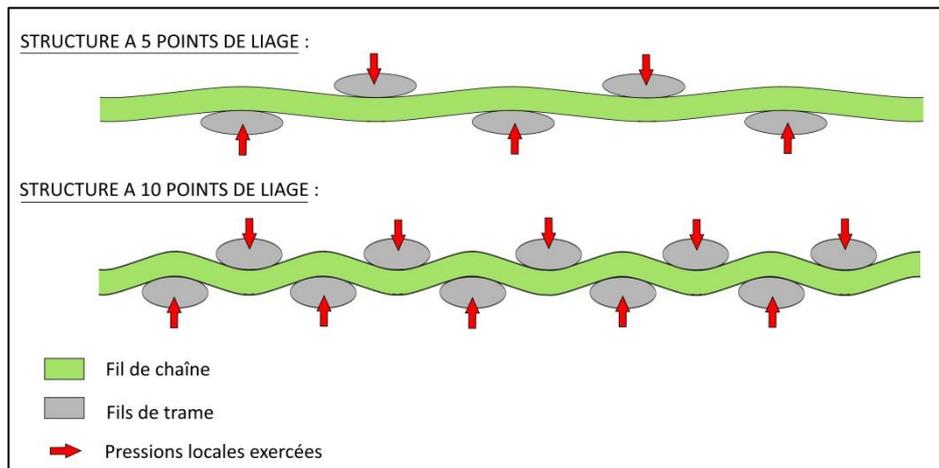


Figure 3.26 : Schéma explicatif du changement d'ondulation du fil en fonction du nombre de points de liage.

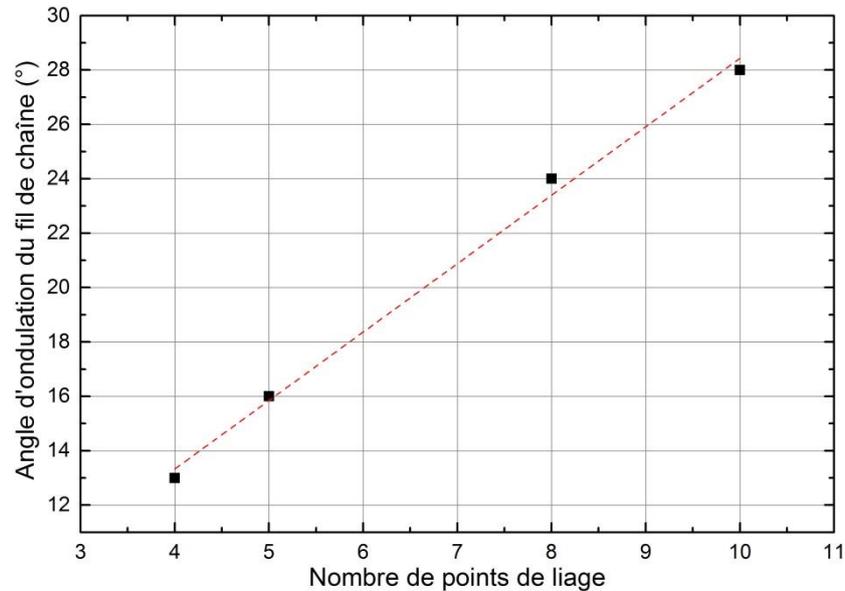


Figure 3.27 : Variation de l'angle d'ondulation du fil de chaîne en fonction du nombre de points de liage.

III.2.2. Influence de la surface de contact totale à points de liage équivalent

III.2.2.1. Protocole d'essai

Toujours dans l'intérêt de dissocier l'impact que peut avoir le nombre de points de liage et la surface de contact inter-fils totale d'une structure tissée sur le comportement mécanique d'un fil de chaîne testé dans cette même structure, nous identifions par la suite l'impact de la variation de surface de contact inter-fils totales à nombre de points de liage fixe sur le comportement mécanique d'un même fil.

Deux couples de structures tissées sont réalisées. Chacune de ces structures possède une architecture différente. Pour chaque couple, la densité de fils de chaîne des deux structures est identique. Seuls leur densité de fils de trame, ainsi que le nombre d'insertion de ces fils par passage, change de façon à conserver un nombre de points de liage identique par couple, tout en faisant varier les surfaces de contact inter-fils totales entre les structures du même couple (Figure 3.28).

Le couple de structures possédant 8 points de liage :

- Un Cannelé 2.1.1.1. avec 10 chaînes/cm et 5 duites/cm : 10 fois la surface unitaire inter-fil
- Un Cannelé 2.2. avec 10 chaînes/cm et 8 duites/cm : 16 fois la surface unitaire inter-fil

Le couple de structures possédant 4 points de liage :

- Un Cannelé 2.3. avec 10 chaînes/cm et 5 duites/cm : 10 fois la surface unitaire inter-fil
- Une Toile avec 10 chaînes/cm et 2 duites/cm : 4 fois la surface unitaire inter-fil

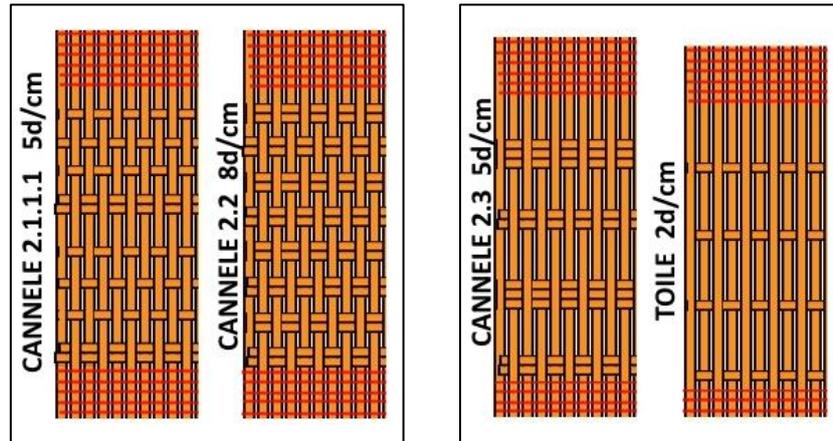


Figure 3.28 : Représentation des deux couples de structures tissées à points de liage équivalents dans lesquelles sont testés les fils de chaîne et dont la surface de contact inter-fils totale varie.

III.2.2.2. Résultats expérimentaux

Des lots de 4 à 6 essais ont été appliqués sur les fils de chaîne à tester présents dans chacune de ces structures. Ces fils sont sollicités à une même vitesse de 20 m/s et sur une même longueur de 2 cm avec un projectile de 2,6 g.

Ces essais nous permettent d'obtenir les courbes de vitesses en fonction du temps pour les fils testés dans le couple de structures à 8 points de liage (Figure 3.29) et dans le couple de structures à 4 points de liage (Figure 3.30).

On retrouve sur ces courbes une erreur standard comprise entre 5 et 10% due à la présence d'interactions entre le fil testé et ceux de la structure tissée. On note également une dispersion de 2 m/s entre les vitesses initiales de chaque courbe soit 10 % de la vitesse initiale théorique ce qui reste acceptable pour pouvoir comparer les phénomènes observés. Enfin, la correspondance de l'allure des courbes avec le profil attendu nous permet de valider la conformité des résultats obtenus.

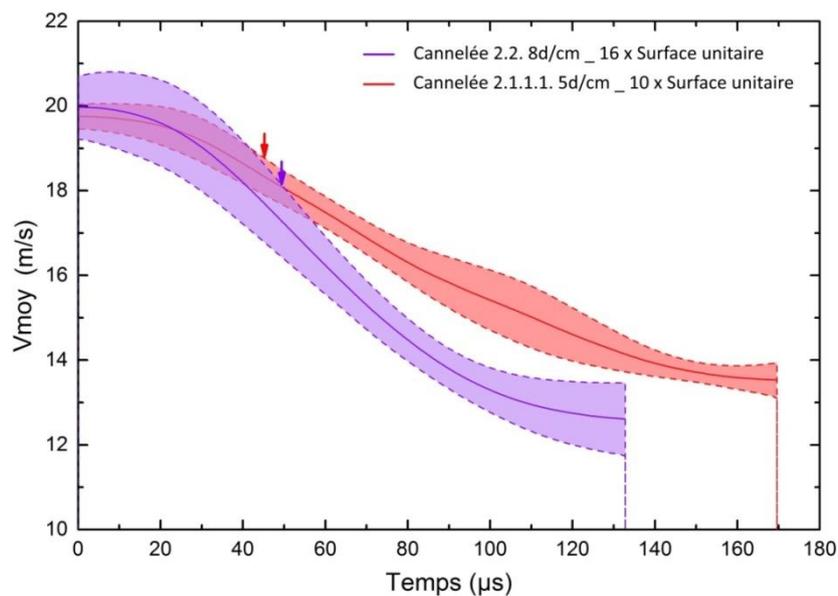


Figure 3.29 : Variation de la surface de contact totale inter-fils _ 8 points de liage. Courbes de vitesse du projectile en fonction du temps pour les essais réalisés à 20 m/s sur fil de 20 mm testé dans les structures tissées suivantes : Cannelée 2.2. 8d/cm et Cannelée 2.1.1.1. 5d/cm. Marquage du début de la rupture progressive du fil.

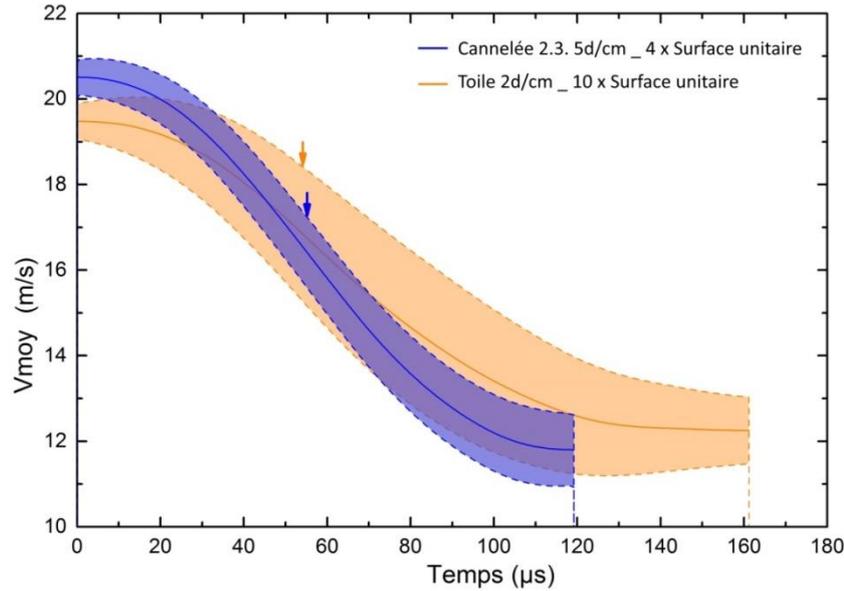


Figure 3.30: Variation de la surface de contact totale inter-fils _ 4 points de liage. Courbes de vitesse du projectile en fonction du temps pour les essais réalisés à 20 m/s sur fil de 20 mm testé dans les structures tissées suivantes : Cannelée 2.3. 5d/cm et Toile 2d/cm. Marquage du début de la rupture progressive du fil.

D'après les courbes de force appliquée au fil et d'énergie absorbée par celui-ci en fonction de sa déformation vraie, respectivement illustrées sur les Figures Figure 3.31 et Figure 3.32 et les Figures Figure 3.33 et Figure 3.34, nous obtenons les Tableaux de données Tableau 3.10 et Tableau 3.11.

On retrouve l'impact du nombre de points de liage sur la force et la déformation à rupture ainsi que sur l'énergie absorbée jusqu'à rupture. Ces derniers chutent à cause des amorces de rupture créées par la forte ondulation des fils de chaîne qu'engendre le nombre élevé de points de liage.

Que ce soit pour le couple de structure à 4 ou 8 points de liage, une augmentation de 6 fois la surface unitaire (S_u) pour la surface de contact totale inter-fils génère un même gain d'énergie absorbée jusqu'à rupture du fil. Ceci s'explique par la présence de frottements entre le fil testé et les fils transverses qui augmentent avec la surface de contact. Ce phénomène implique une élévation de la force appliquée au fil pour atteindre sa rupture et de la déformation vraie à rupture du fil. Ce même gain d'énergie absorbée par le fil, signifie également qu'une surface de contact égale à 16 fois la surface de contact unitaire n'est pas génératrice d'amorces de rupture.

On remarque que les fils testés dans les structures « Toile 2d/cm » et « Cannelée 2.2. 8d/cm » présentent le même comportement mécanique en tout point. Leurs forces et déformations à rupture, leurs énergies absorbées jusqu'à rupture du fil et leurs énergies nécessaire à sa rupture complète sont identiques. Cela implique que la perte d'énergie causée par l'augmentation de 4 à 8 points de liage est compensée par le gain d'énergie causé par l'ajout de 12 fois la surface de contact unitaire inter-fils à la surface de contact inter-fils totale.

Le comportement mécanique jusqu'à rupture du fil vierge et du fil testé dans la structure « Cannelée 2.3. 5d/cm » est identique. En effet, ces deux fils possèdent tous deux une même énergie d'amorce de rupture ainsi qu'une déformation vraie à rupture et une force de rupture similaires. Or, la présence d'une importante surface de contact inter-fils du fil dans le « Cannelée 2.3. 5d/cm » par rapport au fil vierge implique que les effets énergétiques de ce paramètre sont compensés par une perte d'énergie liée à un paramètre structural du tissu hormis le nombre de points de liage.

III.2. Comportement mécanique du fil testé dans sa structure tissée

	Nombre points de liage	Surface de contact inter-fils total ($\times S_u$)	Force à rupture (N)	Déformation vraie à rupture (%)
Cannelée 2.1.1.1. 5d/cm	8	10	153 ± 18	4,2
Cannelée 2.2. 8d/cm	8	16	258 ± 42	4,8
Toile 2d/cm	4	4	239 ± 43	4,9
Cannelée 2.3 5d/cm	4	10	327 ± 8	5,4
Fil vierge	/	/	295 ± 23	5,6

Tableau 3.10 : Tableau comparatif des données de force à rupture et de déformation vraie à rupture en fonction de leur surface de contact inter-fils totale entre le fil vierge et les deux couples de structures tissées au nombre de points de liage différent.

	Nombre points de liage	Surface de contact inter-fils total ($\times S_u$)	Energie nécessaire à l'élongation jusqu'à rupture du fil (J)	Energie nécessaire à la rupture complète du fil (J)	Energie totale absorbée (J)
Cannelée 2.1.1.1. 5d/cm	8	10	0,07	0,20	0,27
Cannelée 2.2. 8d/cm	8	16	0,13	0,18	0,31
Toile 2d/cm	4	4	0,12	0,18	0,30
Cannelée 2.3 5d/cm	4	10	0,19	0,17	0,36
Fil vierge	/	/	0,19	0,26	0,45

Tableau 3.11 : Tableau comparatif des données de force à rupture et de déformation vraie à rupture en fonction de leur surface de contact inter-fils totale entre le fil vierge et les deux couples de structures tissées au nombre de points de liage différent.

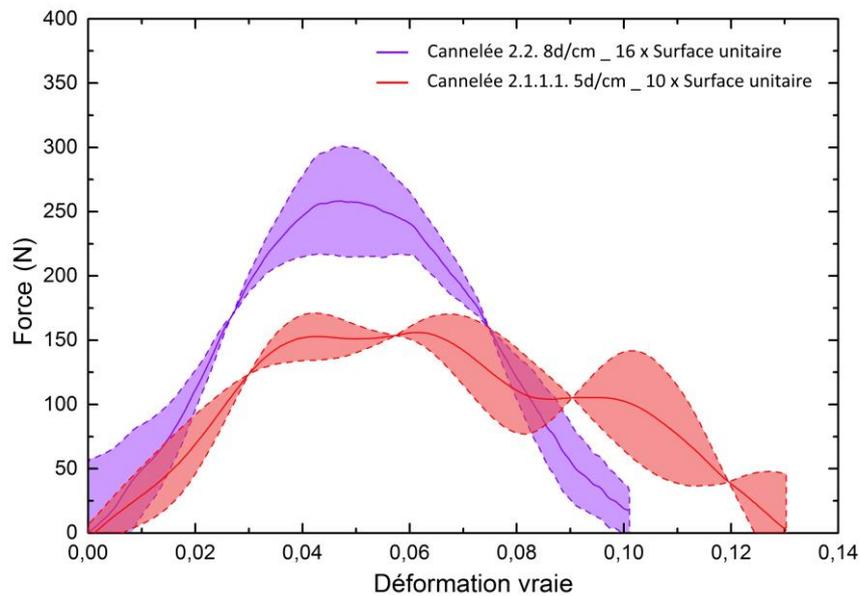


Figure 3.31 : Variation de la surface de contact totale inter-fils _ 8 points de liage. Courbes de force appliquée au fil en fonction de sa déformation vraie pour les essais réalisés à 20 m/s sur fil de 20 mm testé dans les structures tissées suivantes : Cannelée 2.2. 8d/cm et Cannelée 2.1.1.1. 5d/cm.

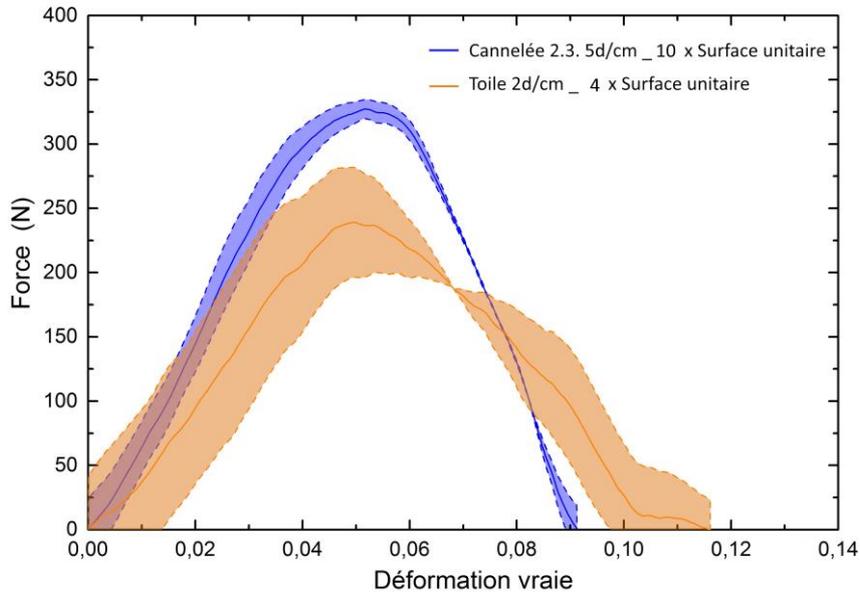


Figure 3.32 : Variation de la surface de contact totale inter-fils _ 4 points de liage.
 Courbes de force appliquée au fil en fonction de sa déformation vraie pour les essais réalisés à 20 m/s sur fil de 20 mm testé dans les structures tissées suivantes : Cannelée 2.3. 5d/cm et Toile 2d/cm.

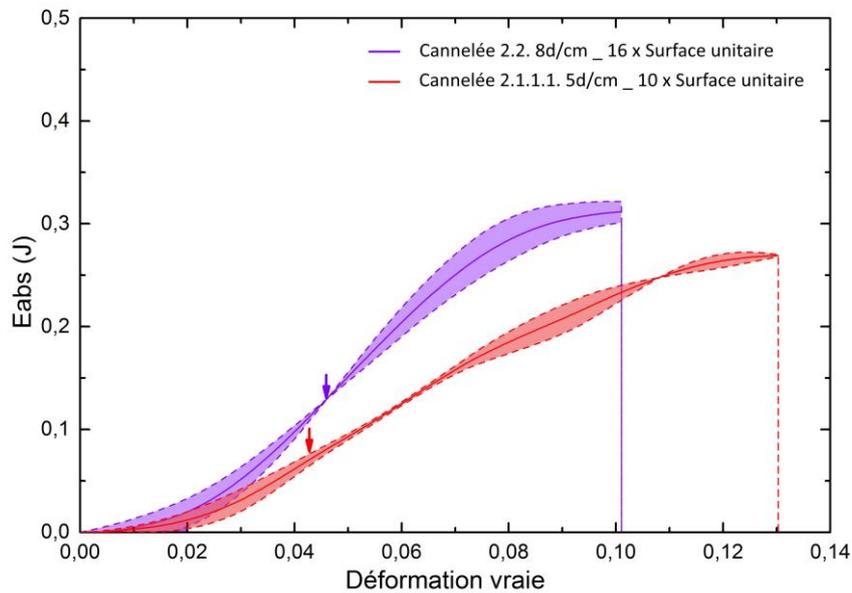


Figure 3.33 : Variation de la surface de contact totale inter-fils _ 8 points de liage.
 Courbes d'énergie absorbée par le fil en fonction de sa déformation vraie pour les essais réalisés à 20 m/s sur fil de 20 mm testé dans les structures tissées suivantes : Cannelée 2.2. 8d/cm et Cannelée 2.1.1.1. 5d/cm.

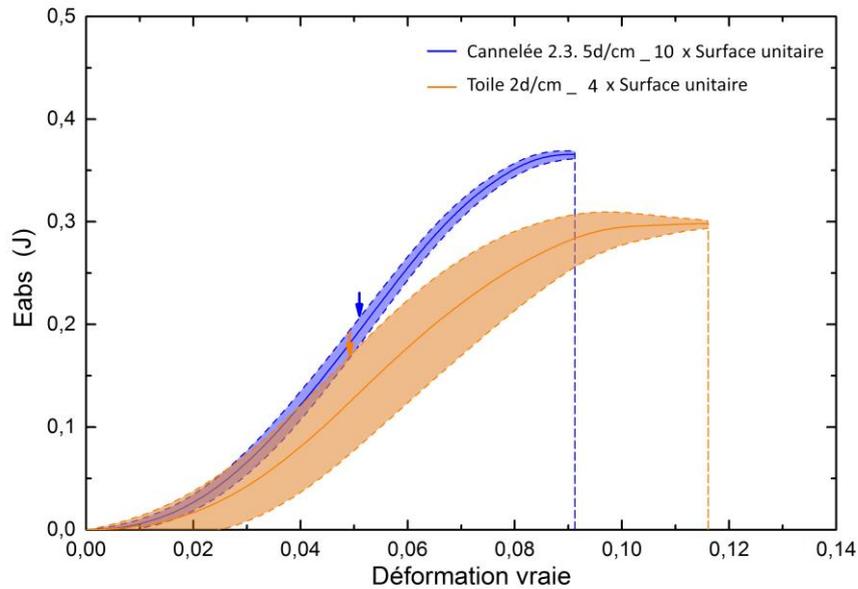


Figure 3.34 : Variation de la surface de contact totale inter-fils _ 4 points de liage.
 Courbes d'énergie absorbée par le fil en fonction de sa déformation vraie pour les essais réalisés à 20 m/s sur fil de 20 mm testé dans les structures tissées suivantes : Cannelée 2.3. 5d/cm et Toile 2d/cm.

III.2.3. Impacts du changement de l'arrangement structural d'un tissu sur le comportement mécanique d'un de ses fils testé au sein de cette même structure.

III.2.3.1. Protocole d'essai

Après avoir caractérisé l'influence que portent à la fois l'effet de structure, le nombre de points de contact et la surface de contact inter-fils sur le comportement mécanique du fil de chaîne testé dans sa structure, nous pouvons dès à présent étudier celui-ci sous l'influence simultanée de ces trois paramètres.

L'étude est réalisée sur des fils de chaîne testés dans trois structures tissées différentes. Ces trois structures sont identiques à celles présentées dans le paragraphe III.1.2.1. Description du protocole d'essai et correspondent aux « Toile A », « Toile G » et « Toile B » telles que :

- La Toile « B » possède 6,2 chaînes/cm et 6,8 duites/cm : frisure de fils de chaîne $\theta_{\beta} = 19^{\circ}$
- La Toile « G » possède 10,0 chaînes/cm et 5,3 duites/cm : frisure de fils de chaîne $\theta_{\gamma} = 20^{\circ}$
- La Toile « A » possède 15,6 chaînes/cm et 3,9 duites/cm : frisure de fils chaîne $\theta_{\alpha} = 27^{\circ}$

La structure A présente une forte densité de fils de chaîne qui impose une faible densité de fils trame. De ce fait, les fils de chaîne ondulent fortement et sont beaucoup plus répartis dans la longueur ce qui donne à la structure un aspect souple et peu stable.

La structure G présente une densité de fils de chaîne moins prononcée, laissant ainsi plus de place aux fils de trame qui voient leur densité augmenter. Les fils de chaîne ont une ondulation beaucoup plus faible, se répartissent plus dans la largeur et moins dans la longueur, ce qui confèrent à la structure un aspect rigide et stable.

Enfin, la structure B présente une densité de fils de chaîne plus faible, égale à la densité de fils de trame. L'ondulation des fils de chaîne est quasiment identique à celle de la structure G et la répartition des fils de chaîne et de trame à la surface du tissu est équilibrée, autant dans la largeur que dans la longueur, ce qui donne à la structure un aspect souple et stable.

Contrairement à l'étude menée dans le paragraphe III.1.2.1., les fils testés ne sont pas extraits mais conservés dans ces structures tissées. La variation de surface de contact devient alors une donnée à prendre en compte.

Chaque densité de fils de chaîne impose une certaine densité de fils de trame dans leur structure. De cela en découle différents angles de frisure pour les fils de chaîne mais aussi pour les fils de trame.

Ces variations au sein de chaque structure impliquent également un changement de la surface de contact inter-fils « chaîne/trame » mais aussi « chaîne/chaîne ».

En ce qui concerne les surfaces de contact inter-fils « chaîne/trame », l'observation de coupes dans le sens chaîne et trame de chacune des structures (Figure 3.35.a et .b) nous a permis de retrouver les courbures qui définissent leur surface de contact inter-fil respective (Figure 3.35 .c) et ainsi de calculer ces surfaces grâce à une représentation graphique 3D (Figures Figure 3.36, Figure 3.37 et Figure 3.38).

Nous constatons alors que la surface de contact inter-fil « chaîne/trame » augmente significativement au fur et à mesure qu'un équilibre entre les densités chaîne et trame se fait.

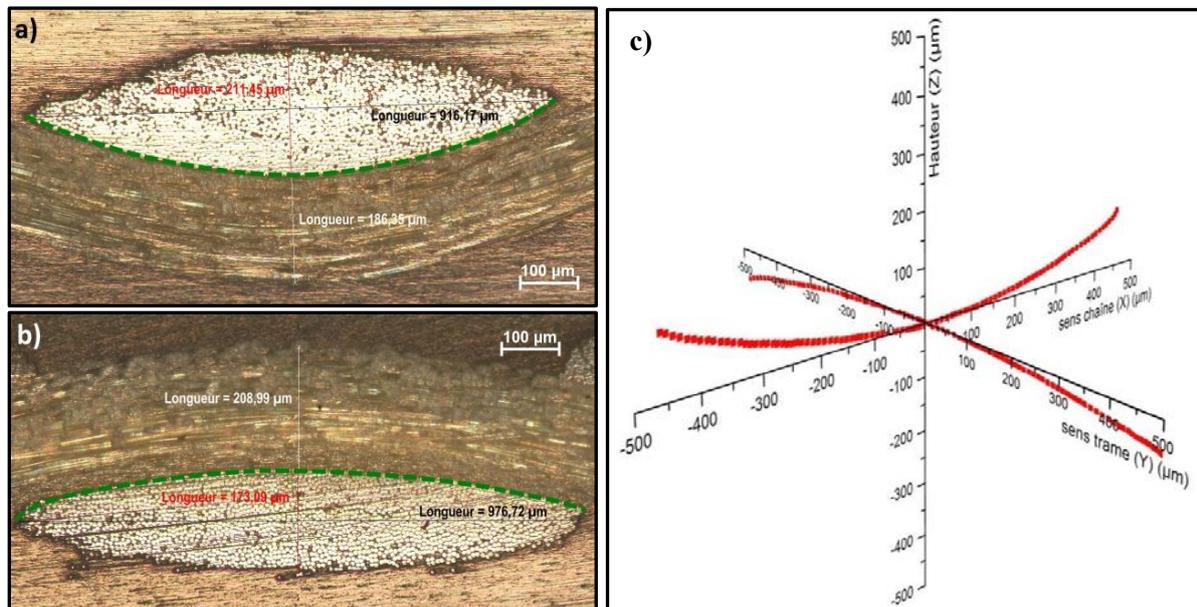


Figure 3.35 : Observations au microscope optique de coupes transverses réalisées a) dans le sens chaîne et b) dans le sens trame de la structure tissée B. c) Représentation dans l'espace des courbures définissant la surface de contact inter-fils « chaîne/trame » dans cette même structure.

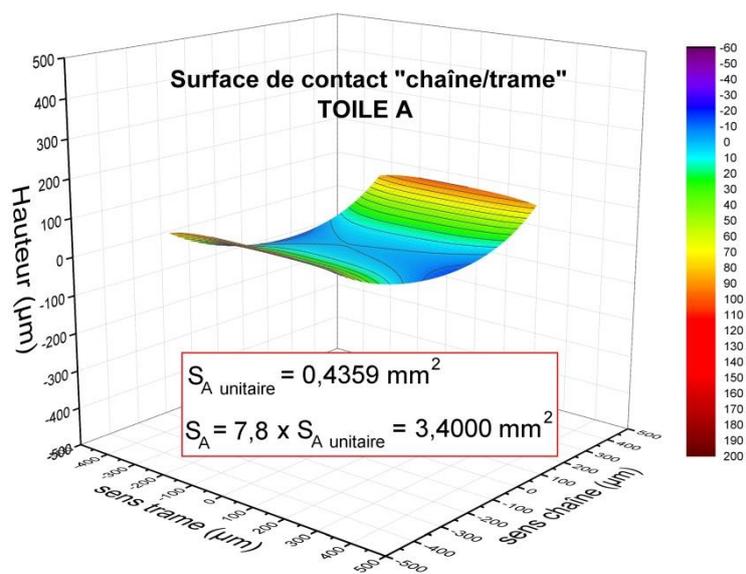


Figure 3.36 : Représentation graphique 3D de la surface de contact inter-fils « chaîne/trame » dans la structure tissée A.

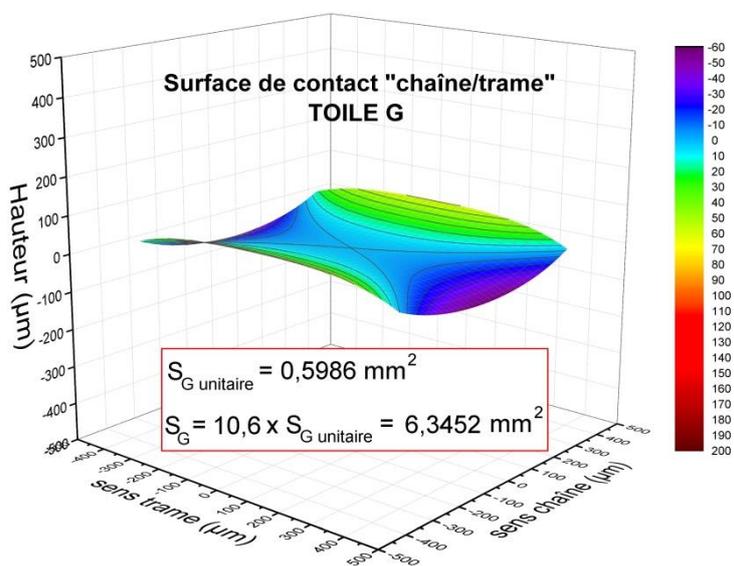


Figure 3.37 : Représentation graphique 3D de la surface de contact inter-fils « chaîne/trame » dans la structure tissée G.

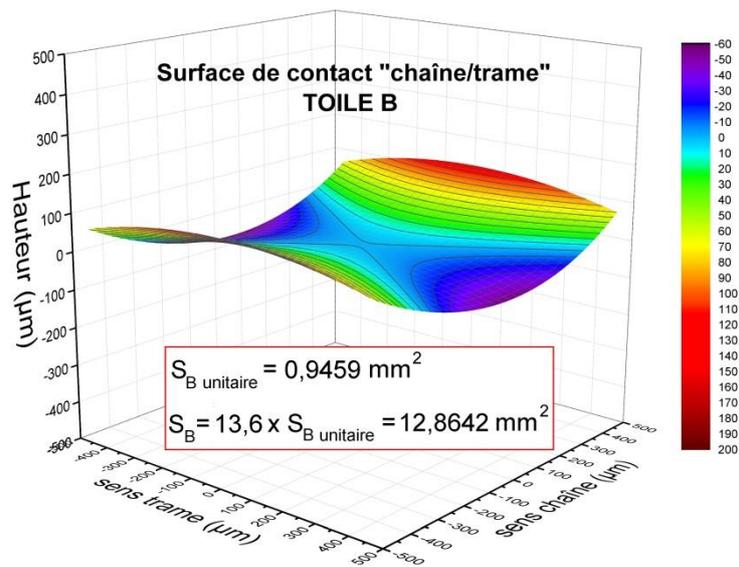


Figure 3.38 : Représentation graphique 3D de la surface de contact inter-fils « chaîne/trame » dans la structure tissée B.

En ce qui concerne les surfaces de contact inter-fils « chaîne/chaîne », celles-ci varient également avec les densités chaîne et trame. En effet, une photo des trois structures tissées prise à contre-jour permet de révéler ces zones de contact. On remarque également qu'elles sont inexistantes dans la structure tissée B de par l'équilibre parfait entre les densités chaîne et trame, c'est-à-dire, une compaction latérale identique des fils de chaîne et trame et une organisation des fils la plus optimale sur la surface du tissu. (Figure 3.39).

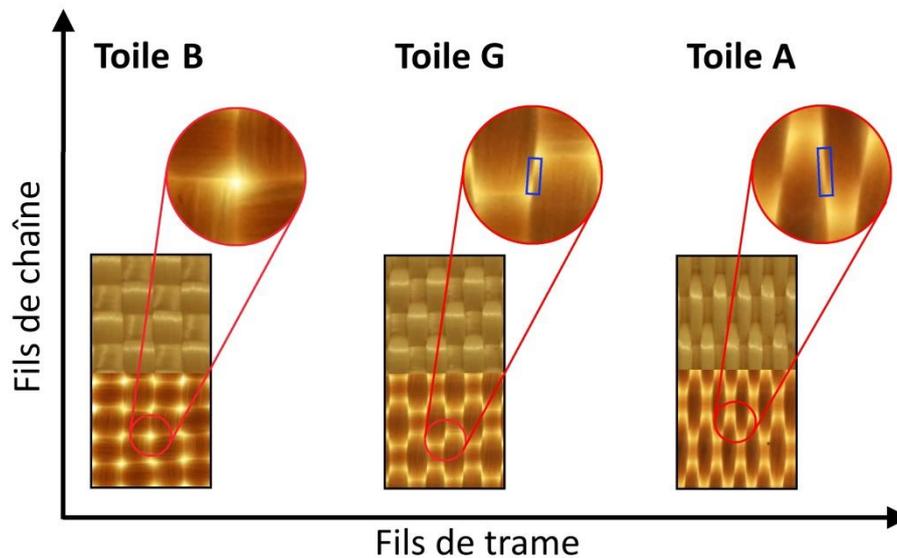


Figure 3.39 : Observation des zones de contact inter-fils « chaîne/chaîne » à partir des photos prises à contre jour des tissus A, B et G.

L'observation des coupes longitudinales des fils de chaîne dans les structures tissée A et G a permis d'identifier les zones de contact entre deux fils de chaîne illustrées sur les Figures Figure 3.40 et Figure 3.41.

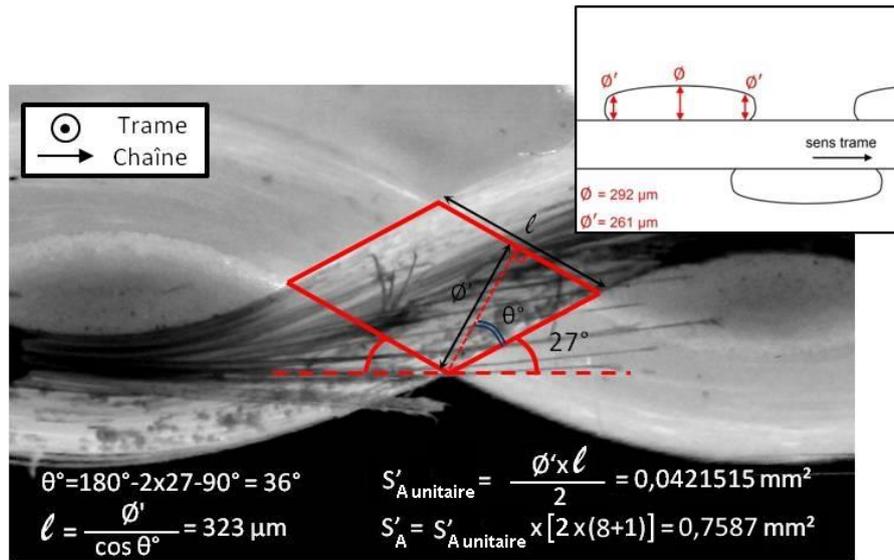


Figure 3.40 : Observation au microscope optique d'une coupe longitudinale d'un fil de chaîne présent dans la structure A. Représentation de la surface de contact inter-fils « chaîne/chaîne ».

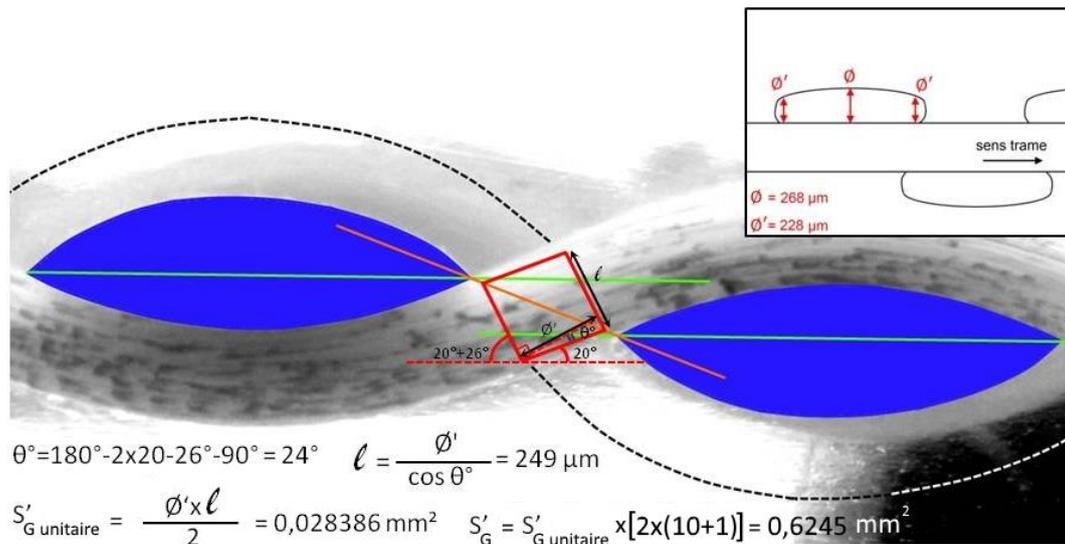


Figure 3.41 : Observation au microscope optique d'une coupe longitudinale d'un fil de chaîne présent dans la structure G. Représentation de la surface de contact inter-fils « chaîne/chaîne ».

III.2.3.2. Résultats expérimentaux

Des séries de 4 à 6 essais de traction ont été réalisés sur les fils de chaîne à tester présents dans chacune de ces trois structures. Ces essais ont été réalisés à 20 m/s sur des fils de 20 mm de longueur.

On obtient alors dans un premier temps les courbes de vitesse du projectile en fonction du temps pour chacune des trois structures illustrées sur la Figure 3.42.

On retrouve sur ces courbes une erreur standard comprise entre 7 et 8% pour les courbes représentatives des fils testés dans les tissus A et B, et de 15% pour celle représentative des fils testés dans le tissu G. Cette dernière est conséquente et ne peut être négligée. Néanmoins, nous décidons de tenir compte des résultats relatifs aux essais réalisés dans le tissu G afin d'émettre une analyse par la suite.

On note également une dispersion de 2 m/s entre les vitesses initiales de chaque courbe soit 10 % de la vitesse initiale théorique ce qui reste acceptable pour pouvoir comparer les phénomènes observés. Enfin, la correspondance de l'allure des courbes avec le profil attendu nous permet de valider la conformité des résultats obtenus, à l'exception de ceux relatifs aux essais réalisés dans le tissu G dont la validité reste hypothétique.

On observe un écart de 80 μs entre le début de traction du fil testé dans le tissu A et celui des fils testés dans les tissus B et G. Ce phénomène est dû aux temps de déploiement des fils de chaîne dans leur structure qui diffèrent de par leur différence d'angle d'ondulation.

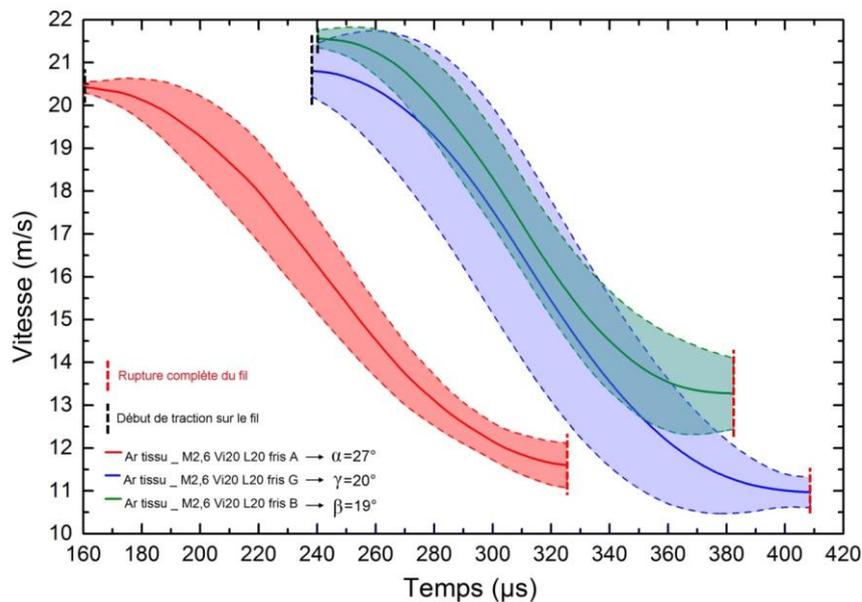


Figure 3.42 : Variation des densités chaîne et trame des structures tissées dans lesquelles sont testés les fils. Courbes de vitesses du projectile en fonction du temps pour les essais à 20 m/s sur fil de 20 mm testé dans les tissus B, A et G. Marquage du début de la rupture progressive du fil.

Afin de comparer le comportement mécanique de ces fils entre eux ainsi que par rapport au comportement mécanique du fil vierge, nous portons nos observations et analyses sur les courbes de force appliquée sur chaque fil en fonction de leur déformation ainsi que sur les courbes d'énergie absorbée en fonction de leur déformation. Le Tableau 3.12 regroupe les principales caractéristiques physiques des structures tissées A, G et B.

On constate alors que les énergies de rupture des fils présents dans les trois structures sont identiques à celle d'un fil vierge.

III.2. Comportement mécanique du fil testé dans sa structure tissée

Malgré une erreur standard importante sur la moyenne des courbes, on peut noter une décroissance de la force à rupture et une hausse de la déformation à rupture, du fil vierge au fil testé dans le tissu B, puis celui dans le tissu G et enfin celui dans le tissu A.

	TOILE A	TOILE G	TOILE B
Aspects tissu	Souple et peu stable	Rigide et stable*	Souple et stable*
Angle d'ondulation fils de chaîne	27°	20°	19°
Surface totale contact inter-fils	$S_A + S'_A = 4,1587 \text{ mm}^2$	$S_G + S'_G = 6,9697 \text{ mm}^2$	$S_B + S'_B = 12,8642 \text{ mm}^2$
Nombre points de liage	8	10	14

Tableau 3.12 : Tableau répertoriant (1) l'aspect du tissu, (2) l'angle d'ondulation du fils de chaîne, (3) la surface totale de contact inter-fils et (4) le nombre de points de liage relatif aux structures tissées A, G et B. (*structure dont les fils sont bien maintenus entre eux)

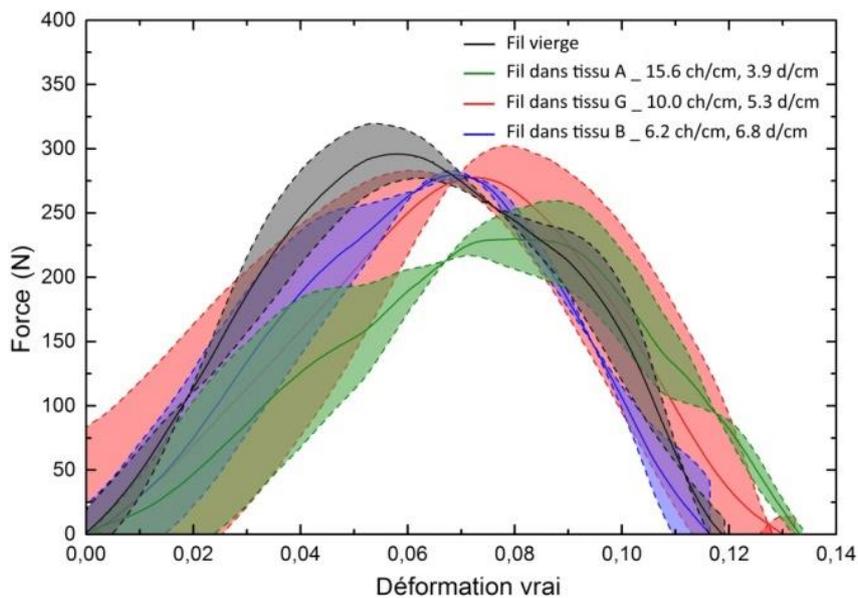


Figure 3.43 : Variation des densités chaîne et trame des structures tissées dans lesquelles sont testés les fils. Courbes de force appliquée au fil en fonction de sa déformation vraie pour les essais à 20 m/s sur fil de 20 mm testé dans les tissus B, A et G et comparés au fil vierge.

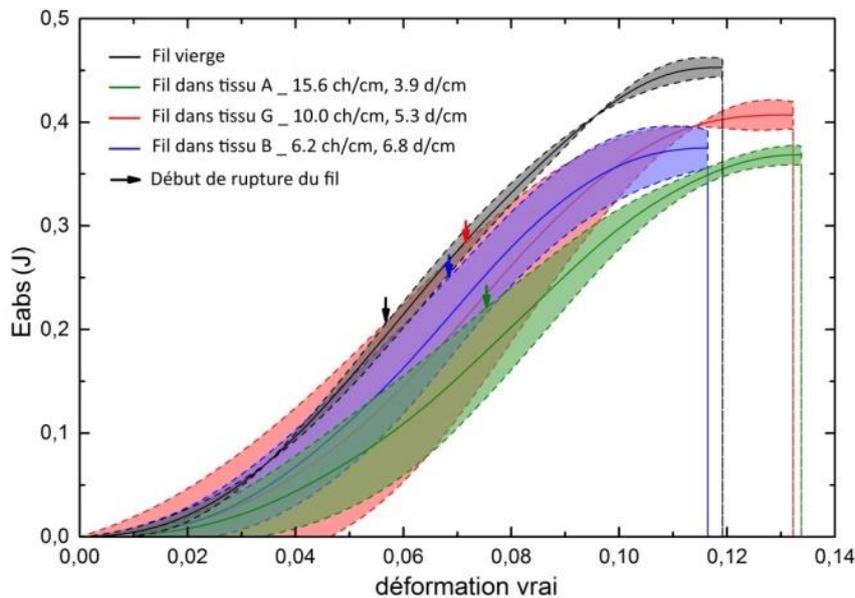


Figure 3.44 : Variation des densités chaîne et trame des structures tissées dans lesquelles sont testés les fils. Courbes d'énergie absorbée par le fil en fonction de sa déformation vraie pour les essais à 20 m/s sur fil de 20 mm testé dans les tissus B, A et G et comparés au fil vierge. Marquage du début de la rupture progressive du fil.

L'analyse de ces résultats reste toutefois complexe. En effet, il est difficile de discerner l'impact de chaque paramètre sur les différentes propriétés mécaniques du fil. C'est pourquoi nous proposons de décomposer l'analyse à l'échelle du fil puis à celle du tissu comme illustré dans les graphes de la Figure 3.48. Les Tableaux Tableau 3.13 et Tableau 3.14 répertorient respectivement les données énergétiques et les données de force et de déformation vraie à rupture extraits de ces graphes.

Nous avons étudié précédemment l'impact de la structure tissée sur le comportement mécanique des fils qu'elle contient, en en testant un isolément (voir § III.1.2.). Les résultats liés à cette étude correspondent aux premières colonnes de chaque graphe, pour les structures B, G et A, des Figures Figure 3.45, Figure 3.46 et Figure 3.47.

Nous nous intéressons maintenant à l'impact de la structure tissée sur les interactions entre le fil sollicité et ceux qui l'entourent. Ces résultats correspondent aux deuxièmes colonnes de chaque graphe, pour les structures B, G et A, des Figures Figure 3.45, Figure 3.46 et Figure 3.47.

On observe que seule la structure tissée G apporte une augmentation de la force à rupture du fil avec un fort taux de 23%. Les structures B et A, quant à elles, font perdre respectivement 17 et 13% de force à rupture au fil testé.

A l'inverse, le fil testé perd beaucoup en capacité d'allongement dans la structure G (-30%), contre seulement 15 et 12% respectivement dans les structures B et A.

Enfin, on note une forte perte d'énergie absorbée par le fil dans la structure B (-36%), contre seulement 16 et 23% respectivement dans les structure G et A.

Les structures tissées font intervenir trois principaux critères qui sont : le nombre de points de liage, la surface de contact inter-fils totale et le confinement des fils chaîne et trame, soient les pressions transverses et latérales qu'ils exercent entre eux.

L'absorption d'énergie peut se faire soit par le biais d'une certaine capacité d'élongation du fil, c'est-à-dire par le matériau lui-même, soit par le biais des forces de frottement inter-fils, c'est-à-dire par les interactions structurelles du tissu.

Les forces de frottement entre le fil sollicité et ceux qui l'entourent dépendent à la fois des surfaces de contact totale « chaîne/trame » et « chaîne/chaîne », et des pressions transverses, entre fils de chaîne et trame, et latérales, entre fils de chaîne, qui les accentuent.

L'arrangement structural de la structure G, associé à son grand nombre de points de liage, confère au fil de chaîne sollicité une surface de contact totale inter-fils d'environ 7 mm^2 . Les forces de frottement générées par ces surfaces de contact sont hautement amplifiées par les fortes pressions, transverses et latérales, dont dispose la structure G. Malgré le grand nombre de défauts de structure présents dans le matériau et un nombre de points de liage élevée, la perte de résistance liée aux amorces de rupture que ces phénomènes engendrent est plus faible que le gain de résistance apportée au fil en réponse aux importantes forces de frottement. Cela s'explique par une hausse de 23% de la force à rupture du fil.

En contrepartie, ces fortes pressions confinent considérablement le fil dans la structure ce qui réduit de beaucoup sa capacité d'allongement. A cela s'ajoute les amorces de rupture générées par son grand nombre de points de liage et un taux élevé de défauts de structure. Ces phénomènes se traduisent alors par la perte de 30% de sa déformation vraie à rupture. La perte d'absorption d'énergie par allongement du fil combinée à l'amorce de sa rupture est plus importante que le gain d'énergie absorbée par les frottements inter-fils, comme l'indique la perte de 16% d'énergie absorbée jusqu'à rupture du fil.

La structure B possède l'arrangement structural le plus équilibré. Associé à son nombre élevé de points de liage, cela confère au fil de chaîne sollicité une surface de contact totale inter-fils maximal d'environ 13 mm^2 . L'aspect souple du tissu et une répartition équilibrée des pressions entre les fils réduisent les pressions locales exercées sur le fil de chaîne sollicité, comparées à celles présentes dans la structure G. Le tissu B possède le plus grand nombre de points de liage parmi les trois structures ce qui lui confère un taux considérable de concentrations de contrainte. Malgré l'absence de défauts de structure dans le matériau, l'amorce de rupture engendrée par ces concentrations de contrainte provoque une chute de la force à rupture du fil bien plus importante que le gain de résistance apporté par les forces de frottement inter-fils de la structure sur le fil testé. Le bilan de ces deux phénomènes s'illustre par une baisse de 17% de la force à rupture du fil, de 36% de son énergie absorbée jusqu'à rupture ainsi qu'une baisse de 15% de sa déformation vraie à rupture. En effet, l'amorce de rupture causée par le fort taux de concentration de contrainte, auquel s'ajoutent les effets mineurs du faible confinement des fils dans leur structure, amène à une réduction de l'allongement du fil testé.

Enfin, la structure A dispose, tout comme la structure B, d'un aspect souple qui réduit les pressions locales exercées sur le fil de chaîne sollicité en comparaison à celles présentes dans la structure G. Cependant, elle présente un confinement latéral des fils de chaîne entre eux qui accroît les forces de frottement inter-fils « chaîne/chaîne ».

Le tissu A possède le plus petit nombre de points de liage parmi les trois structures. Le taux de concentrations de contrainte engendré est alors plus faible que celui des structures B et G, mais reste néanmoins conséquent. Associé à son arrangement structural très déséquilibré, le fil de chaîne sollicité dans le tissu A possède également la plus petite surface de contact inter-fils totale par rapport aux trois structures, soit 4 mm^2 . Le gain en résistance pour contrer les forces de frottement qui en résultent, faiblement accentuées par le confinement latéral des fils de chaîne, est plus faible que la perte en résistance due à l'amorce de rupture générée par les points de liage et les défauts de structure présents dans le matériau. Tout comme dans la structure B, le fil testé subit une baisse de sa déformation vraie à rupture à cause de l'amorce de sa rupture ainsi que de son confinement latéral qui peut jouer sur sa capacité d'élongation. De tous ces phénomènes résulte une perte d'absorption énergétique de 23%.

En cumulant les effets de la déformation plastique du matériau et des interactions inter-fils dans la structure, le bilan énergétique des structures B et G est positif avec un gain de 10% en énergie absorbé par rapport au fil vierge, contrairement à la structure A qui perd 5%.

	E_{abs} (J)	E'_{abs} (J)	$E_{abs tot}$ (J)
Fil vierge	0,19	0,26	0,45
Fil extrait du tissu B	0,33	0,17	0,50
Fil dans le tissu B	0,21	0,16	0,37
Fil extrait du tissu G	0,25	0,16	0,41
Fil dans le tissu G	0,21	0,20	0,41
Fil extrait du tissu A	0,22	0,16	0,38
Fil dans le tissu A	0,18	0,19	0,37

Tableau 3.13 : Tableau comparatif des données énergétiques pour le fil vierge, le fil extrait de sa structure et le fil testé dans sa structure, pour les structures tissées B, G et A.

	Force à rupture (N)	Déformation vraie à rupture (%)
Fil vierge	296 ± 23	5,7
Fil extrait du tissu B	337 ± 7	8,0
Fil dans le tissu B	280 ± 3	6,8
Fil extrait du tissu G	224 ± 4	10,3
Fil dans le tissu G	277 ± 12	7,2
Fil extrait du tissu A	263 ± 18	8,5
Fil dans le tissu A	229 ± 16	7,5

Tableau 3.14 : Tableau comparatif des données de force à rupture et déformation vraie à rupture pour le fil vierge, le fil extrait de sa structure et le fil testé dans sa structure, pour les structures tissées B, G et A.

III.2. Comportement mécanique du fil testé dans sa structure tissée

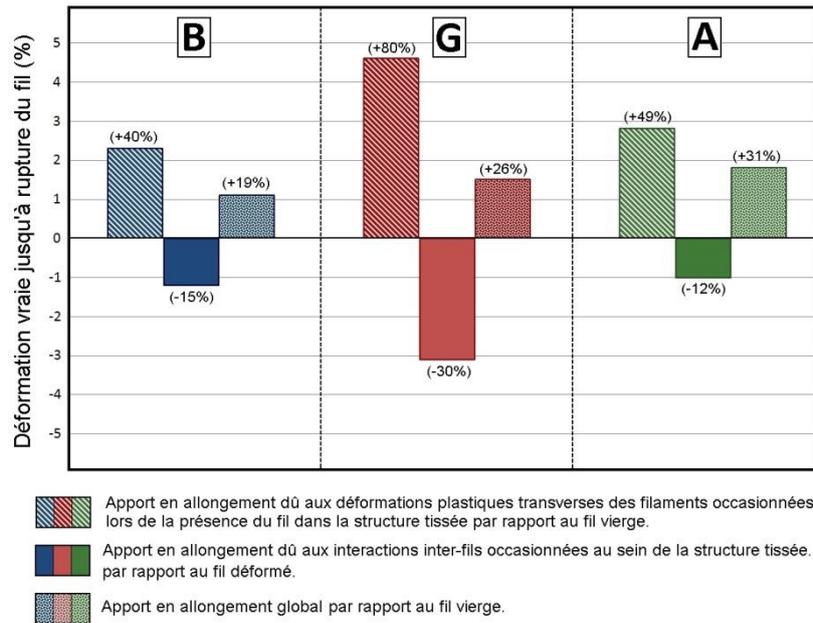


Figure 3.45 : Graphes montrant les différents apports en allongement (colonne de gauche) d'un fil vierge au fil déformé, (colonne du milieu) du fil déformé au fil testé dans sa structure, (colonne de droite) d'un fil vierge au fil testé dans sa structure, pour les structures tissées (bleu) B, (rouge) G et (vert) A.

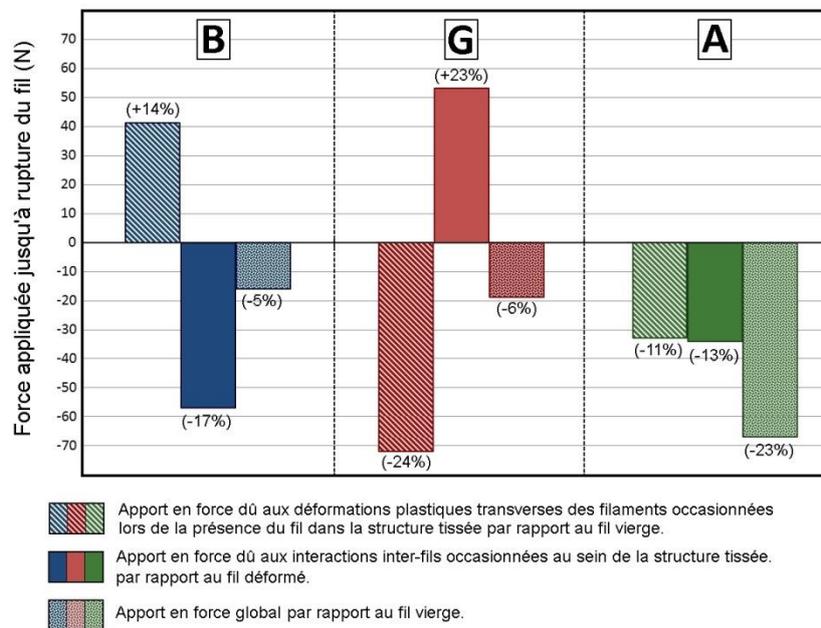


Figure 3.46 : Graphes montrant les différents apports en force (colonne de gauche) d'un fil vierge au fil déformé, (colonne du milieu) du fil déformé au fil testé dans sa structure, (colonne de droite) d'un fil vierge au fil testé dans sa structure, pour les structures tissées (bleu) B, (rouge) G et (vert) A.

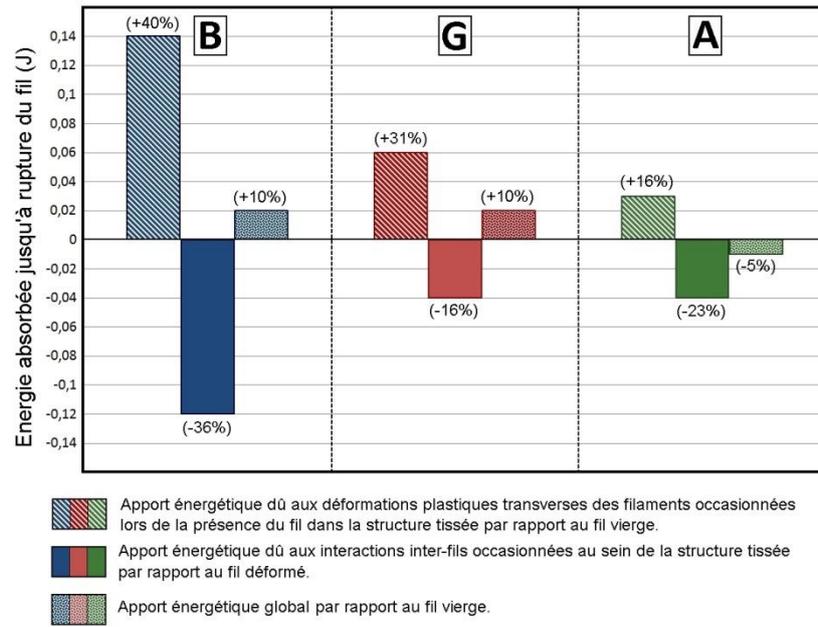


Figure 3.47 : Graphes montrant les différents apports énergétiques (colonne de gauche) d'un fil vierge au fil déformé, (colonne du milieu) du fil déformé au fil testé dans sa structure, (colonne de droite) d'un fil vierge au fil testé dans sa structure, pour les structures tissées (bleu) B, (rouge) G et (vert) A.

III.2. Comportement mécanique du fil testé dans sa structure tissée

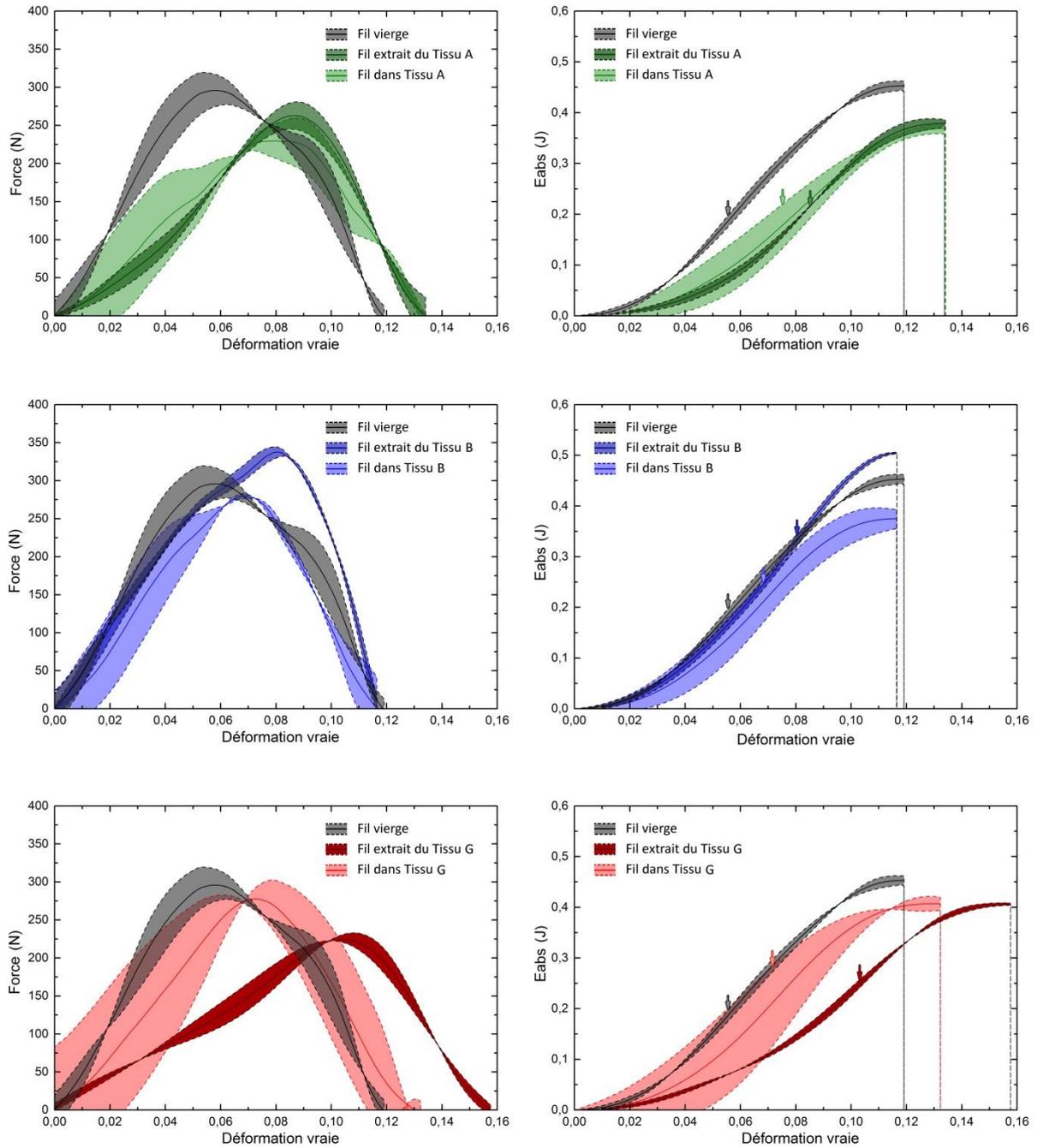


Figure 3.48 : (à gauche) Courbes d'énergie absorbée par le fil en fonction de sa déformation vraie et (à droite) courbes de force appliquée au fil en fonction de sa déformation vraie, pour les essais sur fils vierge, extrait et testé dans les structures tissées A (vert), B (bleu) et G (rouge).

CONCLUSION

Dans ce chapitre III, plusieurs campagnes d'essais en traction dynamique sur fils de para-aramide ont été menées dans différents buts.

Tout d'abord, les essais réalisés sur fils vierges nous ont permis d'étudier le comportement mécanique du fil en sollicitation dynamique ainsi que sa dépendance à la gamme de vitesses de déformation appliquée. Des changements d'un point de vue des mécanismes de rupture s'opèrent au sein des filaments qui composent le fil. Ces phénomènes laissent apparaître (nous font découvrir) la présence d'un troisième mode de rupture situé entre les modes de rupture quasi-statique et dynamique : le mode transitoire.

Les campagnes d'essais qui ont suivies nous ont permis d'évaluer l'influence de quatre principaux critères qui régissent l'évolution du comportement mécanique du fil (Figure 3.49).

Nous avons vu que l'arrangement structural, qui dépend du rapport entre les densités de fils trame et chaîne (D_{tr}/D_{ch}), fait intervenir trois autres principaux paramètres structuraux qui sont :

- La surface de contact inter-fils totale (transverse et latérale) le long du fil sollicité (S_c) (Figure 3.50)
- Le nombre de points de liage le long du fil sollicité (N_{PL})
- Les pressions inter-fils (transverses et latérales) le long du fil sollicité (P°)

L'impact de ces quatre paramètres structuraux sur le comportement mécanique du fil se décompose en deux étapes.

Durant la première étape, l'arrangement structural du tissu dans lequel se trouve le fil à tester engendre des modifications géométriques des filaments qu'il contient (Figure 3.51) :

- Un phénomène d'hystérésis (**H**) sur le comportement mécanique du matériau dû à des compressions qui engendre une désorientation moléculaire. Ces compressions peuvent être transverses, avec le confinement du fil dans la structure qui vient exercer des pressions inter-fils, ou bien longitudinales, avec la flexion des filaments au sein du fil due à la combinaison du nombre de points de liage et des pressions inter-fils qui génère son ondulation.
- L'augmentation de ces compressions transverses et longitudinales engendre, en plus de l'accentuation du phénomène d'hystérésis, la formation de défauts de structure au sein du matériau (**DS**).

Durant la seconde étape, l'arrangement structural du tissu a un impact sur le comportement mécanique du fil sollicité à travers les interactions de celui-ci avec les fils qui l'entourent :

- La surface de contact totale « chaîne/trame » et « chaîne/chaîne » crée des forces de frottement inter-fils (F_f) ce qui permet à la structure d'emmagasiner de l'énergie et de retarder la rupture du fil. Les pressions inter-fils exercées viennent accentuer ces forces de frottement.
- Les points de contact présents le long du fil sollicité ainsi que des concentrations de contraintes ($[C]^\circ$) favorisant l'amorce de sa rupture. La présence de défauts de structure au sein du matériau vient accroître cette amorce.

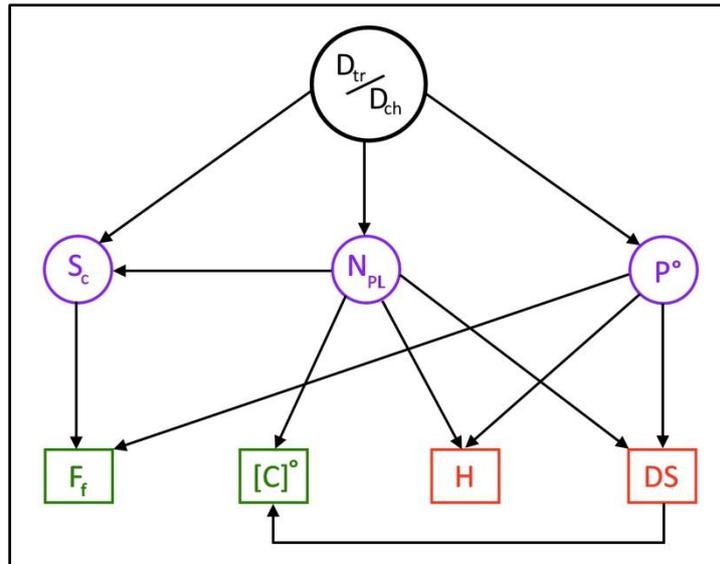


Figure 3.49 : Répartitions de l'impact des paramètres structuraux, que sont l'arrangement spatial (D_{tr}/D_{ch}), la surface de contact inter-fils totale (S_c), le nombre de points de liage (N_{PL}) et les pressions inter-fils transverses et latérales (P°), sur les critères influant le comportement mécanique du fil testé, que sont les forces de frottement inter-fils (F_f), les concentrations de contraintes ($[C]^\circ$), le phénomène d'hystérésis (H) et les défauts de structure (DS).

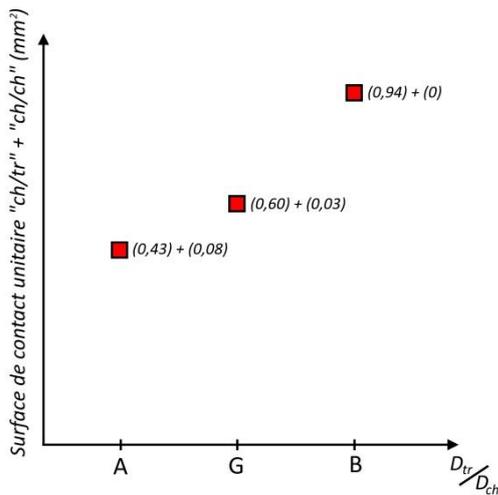


Figure 3.51 : Variation du taux de déformation plastique au sein des filaments des fils de chaîne en fonction de l'arrangement spatial entre les fils de chaîne et trame des tissus A, B et G.

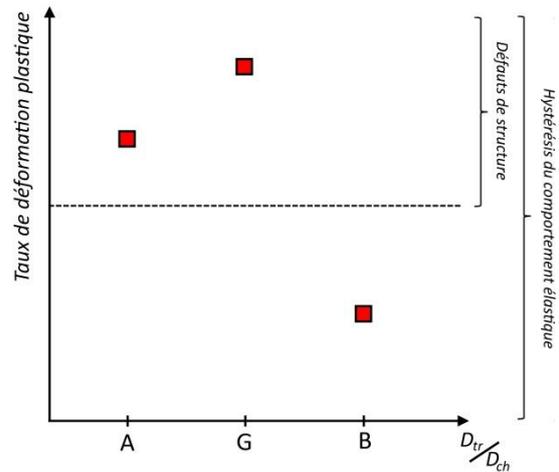


Figure 3.50 : Variation de la surface de contact unitaire « chaîne/trame » et « chaîne/chaîne » par rapport à l'arrangement spatial entre les fils de chaîne et trame des tissus A, B et G.

Chaque tissu dispose d'un certain arrangement structural et d'une certaine architecture qui font que le comportement mécanique d'un de leur fil sollicité ne sera pas le même suivant l'impact qu'aura chaque paramètre structural dessus.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

CONCLUSION GENERALE

Ce travail de thèse a porté sur la caractérisation du comportement mécanique longitudinal d'un fil de para-aramide en sollicitation dynamique. Nous avons pour principaux objectifs la conception d'un nouveau dispositif expérimental de traction dynamique du fil ainsi que la réalisation de plusieurs campagnes d'essai à l'aide de celui-ci dans le but de révéler différentes caractéristiques mécaniques d'un fil de para-aramide.

Le Dispositif de Traction par Impact sur Fil

Nous avons développé un dispositif expérimental appelé « Dispositif de Traction par Impact sur Fil » (DTIF). Composé de deux pièces emboîtées l'un dans l'autre, le support et le projectile, et auxquelles sont attachées les extrémités du fil à tester, la propulsion de celui-ci au travers d'un canon à gaz permet d'appliquer une tension longitudinale sur le fil tout en atteignant des vitesses de déformation élevées comprises entre 1000 et 8000 s⁻¹. Ce dispositif a été rendu opérationnel grâce à l'apport de nombreuses modifications qui nous permettent de respecter chaque condition de tir nécessaire à la bonne réalisation des essais de traction sur fil.

Un dispositif de mesure par système laser permet de mesurer à l'aide d'une photodiode la variation d'intensité lumineuse due au passage du projectile afin d'obtenir son déplacement en fonction du temps. La calibration du laser associée à la méthode de lissage du signal « Savitzky-Golay » nous permet d'obtenir le profil de vitesse du projectile. La validité de ce dispositif de mesure et de la procédure de traitement du signal associée sont confirmées en comparant nos résultats à ceux obtenus avec un vélocimètre à effet Doppler qui permet de mesurer directement la vitesse instantanée du projectile.

La vitesse de propagation d'onde dans le fil étant bien supérieure à la gamme de vitesses à laquelle il est sollicité, les effets d'ondes sur le comportement mécanique du fil sont négligés. L'équilibre des forces supposées atteintes permet alors d'obtenir les courbes de Force-Déformation du fil, caractéristique de son comportement mécanique.

Caractéristiques mécaniques du fil de para-aramide

- *Comportement viscoélastique du fil vierge à l'échelle du filament*

La campagne d'essais réalisée sur fils vierges nous a permis de confirmer une dépendance du comportement mécanique du fil par rapport à la vitesse de déformation. L'augmentation de la vitesse de déformation implique en effet une augmentation de la densité d'énergie volumique fournie au fil mais également une augmentation de la densité d'énergie volumique nécessaire à la rupture du fil de par l'évolution des mécanismes de rupture agissant au sein de chaque filament.

La rupture des filaments en régime quasi-statique est longitudinale avec une rupture majoritaire des liaisons faibles intermoléculaires et un glissement des chaînes macromoléculaires entre elles. En régime dynamique, la rupture des filaments est transversale avec une rupture majoritaire des liaisons primaires intramoléculaires. Aussi, la rupture des filaments évolue transitoirement en fonction de la vitesse de déformation et passe par un régime dit « transitoire » où la rupture est partiellement

longitudinale et partiellement transversale avec des ruptures des liaisons secondaires et primaires non-majoritaires les unes par rapport aux autres.

Nous notons également que l'augmentation du ratio entre la densité d'énergie volumique fournie et la densité d'énergie volumique absorbée par le fil provoque une baisse jusqu'à disparition de l'allongement des liaisons faibles intermoléculaires ainsi qu'une hausse du nombre de liaisons primaires subissant un allongement. Cela conduit à une augmentation jusqu'à un seuil limite de la déformation élastique du fil avant rupture.

- *Influence de l'arrangement d'une structure tissée sur le comportement mécanique du fil au travers de différents paramètres structuraux et à vitesse de déformation constante*

Après avoir étudié le comportement mécanique du fil à l'échelle du filament, nous portons notre étude sur l'influence de la structure tissée vis-à-vis du comportement mécanique du fil présent au sein de cette structure et faisant intervenir différents paramètres structuraux. L'arrangement structural d'une structure tissée, régi par le ratio entre les densités chaîne et trame, fait intervenir trois principaux paramètres structuraux qui sont la surface de contact inter-fils, le nombre de points de liage et la pression inter-fils. Nous décomposons en plusieurs parties l'influence de l'arrangement structurale afin de mieux comprendre le rôle de chaque paramètre qui en découle sur le comportement mécanique du fil.

Des essais ont tout d'abord été réalisés sur des fils extraits de leur structure tissée afin de définir l'influence de l'arrangement structural sur un fil isolé.

- On note ainsi que la présence d'une pression transverse sur le fil ainsi qu'une torsion du fil généré par le nombre de points de liage engendrent une désorientation des chaînes macromoléculaires au sein des filaments qui entraîne un phénomène d'hystérésis (H) sur le comportement viscoélastique du fil. Cela a pour conséquence une forte augmentation de la déformation à rupture du fil, une faible baisse de sa raideur, et ainsi une augmentation de l'énergie qu'il absorbe ainsi que de sa limite à rupture.
- Une augmentation des pressions transverses appliquées sur le fil ainsi que de la torsion du fil lié à l'augmentation du nombre de points de liage provoquent la formation de défauts de structure (DS) au sein des filaments. Cela entraîne une plus grande probabilité d'amorce de rupture du fil et a pour conséquence, sans prendre en compte les effets dus au phénomène d'hystérésis, une baisse de la limite à rupture du fil et donc de l'énergie qu'il absorbe.

Des essais ont ensuite été réalisés sur des fils au sein même de leur structure tissée, d'une part, en faisant varier le nombre de points de contact dans le sens chaîne tout en gardant une surface de contact inter-fils totale constante, et d'autre part, en faisant varier la surface de contact inter-fils totale tout en conservant un même nombre de points de liage sens chaîne. Ces essais ont pour but de révéler l'influence de l'arrangement structural sur les interactions du fil sollicité avec les autres fils qui composent la structure.

- Une augmentation de la surface de contact totale inter-fils le long du fil sollicité ainsi que des pressions transverses appliquées sur celui-ci induisent une augmentation des forces de frottement (F_f) inter-fils. Cela implique alors une absorption d'énergie supplémentaire et provoque une augmentation de la limite à rupture du fil.
- Enfin, l'augmentation du nombre de points de liage ainsi que la présence de défauts de structure engendrent une augmentation des concentrations de contraintes [C°] au sein des filaments. Cela entraîne une plus grande probabilité d'amorce de rupture et a pour conséquence une baisse de la limite à rupture du fil et donc de l'énergie qu'il absorbe.

Les caractéristiques mécaniques du fil présent dans une structure tissée, qui sont la force à rupture, la déformation à rupture, la raideur et l'énergie absorbée, dépendent, à vitesse de déformation constante, de quatre principaux critères de rupture (H , DS , F_r et $[C^\circ]$) dont les proportions diffèrent en fonction des différents paramètres structuraux.

Les arrangements structuraux des tissus A, B et G testés sont le résultat de combinaisons différentes entre les trois paramètres structuraux. Dans le cadre d'une protection balistique, les fabricants cherchent à obtenir une structure tissée permettant :

- D'absorber un maximum d'énergie avant rupture.
- Une propagation rapide de la sollicitation sur toute la surface tissée.
- Une faible déformation à rupture pour réduire le risque de blessure causé sur le corps humain.

Ainsi, la structure B regroupe au mieux ces trois propriétés. En effet, par rapport au fil vierge, elle apporte :

- Une augmentation de l'énergie absorbée de 10%, soit la plus élevée avec la structure G.
- Un nombre de points de liage le plus élevé.
- Une augmentation de la déformation à rupture de 19%, soit la plus faible parmi les trois structures.

Une réduction du nombre de points de liage dans cette structure réduirait la propagation de la sollicitation dans la surface tissée mais permettrait de réduire les concentrations de contraintes ce qui augmenterait l'énergie absorbée par la structure tissée. Un réajustement du ratio entre les densités chaîne et trame, par un grossissement du fil par exemple, s'en suit alors pour conserver un arrangement structural équilibrée qui confère ses propriétés au tissu B.

PERSPECTIVES

A court terme

Des modifications restent à apporter sur le dispositif Dispositif de Traction par Impact sur Fil au niveau de sa géométrie et du maintien du fil.

Le système actuel permet de réaliser des essais de traction en sollicitation dynamique sur des fils de para-aramide, comme étudiés dans ce rapport, ou bien de Vectran, dans de bonnes conditions de tir. Il n'est cependant pas encore adapté pour tester des fils de polyéthylène dont la surface présente un aspect beaucoup plus lisse, ce qui engendre un glissement au niveau du système d'attache.

Aussi, il pourra être envisagé de réaliser par la suite des essais de « yarn pull out ». Pour cela, il faut repenser le système d'attache au niveau du support afin de pouvoir y laisser libre le fil à tester. L'ajout d'un système d'attache de la structure tissée permettrait de la prétendre durant l'essai.

Actuellement, le dispositif de mesure laser utilisé nous permet d'obtenir le profil de vitesse du projectile de façon indirecte. Lors d'un essai, il ne nous est pas possible de le coupler avec une caméra. Pour les essais à suivre, l'utilisation d'un vélocimètre à effet Doppler permettra d'obtenir une mesure directe et plus précise du profil de vitesse du projectile. Celui-ci pourra être couplé avec une caméra afin de mieux comprendre les différentes étapes d'allongement et de rupture.

D'un point de vue de la caractérisation mécanique du fil, de nombreux essais restent encore à réaliser comme des essais de « yarn pull out » qui permettraient d'étudier les forces de frottement au sein d'une structure tissée. Dans notre cas, ils seraient notamment utiles pour connaître plus précisément les pressions transverses appliquées dans les tissus A, B et G.

Aussi, des essais sur fil imprégné nous permettraient d'étudier l'apport d'une résine sur les propriétés mécaniques d'un fil en traction. De tels essais ont été expérimentés lors de ce travail de thèse mais la méthodologie d'imprégnation reste encore à améliorer.

Enfin, des essais sur fil seul avec une variation de la vitesse de déformation et une énergie fournie par le projectile constante d'une part, et des essais sur fil seul avec une variation de l'énergie fournie par le projectile et une vitesse de déformation constante d'autre part sont à réaliser. Ces essais, avec ceux décrit précédemment, permettront de dissocier l'influence de ces deux critères sur les mécanismes de rupture des filaments au sein du fil et ainsi confirmer les analyses apportées dans cette étude.

A moyen et long terme

Augmenter la vitesse de sollicitation permettra d'atteindre des vitesses de déformation plus élevées. Cela permettra également d'atteindre d'importantes vitesses de déformation comme 4000 et 8000 s⁻¹ en conservant une longueur de fil de 2 cm ce qui réduira le risque d'erreurs lors de la préparation des échantillons. Pour cela, des changements devront se faire tels qu'une modification du matériau utilisé dans la conception du support, soit un matériau plus léger et de résistance mécanique équivalente, de façon à pouvoir augmenter la vitesse du support, et ainsi du projectile, tout en conservant une énergie d'impact entre le support et l'embout du canon identique.

Aussi, une étude analytique du comportement viscoélastique du para-aramide à l'échelle du filament puis à l'échelle du fil permettrait d'obtenir les courbes caractéristiques de leur comportement mécanique. Par la suite, cela permettra de procéder à une analyse inverse des courbes obtenues expérimentalement et ainsi remonter aux paramètres mécaniques du fil.

L'optimisation et la réalisation d'essais de traction sur fil avec le dispositif de barres Hopkinson permettront de comparer les résultats obtenus avec ceux provenant des essais réalisés sur le Dispositif de Traction par Impact sur Fil.

Enfin, notre étude expérimentale est à compléter avec une étude numérique du comportement mécanique du fil. Des simulations d'essais de traction sur fil, reprenant les mêmes conditions de tirs que nos essais expérimentaux, permettront une meilleure compréhension du comportement mécanique d'un fil de para-aramide en sollicitation longitudinale et dynamique.

REFERENCES

1. <http://www.npr.org/templates/story/story.php?storyId=4625858>
2. <http://poudrenoire.masta.fr/puissance.php>
3. <http://usmc-collectors.pagesperso-orange.fr/fichiers%20listes%20et%20divers/body%20armor.htm>
4. <http://www.tejinaramid.com/wp-content/uploads/2016/05/Teijin-Aramid-Ballistics-Material-Handbook.pdf>
5. Thomas, E.L., *Opportunities in Protection Materials Science and Technology for Future Army Applications*, in *Advances in Ceramic Armor VIII2012*, John Wiley & Sons, Inc. p. 145-148.
6. Tam, T. and A. Bhatnagar, *7 - High performance ballistic fibers*, in *Lightweight Ballistic Composites2006*, Woodhead Publishing. p. 189-209.
7. Morgan, R.J., C.O. Pruneda, and W.J. Steele, *The relationship between the physical structure and the microscopic deformation and failure processes of poly(p-phenylene terephthalamide) fibers*. *Journal of Polymer Science: Polymer Physics Edition*, 1983. **21**(9): p. 1757-1783.
8. Lafitte, M.H. and A.R. Bunsell, *The fatigue behaviour of Kevlar-29 fibres*. *Journal of Materials Science*, 1982. **17**(8): p. 2391-2397.
9. Panar, M., et al., *Morphology of poly(p-phenylene terephthalamide) fibers*. *Journal of Polymer Science: Polymer Physics Edition*, 1983. **21**(10): p. 1955-1969.
10. Wollbrett-Blitz, J., *Longitudinal and transverse mechanical behaviour, deformation micromechanisms and temperature effect on a single Kevlar® 29 fibre*, 2014, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
11. Rao, Y., A.J. Waddon, and R.J. Farris, *Structure–property relation in poly(p-phenylene terephthalamide) (PPTA) fibers*. *Polymer*, 2001. **42**(13): p. 5937-5946.
12. http://www.dupont.com/content/dam/dupont/products-and-services/fabrics-fibers-and-nonwovens/fibers/documents/DPT_Kevlar_Technical_Guide_Revised.pdf
13. Cheng, M., W. Chen, and T. Weerasooriya, *Experimental investigation of the transverse mechanical properties of a single Kevlar® KM2 fiber*. *International Journal of Solids and Structures*, 2004. **41**(22–23): p. 6215-6232.
14. Cheng, M. and W. Chen, *Mechanical Properties of Kevlar KM2 Single Fiber*. *Journal of engineering materials and technology* 2004. **127**(2): p. 197-203.
15. Ha-Minh, C., et al., *On analytical modelling to predict of the ballistic impact behaviour of textile multi-layer woven fabric*. *Composite Structures*, 2013. **99**: p. 462-476.
16. Singh, T.J. and S. Samanta, *Characterization of Kevlar Fiber and Its Composites: A Review*. *Materials Today: Proceedings*, 2015. **2**(4–5): p. 1381-1387.
17. Lim, J., et al., *Effects of gage length, loading rates, and damage on the strength of PPTA fibers*. *International Journal of Impact Engineering*, 2011. **38**(4): p. 219-227.
18. Chocron B., I.S., et al., *Dynamic tensile testing of aramid and polyethylene fiber composites*. *International Journal of Impact Engineering*, 1997. **19**(2): p. 135-146.
19. Ha Minh, C., *Comportement Mécanique des Matériaux Tissés Soumis à un Impact Balistique : Approches Expérimentale, Numérique et Analytique*, 2011, Université de Lille 1. p. 180.
20. Roylance, D., *Ballistics of transversely impacted fibers*. *Textile research journal*, 1977. **47**(10): p. 679-684.

21. Cho, K.S., K.H. Ahn, and S.J. Lee, *Universality of linear viscoelasticity of monodisperse linear polymers*. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, 2004. **42**(14): p. 2730-2737.
22. Bencomo-Cisneros, J.A., et al., *Characterization of Kevlar-29 fibers by tensile tests and nanoindentation*. Journal of Alloys and Compounds, 2012. **536**, **Supplement 1**: p. S456-S459.
23. Tan, V.B.C., X.S. Zeng, and V.P.W. Shim, *Characterization and constitutive modeling of aramid fibers at high strain rates*. International Journal of Impact Engineering, 2008. **35**: p. 1303-1313.
24. Mulkern, T.J. and M.N. Raftenberg, *Kevlar KM2 yarn and fabric strength under quasi-static tension*. ARL-TR-2865, Army Research Lab., 2002.
25. Haudin, J.M., *Microstructure des polymères*, in *Matériaux pour l'ingénieur*, E.d. mines, Editor 2006.
26. Fawaz, S.A., A.N. Palazotto, and C.S. Wang, *Axial tensile and compressive properties of high-performance polymeric fibres*. Polymer, 1992. **33**(1): p. 100-105.
27. Dai, S.R. and M.R. Piggott, *The strengths of carbon and kevlar fibres as a function of their lengths*. Composites Science and Technology, 1993. **49**(1): p. 81-87.
28. Lim, J., et al., *Mechanical behavior of A265 single fibers*. Journal of Materials Science, 2010. **45**(3): p. 652-661.
29. Sanborn, B. and T. Weerasooriya, *Quantifying damage at multiple loading rates to Kevlar KM2 fibers due to weaving, finishing, and pre-twist*. International Journal of Impact Engineering, 2014. **71**: p. 50-59.
30. Tapie, E., V.P.W. Shim, and Y.B. Guo, *Influence of weaving on the mechanical response of aramid yarns subjected to high-speed loading*. International Journal of Impact Engineering, 2015. **80**: p. 1-12.
31. Lee, C.Y.C. and U. Santhosh, *The role of the fibrillar structures in the compressive behavior of rigid-rod polymeric fibers*. Polymer Engineering & Science, 1993. **33**(14): p. 907-912.
32. Singletary, J., et al., *The transverse compression of PPTA fibers Part II Fiber transverse structure*. Journal of Materials Science, 2000. **35**(3): p. 583-592.
33. Singletary, J., et al., *The transverse compression of PPTA fibers Part I Single fiber transverse compression testing*. Journal of Materials Science, 2000. **35**(3): p. 573-581.
34. Baley, C., *Influence of kink bands on the tensile strength of flax fibers*. Journal of Materials Science, 2004. **39**(1): p. 331-334.
35. Song, B. and W.-Y. Lu, *Effect of twist on transverse impact response of ballistic fiber yarns*. International Journal of Impact Engineering, 2015. **85**: p. 1-4.
36. Shim, V.P.W., C.T. Lim, and K.J. Foo, *Dynamic mechanical properties of fabric armour*. International Journal of Impact Engineering, 2001. **25**(1): p. 1-15.
37. Billon, N., *Chapitre XVII : Comportement Mécanique des Polymères*, in *Matériaux pour l'ingénieur*, P.d.l.é.d. Mines, Editor 2006. p. 153.
38. Carr, D.J., *Failure mechanisms of yarns subjected to ballistic impact*. Journal of materials science letters, 1999. **18**: p. 585-588.
39. Lecomte-Beckers, J., *Physique des Matériaux : Partie polymères_ Chapitre 8 : Propriétés mécaniques*, 2009.
40. Lim, J., W. Chen, and J.Q. Zheng, *Dynamic small strain measurements of Kevlar® 129 single fibers with a miniaturized tension Kolsky bar*. Polymer Testing, 2010. **29**(6): p. 701-705.

41. Hudspeth, M., X. Nie, and W. Chen, *Dynamic failure of Dyneema SK76 single fibers under biaxial shear/tension*. Polymer, 2012. **53**(24): p. 5568-5574.
42. Wang, Y. and Y. Xia, *The effects of strain rate on the mechanical behaviour of kevlar fibre bundles: an experimental and theoretical study*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 1998. **29**(11): p. 1411-1415.
43. Koh, A.C.P., V.P.W. Shim, and V.B.C. Tan, *Dynamic behaviour of UHMWPE yarns and addressing impedance mismatch effects of specimen clamps*. International Journal of Impact Engineering, 2010. **37**(3): p. 324-332.
44. Zhu, D., et al., *Strain rate and gage length effects on tensile behavior of Kevlar 49 single yarn*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2012. **43**(11): p. 2021-2029.
45. <http://www.mts.com/en/products/producttype/test-components/grips-fixtures-accessories/grips-platens/index.htm>
46. Kolsky, H., *An Investigation of the Mechanical Properties of Materials at very High Rates of Loading*. Proceedings of the Physical Society. Section B, 1949. **62**(11): p. 676.
47. Ramesh, K.T., *High strain rate and impact experiments*, in *Handbook of Experimental Solid mechanics*, Springer, Editor 2009: New York. p. 1-30.
48. Harding, J., E.O. Wood, and J.D. Campbell, *Tensile testing of materials at impact rates of strain*. Journal of mechanical engineering science, 1960. **2**(2): p. 88-96.
49. Yuan, J.M. and V.P.W. Shim, *Tensile response of ductile α -titanium at moderately high strain rates*. International Journal of Solids and Structures, 2002. **39**(1): p. 213-224.
50. Chen, W., F. Lu, and M. Cheng, *Tension and compression tests of two polymers under quasi-static and dynamic loading*. Polymer Testing, 2002. **21**(2): p. 113-121.
51. Chen, Y., et al., *Application of a split-Hopkinson tension bar in a mutual assessment of experimental tests and numerical predictions*. International Journal of Impact Engineering, 2011. **38**(10): p. 824-836.
52. Sharma, S., V.M. Chavan, and R.J. Patel, *Evaluation of Material Properties of SA 516, Gr. 70 Using Split Hopkinson Bar Technique under Tensile and Compressive High Strain-Rate Loading*. Procedia Engineering, 2014. **86**: p. 123-130.
53. Bolduc, M., J.A. Nemes, and B. Farsi dooraki, *Dynamic Tensile Strength of Kevlar KM2 Yarns Using a Miniaturized Tensile Hopkinson Bar*. 21st International Symposium on Ballistics, 2003.
54. Zhu, D., et al., *Experimental study and modeling of single yarn pull-out behavior of kevlar® 49 fabric*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2011. **42**(7): p. 868-879.
55. Wang, Z., *Experimental evaluation of the strength distribution of E-glass fibres at high strain rates*. Applied Composite Materials, 1995. **2**(4): p. 257-264.
56. Taniguchi, N., et al., *Experimental study on impact tensile property of glass fiber*. Advanced Composite Materials, 2012. **21**(2): p. 165-175.
57. Chanteret and Rossi.
58. Smith, J.C., F.L. McCrackin, and H.F. Schiefer, *Stress-Strain Relationships in Yarns Subjected to Rapid Impact Loading : 5. Wave Propagation in Long Textile Yarns Impacted Transversely*. Journal of Research of the National Bureau of Standards, 1958. **60**(5): p. p.517-p.534.
59. Nilakantan, G., et al., *Multiscale modeling of the impact of textile fabrics based on hybrid element analysis*. International Journal of Impact Engineering, 2010. **37**(10): p. 1056-1071.
60. Socci, E.P., et al., *Symposium commemorating the 35th anniversary of Polymer Orientation changes in Kevlar® 49 under axial compression*. Polymer, 1996. **37**(22): p. 5005-5009.

61. Rusinek, A., et al., *Effect of plastic deformation and boundary conditions combined with elastic wave propagation on the collapse site of a crash box*. Thin-Walled Structures, 2008. **46**(10): p. 1143-1163.
62. Ravichandran, G. and G. Subhash, *Critical Appraisal of Limiting Strain Rates for Compression Testing of Ceramics in a Split Hopkinson Pressure Bar*. Journal of the American Ceramic Society, 1994. **77**(1): p. 263-267.
63. Petterson, D.R., et al., *Dynamic distribution of strain in textile materials under high-speed impact*. Textile research journal, 1960. **30**(6): p. 411-421.
64. Fenstermaker, C.A. and J.C. Smith, *Stress-strain properties of textile yarns subjected to rifle bullet impact*. Applied Polymer Symposia, 1965. **1**(125).
65. Shultz, A.B., P.A. Tuschak, and A.A. Vicario, *Experimental evaluation of material behavior in a wire under transverse impact*. Journal of Applied Mechanics, 1967. **392**.
66. Wilde, A.F., et al., *Deformation and rupture of fibers and films under missile impact*, 1972, Technical Report AMMRC 72-12, Army Materials and Mechanics Research Center: Watertown, Massachusetts.
67. Smith, J.C., et al., *Stress-Strain Relationships in Yarns Subjected to Rapid Impact Loading: Part IV: Transverse Impact Tests*. Textile research journal, 1956. **26**(11): p. 821-828.
68. Gu, B., *Analytical modeling for the ballistic perforation of planar plain-woven fabric target by projectile*. Composites Part B: Engineering, 2003. **34**(4): p. 361-371.
69. Naik, N.K. and P. Shrirao, *Composite structures under ballistic impact*. Composite Structures, 2004. **66**(1-4): p. 579-590.
70. Naik, N.K., P. Shrirao, and B.C.K. Reddy, *Ballistic Impact Behaviour of Woven Fabric Composites : Formulation*. International Journal of Impact Engineering, 2006. **32**: p. 1521-1552.
71. Kirkwood, K.M., et al., *Yarn pull-out as a mechanism for dissipating ballistic impact energy in Kevlar KM2 fabric _ Chapter 1 Quasi-static characterization of yarn pullout*. Textile research journal, 2004. **74**(10): p. 920-928.
72. Kirkwood, J.E., et al., *Yarn pull-out as a mechanism for dissipating ballistic impact energy in Kevlar KM2 fabric _ Chapter 2 Predicting ballistic performance*. ARL, Army Research Lab., 2004. **74**(11): p. 939-948.
73. Dong, Z. and C.T. Sun, *Testing and modeling of yarn pull-out in plain woven Kevlar fabrics*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2009. **40**(12): p. 1863-1869.
74. Das, S., et al., *Determination of inter-yarn friction and its effect on ballistic response of para-aramid woven fabric under low velocity impact*. Composite Structures, 2015. **120**: p. 129-140.
75. Briscoe, B.J. and F. Motamedi, *The ballistic impact characteristics of aramid fabrics: The influence of interface friction*. Wear, 1992. **158**(1-2): p. 229-247.
76. Duan, Y., et al., *Modeling friction effects on the ballistic impact behavior of a single-ply high-strength fabric*. International Journal of Impact Engineering, 2005. **31**(8): p. 996-1012.
77. Zeng, X.S., V.B.C. Tan, and V.P.W. Shim, *Modelling inter-yarn friction in woven fabric armour*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2006. **66**(8): p. 1309-1330.
78. Rao, M.P., et al., *Modeling the effects of yarn material properties and friction on the ballistic impact of a plain-weave fabric*. Composite Structures, 2009. **89**(4): p. 556-566.
79. Bilisik, K. and M. Korkmaz, *Multilayered and Multidirectionally-stitched aramid Woven Fabric Structures: Experimental Characterization of Ballistic Performance by Considering the Yarn Pull-out Test*. Textile research journal, 2010. **80**(16): p. 1697-1720.

80. Bilisik, K., *Experimental determination of yarn pull-out properties of para-aramid (Kevlar) woven fabric*. Journal of Industrial Textiles, 2011. **41**(3): p. 201-221.
81. Bilisik, K. and B. Yildirim, *Weft directional stick-slip force of yan pullout in para-aramid fabric for ballistics*. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2013. **27**(9): p. 1167-1191.
82. Nilakantan, G. and J.W. Gillespie Jr, *Yarn pull-out behavior of plain woven Kevlar fabrics: Effect of yarn sizing, pullout rate, and fabric pre-tension*. Composite Structures, 2013. **101**: p. 215-224.
83. Nilakantan, G., et al., *Experimental investigation of the role of frictional yarn pull-out and windowing on the probabilistic impact response of kevlar fabrics*. Composites Part B: Engineering, 2015. **68**: p. 215-229.
84. Myshkin, N.K., M.I. Petrokovets, and A.V. Kovalev, *Tribology of polymers: Adhesion, friction, wear, and mass-transfer*. Tribology International, 2005. **38**(11–12): p. 910-921.
85. Cook, R.F., et al., *Stick-slip during fibre pull-out*. Scripta Metallurgica, 1989. **23**(10): p. 1725-1730.
86. Guo, Z., et al., *Loading rate effects on dynamic out-of-plane yarn pull-out*. Textile research journal, 2014. **84**(16): p. 1708-1719.
87. Nikonova, E.A. and A.B. Pakshver, *The friction properties of textile yarns*. Fibre Chemistry, 1973. **4**(6): p. 657-660.
88. Tapie, E., Y.B. Guo, and V.P.W. Shim, *Yarn mobility in woven fabrics – a computational and experimental study*. International Journal of Solids and Structures, 2015.
89. Guo, Z., et al., *Out-of-plane effects on dynamic pull-out of p-phenylene terephthalamide yarns*. Textile research journal, 2015. **85**(2): p. 140-149.
90. Lavielle, L., *Polymer-polymer friction: Relation to adhesion*. Wear, 1991. **151**(1): p. 63-75.
91. Lopatnikov, S., N. Shevchenko, and J.W. Gillespie JR, *Device and Method for Investigation of Mechanical Properties of Fibers under High-Strain Rate Tensile Load*. 2012.
92. Starratt, D., et al., *An efficient method for continuous measurement of projectile motion in ballistic impact experiments*. International Journal of Impact Engineering, 2000. **24**(2): p. 155-170.
93. Hearle, J.W.S. and B.S. Wong, *Flexural fatigue and surface abrasion of Kevlar-29 and other high-modulus fibres*. Journal of Materials Science, 1977. **12**(12): p. 2447-2455.

Caractérisation du comportement mécanique longitudinale d'un fil de para-aramide en sollicitation dynamique.

RESUME : Ce travail a pour objectif d'étudier le comportement mécanique d'un fil de para-aramide en sollicitation longitudinale et dynamique. Pour ce faire, nous avons conçu un nouveau dispositif expérimental permettant de réaliser ces essais à l'aide d'un canon à gaz : le Dispositif de Traction par Impact sur Fil (DTIF). Ce dispositif a subi de nombreuses modifications dans le but d'obtenir des conditions d'essais optimales. Celui-ci est associé à un dispositif de mesure par laser permettant d'obtenir le profil de vitesse du projectile ainsi que les courbes caractéristiques de Force-Déformation du fil testé. La validité de la mesure est confirmée par comparaison aux résultats obtenus avec un vélocimètre à effet Doppler, dispositif permettant de mesurer directement et de façon précise le profil de vitesse du projectile.

Plusieurs campagnes d'essais sont réalisées, à la fois dans le but d'identifier les caractéristiques dynamiques d'un fil seul, et dans le but de caractériser l'influence de l'arrangement structural d'un tissu sur le comportement dynamique d'un fil. Cette étude révèle l'intervention de trois principaux paramètres structuraux, qui sont la surface de contact inter-fils totale, le nombre de points de liage et les pressions inter-fils transverses et latérales au sein du tissu, influant sur quatre principaux critères de rupture du fil, qui sont les défauts de structure et les phénomènes d'hystérésis au sein du filament, les concentrations de contraintes ainsi que les forces de frottement au niveau des interactions entre le fil testé et le reste de la structure tissée.

MOTS CLES : fil de para-aramide, caractérisation dynamique, Dispositif de Traction par Impact sur Fil, canon à gaz.

Characterization of the longitudinal mechanical behavior of a para-aramid yarn in dynamic load.

ABSTRACT: This work aims at studying the mechanical behavior of a para-aramid yarn in dynamic and longitudinal load. To that end, we designed a new experimental device to achieve these tests with the use of a gas gun: the Tensile Impact Test for Yarn (TITY). This device met numerous modifications in the aim to reach optimal test conditions. It is associated with a measurement device using laser and allowing obtaining the velocity profile of the projectile and the Strength-Strain characteristic curves of the tested yarn. The validity of the measure is confirmed by comparing our results with those obtained with a laser Doppler velocimeter, device allowing measuring directly and precisely the velocity profile of the projectile.

Many test campaigns are performed. Both in the aim to identify the dynamic parameters of a single and virgin yarn, and in the aim to characterize the impact of the fabric structural arrangement on the dynamic behavior of a yarn. This study reveals the intervention of three main structural parameters, which are the total inter-yarns contact surface, the number of binding points and the transvers and lateral inter-yarns pressures, having an impact on four main yarn break criteria, which are the structural defects and hysteresis phenomena inside the filament, stress concentrations and frictional forces concerning the interactions between the tested yarn and the rest of the fabric.

KEY WORDS: para-aramid yarn, dynamic characterization, Tension Impact Test for Yarn, gas gun.