

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

THÈSE PRÉSENTÉE À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION D'UN
DOCTORAT EN GÉNIE
Ph. D.

PAR
Ennouri TRIKI

MÉCANIQUE ET MÉCANISME DE LA DÉCHIRURE DES MATÉRIAUX TEXTILES

MONTREAL, LE 06 MAI 2012



Ennouri triki, 2012



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

PRÉSENTATION DU JURY
CETTE THÈSE A ÉTÉ ÉVALUÉE
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Toan Vu-Khanh, directeur de thèse
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

Mme Marie-José Nollet, présidente du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Éric David, membre du jury
Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure

M. Dominic Tessier, examinateur externe indépendant
Groupe CTT

ELLE A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 06 MAI 2012

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Ce projet est le résultat d'une étroite collaboration entre la Chaire de recherche en matériaux et équipement de protection en Santé et en Sécurité du Travail (CSST) de l'École de Technologie Supérieure (ÉTS) et l'Institut de Recherche Robert-Sauvé en Santé et en Sécurité du Travail du Québec (IRSST).

Dans ce cadre, je tiens tout d'abord à exprimer toute ma reconnaissance au Professeur Toan Vu-Khanh pour m'avoir accueilli au sein du CSST et pour m'avoir donné les moyens nécessaires pour réaliser ce projet.

Je tiens aussi particulièrement à remercier Mme Patricia Dolez pour son aide précieuse, sa disponibilité, et ses conseils.

Je remercie également Mme Marie-José Nollet pour avoir accepté de présider mon jury de thèse. J'exprime mes remerciements chaleureux à M. Éric David d'avoir accepté faire partie du jury de mon doctorat. Je remercie particulièrement M. Dominic Tessier qui m'a fait l'honneur d'être examinateur de cette thèse.

Évidemment, je remercie toute l'équipe du CSST, anciens et nouveaux collègues, avec qui j'ai passé toutes ces années, et en particulier tous ceux et celles qui ont su être là pour les conseils, l'écoute et surtout merci pour tous ces bons moments passés dans les bureaux, dans les laboratoires et voir même dans les couloirs...

Et plus personnellement, un immense merci à mes parents, à mes sœurs, à mes frères et à ma nouvelle petite famille qui s'est construite et agrandi durant cette thèse. Un grand bonheur qui permet d'avancer sereinement.

MÉCANISMES ET MÉCANIQUE DE LA DÉCHIRURE DES TEXTILES ET DES TEXTILES ENDUITS

Ennouri TRIKI

RÉSUMÉ

Cette thèse vise à apporter une contribution à l'étude et à la modélisation de la déchirure des textiles et des textiles enduits. Notons que la résistance à la déchirure est l'une des caractéristiques mesurées pour les équipements de protection contre les agresseurs mécaniques en milieu de travail.

Jusqu'à présent, ce comportement en déchirure a été étudié en mesurant la force de déchirure et le travail de déchirure. De fait, aucun critère de rupture en déchirure n'existe actuellement. Par conséquent, en s'inspirant de la théorie du Griffith et de la mécanique de la rupture, une formulation d'un nouveau critère de rupture des structures textiles a été proposée. Cette approche offre la possibilité de déterminer d'une manière plus précise l'énergie nécessaire pour la création d'une nouvelle surface de rupture. Ce critère nous permet d'analyser l'effet des caractéristiques des tissus sur la variation de l'énergie de rupture. Cette étude montre que la résistance au glissement des fils dans la structure est le principal facteur qui contrôle la propagation de la fissure.

En se basant sur la théorie de la mécanique de la rupture, un modèle de calcul de l'énergie de rupture par déchirure a été aussi élaboré. Ce modèle de déchirure relie l'énergie aux paramètres caractérisant les phénomènes affectant la déchirure des tissus, notamment la force de glissement et la force à la rupture des fils. Cette modélisation a tenu compte de certaines caractéristiques des tissus tels que l'épaisseur du matériau, la densité des fils, etc.

Par l'étude de la variation de l'énergie de rupture par déchirure en fonction du rapport établi entre la force à la rupture et la force de glissement d'un fil (F_{YB}/F_S), l'effet des mécanismes de la propagation de la fissure dans les tissus sur leur comportement en déchirure a été aussi observé. Les résultats obtenus permettent de distinguer deux différentes catégories de déchirure. Pour les basses densités des fils, la fissure se propage dans le tissu par glissement des fils, alors que pour les hautes densités des fils, la déchirure est obtenue par la rupture des fils. Ainsi, il est important de noter que l'énergie de rupture par déchirure des tissus est maximale lorsque le rapport F_{YB}/F_S est proche de l'unité.

En ce qui a trait à la déchirure des textiles enduits, la propagation de la fissure est obtenue par déchirure du support textile et de l'enduit de manière simultanée ainsi que par le délaminage du système textile-enduit. La définition d'un critère de rupture pour les textiles enduits nous a permis de constater que l'enduction d'un support textile par une couche d'élastomère engendre une diminution de son énergie de rupture. En outre, l'étude de la déchirure du support textile, de l'enduit et des textiles enduits a montré que l'énergie

obtenue pour la couche de l'enduit est très faible si nous la comparons avec celles du support textile et du textile enduit.

L'étude de l'effet du vieillissement sur l'énergie de rupture par déchirure a aussi fait l'objet de cette thèse. L'exposition des textiles enduits à différentes températures de vieillissement montre que le comportement en déchirure des textiles et des textiles enduits est similaire pour les durées les plus faibles. Par contre, une accélération de la réduction de la résistance à la déchirure est observée pour les textiles enduits aux temps de vieillissement plus élevés. Ce phénomène peut éventuellement être attribué à une augmentation de l'adhésion du système textile-enduit suite au traitement de vieillissement. La diminution de la mobilité des fils ainsi engendrée cause alors une importante chute de la valeur de l'énergie de rupture par déchirure.

Mots clés : Textiles, Textiles enduits, Énergie de rupture, Modélisation, Vieillissement thermique

MECHANISMS AND MECHANICS OF TEARING OF THE TEXTILES AND THE COATED TEXTILES

Ennouri TRIKI

ABSTRACT

The aim of this thesis is to contribute to the study and modeling of the tearing of textiles and coated textiles. In particular, resistance to tearing is considered when evaluating the performance of protective materials against mechanical hazards at work.

Until now, the tearing behavior has been studied by measuring its force or/and calculating its work. No failure criterion for tearing has been developed. Therefore, the formulation of a new tearing energy criterion for textile structures has been developed based on Griffith's theory and fracture mechanics. This approach allows the precise determination of the energy necessary to create a new fracture surface. This criterion can be used to study the effect of the fabric characteristics on the variation of the fracture energy. The study shows that yarn resistance to slippage is the main parameter controlling crack propagation.

Based on fracture mechanics, a fracture energy model has also been developed. This model links the fracture energy with parameters characterizing the fabric tearing behavior underlying phenomena, including yarn slippage and yarn breaking force in tension. It also takes into account some fabric characteristics such as material thickness, yarns density, etc.

By studying the variation of the fracture energy with the yarn breaking force and slippage force (F_{YB} / F_S) ratio, the effect of the crack propagation mechanisms of the fabric tearing behavior is also analyzed. Two different tearing categories can be distinguished. At low yarns density, the crack propagates by yarn slippage in the fabric, whereas for high yarn densities, tearing in the fabric is produced by yarn breaking. The fabric fracture energy reaches a maximum when the ratio F_{YB} / F_S is close to the unity.

Regarding the tearing of coated textiles, it was observed that crack propagation proceeds through simultaneous tearing in the fabric and its coating as well as through delamination, of the textile / coating assembly. By applying the fracture energy criterion to coated textiles, we found that coating a textile with a layer of elastomer generates a reduction in its fracture energy. Moreover, the study of the tearing of the support fabric, the coating layer and the coated fabric indicates that the fracture energy of the coating is much lower than those of the fabric and the coated textile.

The exposure of these materials to various aging temperatures shows a similar tearing behavior for fabrics and coated fabrics at low aging times. On the other hand, an acceleration in the fracture energy reduction is observed for coated fabrics at longer aging times.. This phenomenon can be attributed to an increase in the adhesion between the textile and coating as

a result of thermal aging. The reduction in yarn mobility thus created generates a significant drop in the fracture energy value.

Keywords: Fabrics, Coated fabrics, Fracture energy, Modeling, Thermal aging

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	28
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE	32
1.1 Introduction.....	32
1.2 Matériaux utilisés pour les vêtements de protection.....	32
1.2.1 Élastomères	32
1.2.1.1 Nitrile	33
1.2.1.2 Néoprène	34
1.2.1.3 Les fibres.....	35
1.2.1.4 Différentes structures textiles	37
1.2.2 Textiles enduits	40
1.3 Déchirure des matériaux de protection	42
1.3.1 Déchirure des élastomères	42
1.3.1.1 Différentes méthodes de tests de déchirure	42
1.3.1.2 Mécanismes de déchirure.....	43
1.3.1.3 Facteurs influençant la déchirure des élastomères.....	45
1.3.1.4 Modèles de calcul de la résistance à la déchirure	46
1.3.2 Déchirure des matériaux textiles.....	48
1.3.2.1 Différentes méthodes de tests de déchirure	48
1.3.2.2 Mécanismes de déchirure.....	49
1.3.2.3 Résistance à la déchirure.....	51
1.3.2.4 Modèles prédictifs de résistance à la déchirure des tissus	53
1.3.2.5 Facteurs influençant la résistance à la déchirure.....	58
1.3.3 Déchirure des textiles enduits	61
1.3.3.1 Différentes méthodes de tests de déchirure	61
1.3.3.2 Mécanismes de déchirure.....	62
1.3.3.3 Résistance de déchirure.....	63
1.4 Effet du vieillissement sur la résistance mécanique des vêtements de protection.....	74
1.4.1 Vieillissement des polymères	74
1.4.2 L'effet du vieillissement	75
1.4.3 Influence du vieillissement sur les propriétés mécaniques	77
1.4.4 Détermination des paramètres cinétiques	79
1.4.5 Prédiction de la durée de vie.....	80
1.5 Conclusion	81
CHAPITRE 2 CRITÈRE DE DÉCHIRURE.....	82
2.1 Introduction.....	82
2.2 Mécanique de la rupture.....	83
2.2.1 Théorie de Griffith	83
2.2.2 Mécanique de la rupture non linéaire.....	84
2.2.3 Déchirure des textiles.....	85

2.3	Protocole expérimental et matériaux	86
2.3.1	Méthodes de déchirure.....	86
2.3.2	Matériaux	90
2.4	Formulation du critère de rupture	91
2.4.1	Configuration pantalon	93
2.4.2	Configuration uni-axiale	96
2.5	Polyvalence du critère.....	98
2.6	Application de ce critère de rupture.....	101
2.6.1	Effet de la densité des fils de trame	102
2.6.2	Effet de la masse linéique des fils de trame.....	105
2.6.3	Effet de l'armure	107
2.7	Discussion	108
2.8	Conclusion	111

CHAPITRE 3	MÉCANISMES ET MÉCANIQUE DE LA DÉCHIRURE DES TISSUS.....	112
3.1	Introduction.....	112
3.2	Méthodologie et matériaux	113
3.2.1	Matériaux	113
3.2.2	Essais de déchirure pantalon.....	114
3.2.3	Essais de traction sur des tissus	114
3.2.4	Essais de traction sur un fil de trame	115
3.2.5	Essais de glissement d'un fil.....	116
3.2.6	Essais d'empilement des fils.....	117
3.3	Étude de l'influence des caractéristiques du tissu sur leurs propriétés mécaniques ..	119
3.3.1	Essai de déchirure	119
3.3.2	Essais de traction sur les tissus	121
3.3.2.1	Mécanismes de traction.....	121
3.3.2.2	Propriétés mécaniques des tissus	124
3.3.3	Essais de traction sur les fils	133
3.3.3.1	Résistance à la rupture	134
3.3.3.2	Résistance au glissement.....	136
3.3.3.3	Essai d'empilement.....	140
3.4	Synergie entre les différents mécanismes de déchirure des tissus.....	144
3.4.1	Effet du glissement des fils sur les propriétés en traction des tissus	145
3.4.2	Relation entre la force de glissement et la force d'empilement des fils ..	148
3.4.3	Effet de l'empilement des fils sur la résistance à la rupture des tissus ...	149
3.5	Modélisation de l'énergie critique de déchirure des tissus	150
3.5.1	Formulation du modèle.....	151
3.5.1.1	Travail de déchirure	151
3.5.1.2	Énergie de rupture.....	153
3.5.1.3	Conditions aux limites	153
3.5.1.4	Analyse en terme de G : Mécanismes de déchirure.....	157
3.5.1.5	Validation du modèle.....	159

3.6	Conclusion	162
CHAPITRE 4 DÉCHIRURE DES TEXTILES ENDUITS.....164		
4.1	Introduction.....	164
4.2	Mécanismes de déchirure.....	165
4.3	Déchirure des élastomères	166
4.3.1	Matériaux	167
4.3.2	Essais de déchirures	167
4.3.3	Analyse des faciès de rupture après la déchirure	168
4.3.4	Critère de déchirure.....	172
4.4	Délaminage du textile et de l'enduit	174
4.4.1	Matériaux	174
4.4.2	Méthode de délaminage T-peel.....	175
4.4.3	Étude de l'adhésion du textile avec l'enduit	175
4.5	Étude de la déchirure des textiles enduits	180
4.5.1	Matériaux et protocoles expérimentaux.....	180
4.5.1.1	Matériaux	180
4.5.1.2	Méthode de déchirure pantalon.....	182
4.5.2	Critère de rupture des textiles enduits.....	183
4.5.3	Effet de l'enduit sur le comportement en déchirure des textiles enduits	186
4.5.3.1	Force de déchirure.....	186
4.5.3.2	Énergie de rupture.....	189
4.5.3.3	Effet de l'angle sur l'énergie de rupture des textiles	193
4.6	Conclusion	196
CHAPITRE 5 COMPORTEMENT EN DÉCHIRURE DES TEXTILES ENDUITS APRÈS VIEILLISSEMENT THERMO-OXYDATION.....197		
5.1	Introduction.....	197
5.2	Justification de l'importance de l'étude.....	198
5.3	Matériaux et méthodologie	198
5.4	Influence du vieillissement sur l'énergie critique de déchirure	199
5.4.1	Tissus	199
5.4.2	Tissus enduits.....	200
5.4.3	Couches d'enduits	201
5.5	Prédiction de la durée de vie	202
5.5.1	Tissus	202
5.5.2	Tissus enduits.....	205
5.8	Propriétés physico-chimiques	208
5.8.1	Analyse DSC.....	208
5.8.2	Analyse FTIR.....	210
5.9	Analyse de la morphologie des tissus	212
5.10	Discussion	213
5.11	Modélisation du vieillissement thermo-oxydatif	216
5.12	Conclusion	220

CONCLUSION.....	221
RECOMMANDATIONS	224
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	225

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Structures tissées38
Tableau 2.1	Description des matériaux91
Tableau 3.1	Caractéristiques des tissus testés.....111
Tableau 3.2	Comportements en déchirure et caractéristiques des tissus.....161
Tableau 4.1	Exemple des compositions chimiques des inclusions rigides pour une plaque en néoprène168
Tableau 4.2	Différents types de matériaux utilisés pour étudier le comportement en délaminage du textile et de l'enduit.....174
Tableau 4.3	Différents types de matériaux utilisés pour étudier le comportement181
Tableau 5.1	Valeurs de décalage a_T obtenues à différentes températures.....203
Tableau 5.2	Valeurs de décalage a_T obtenues à différentes températures de vieillissement pour des tissus enduits.....203
Tableau 5.3	Comportement thermique des tissus en polyester vieillis à différents temps à 170°C.....207
Tableau 5.4	Caractéristiques infrarouges des groupements principaux du PET211

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Structure chimique du Nitrile34
Figure 1.2	Structure chimique du Néoprène34
Figure 1.3	Structure chimique du polyacétate de vinyle.....32
Figure 1.4	Structure chimique du coton.....36
Figure 1.5	Structure chimique du Polyester.....36
Figure 1.6	Structure chimique du Kevlar®..... 35
Figure 1.7	a) Les tricots à mailles cueillies et b) les tricots à mailles jetées.....39
Figure 1.8	Textile non-tissé40
Figure 1.9	Photos de gants en enduit de polyuréthane.....40
Figure 1.10	Processus de fabrication des gants de protection enduits41
Figure 1.11	Les cinq éprouvettes les plus courantes pour étudier la déchirure des élastomères43
Figure 1.12	Différentes méthodes de déchirure des textiles49
Figure 1.13	Configuration de la déchirure pantalon : formation de la zone <i>Del</i>50
Figure 1.14	Courbe de la force de déchirure des tissus, issue d'un essai de déchirure pantalon51
Figure 1.15	Courbe de la force de déchirure des tissus en coton, issue d'un essai de déchirure pantalon52
Figure 1.16	Courbe de la force de déchirure des tissus en coton, issue d'un essai de déchirure pantalon53
Figure 1.17	Modélisation de la résistance à la déchirure des tissus.....54
Figure 1.18	Modélisation de la déchirure des tissus56
Figure 1.19	Modèle simplifié.....57

Figure 1.20	Effet du type de l'armure sur la variation de la force de déchirure : 1/1 : Armure toile - 3/1 : Armure de sergé59
Figure 1.21	Effet de la densité des fils sur la propagation de la fissure dans des structures textiles60
Figure 1.22	Effet de la torsion des fils sur la force de déchirure des tissus61
Figure 1.23	Enduction partielle d'un tissu de forme pantalon par une couche de caoutchouc62
Figure 1.24	Modélisation mathématique de la déchirure des tissus enduits64
Figure 1.25	Effet de la torsion des fils sur la force de déchirure des tissus enduits67
Figure 1.26	Effet de la densité des fils sur la force de déchirure des tissus enduits, obtenue par la méthode pantalon68
Figure 1.27	Effet de la densité des fils sur la force de déchirure des tissus enduits69
Figure 1.28	L'effet de la force d'adhésion sur la variation de la force de déchirure des textiles enduits70
Figure 1.29	Effet de la densité des fils de trame et des fils de trame (2) sur la force d'adhésion des tissus enduits71
Figure 1.30	Effet de la densité des fils de trame et des fils de chaîne sur la force d'adhésion du textile avec l'enduit72
Figure 1.31	Effet de la torsion des fils de trame et des fils de chaîne sur la force d'adhésion du textile avec l'enduit73
Figure 2.1	Configuration de l'échantillon pantalon.....84
Figure 2.2	Essai de déchirure pantalon87
Figure 2.3	Exemple typique de la courbe force-déplacement, issue d'un test de déchirure charge/décharge réalisé dans la configuration pantalon88
Figure 2.4	Essai de déchirure uni-axiale89
Figure 2.5	Exemple typique de la courbe force-déplacement, issue d'un test de déchirure charge/décharge réalisé par la configuration uni-axiale90
Figure 2.6	Courbes de déchirure force-déplacement à deux valeurs de déplacements l, issue d'essais de déchirure pantalon..... 92

Figure 2.7	Variation du travail Winit en fonction de la longueur de déchirure c , issue d'essais de déchirure pantalon pour le tissu en coton.....	95
Figure 2.8	Courbe de la variation du travail de déchirure en fonction de la surface de rupture, issue d'essais de déchirure pantalon pour un tissu en coton	96
Figure 2.9	Courbes de déchirure force-déplacement à deux valeurs de déplacements l , issues d'essais de déchirure uni-axiale	97
Figure 2.10	Courbe de la variation du travail de déchirure en fonction de la surface de rupture, issue d'essais de déchirure uni-axiale pour le tissu en coton	98
Figure 2.11	Courbes de la variation du travail de déchirure en fonction de la surface de rupture, issues d'essais de déchirure pantalon et uni-axiale pour des tissus en mélange polyester/coton	99
Figure 2.12	Courbes de la variation du travail de déchirure en fonction de la surface de rupture, issues d'essais de déchirure pantalon, pour deux armures toile et sergé en polyester	101
Figure 2.13	Courbes de la variation du travail de déchirure en fonction de la surface de rupture, issues d'essais de déchirure pantalon des tissus de 33 Tex et d'armure toile	103
Figure 2.14	Courbes de la variation du travail de déchirure en fonction de la surface de rupture, issues d'essais de déchirure pantalon des tissus de 33 Tex et d'armure sergé	103
Figure 2.15	Diagramme de la variation de l'énergie de rupture en fonction de la densité des fils de trame, issues d'essais de déchirure pantalon des tissus de 33 Tex et d'armure toile et sergé	104
Figure 2.16	Courbes de la variation du travail de déchirure en fonction de la surface de rupture, issues d'essais de déchirure pantalon des tissus de 12 fils/cm et d'armure toile.....	105
Figure 2.17	Courbes de la variation du travail de déchirure en fonction de la surface de rupture, issues d'essais de déchirure pantalon des tissus de 15 fils/cm et d'armure de sergé	106
Figure 2.18	Diagrammes de la variation de l'énergie de rupture en fonction de la masse linéique des fils de trame, issus d'essais de déchirure pantalon des armures toile et sergé	107

Figure 2.19	Mécanismes de déchirure des structures textiles en polyester, issus des essais de déchirure pantalon : a) déchirure par rupture des fils transversaux avec faible glissement des fils transversaux; b) déchirure par glissement/rupture des fils transversaux; c) déchirure par glissement des fils transversaux (sans rupture)109
Figure 2.20	Exemple des courbes de déchirure force-déplacement, issues d'essais de déchirure pantalon des tissus d'armure toile110
Figure 3.1	Configuration de déchirure pantalon; exemple de l'allure de la force déchirure lors d'un essai de chargement - déchargement.....114
Figure 3.2	Essai de traction monotone; exemple de la courbe force-déplacement, issue d'un essai de traction réalisé sur des tissus selon la direction des fils de trame115
Figure 3.3	Essai de traction monotone; exemple de la courbe force-déplacement, issue d'un essai de traction effectué sur un fil de trame.....116
Figure 3.4	Essai de glissement d'un fil de trame dans une structure textile, exemple de la courbe de glissement force-déplacement.....117
Figure 3.5	Essai d'empilement des fils de trame dans une structure textile, exemple de la courbe d'empilement force-déplacement118
Figure 3.6	Variation de l'énergie de rupture en fonction de la masse linéique des fils transversaux pour des tissus en polyester.....120
Figure 3.7	Variation de l'énergie de rupture en fonction de la densité des fils transversaux pour des tissus en polyester de 33 Tex.....120
Figure 3.8	Exemple de courbes force-déplacement d'un essai de traction monotone des tissus de différentes densités et masses linéiques des fils121
Figure 3.9	Interaction des fils de chaîne et de trame pendant un essai de traction d'un tissu Tirée de Van Santrvoort (1994)122
Figure 3.10	Mécanismes de déformation et de rupture des tissus observés lors d'un essai de traction123
Figure 3.11	Variation de l'énergie de rupture des tissus en fonction de leurs modules initiaux125
Figure 3.12	Diagramme de la variation du module initial des tissus en fonction de la masse linéique des fils longitudinaux pour une armure toile et sergé en polyester126

Figure 3.13	Diagramme de la variation du module initial des tissus en fonction de la densité des fils longitudinaux pour une armure toile et sergé de 33 Tex en polyester.....	127
Figure 3.14	Variation de l'énergie de rupture des tissus en fonction de leurs forces à la rupture.....	128
Figure 3.15	Diagramme de la variation de la force de rupture des tissus en fonction de la masse linéique des fils longitudinaux pour une armure toile et sergé en polyester	129
Figure 3.16	Diagramme de la variation de la force de rupture des tissus en fonction de la densité des fils longitudinaux pour une armure toile et sergé de 33 Tex en polyester	129
Figure 3.18	Diagramme de la variation de la déformation à la rupture des tissus en fonction de la masse linéique des fils longitudinaux pour une armure toile et sergé en polyester	132
Figure 3.19	Diagramme de la variation de la déformation à la rupture des tissus en fonction de la densité des fils longitudinaux pour une armure toile et sergé de 33 Tex en polyester	132
Figure 3.20	Exemple de courbes force-déplacement, issues des essais de traction monotones menés sur des fils de différentes masses linéiques	133
Figure 3.21	Variation de la force à la rupture des fils de trame en fonction de leurs masses linéiques	134
Figure 3.22	Variation du module d'Young des fils de trame en fonction de leurs masses linéiques	135
Figure 3.23	Variation de l'élongation à la rupture des fils de trame en fonction de leurs masses linéiques.....	136
Figure 3.24	Variation de l'énergie de rupture des tissus en fonction de leurs forces de glissement des fils.....	137
Figure 3.25	Exemple de courbes force-déplacement, issues des essais de glissement d'un fil dans des tissus de différentes masses linéiques	138
Figure 3.26	Diagramme de la variation de la force de glissement d'un fil en fonction de la masse linéique des fils pour une armure toile et une armure sergé en polyester.....	139

Figure 3.27	Diagramme de la variation de la force de glissement d'un fil en fonction de la densité des fils pour une armure toile et une armure de sergé en polyester140
Figure 3.28	Diagramme de la variation de l'énergie de rupture des tissus en fonction de leurs forces d'empilement des fils141
Figure 3.29	Courbes force-déplacement issues des essais d'empilement des fils dans des tissus de différentes masses linéiques142
Figure 3.30	Mécanismes observés pendant un test d'empilement des fils142
Figure 3.31	Diagramme de la variation de la force d'empilement des fils en fonction de la masse linéique des fils pour une armure toile et une armure de sergé en polyester143
Figure 3.32	Diagramme de la variation de la force d'empilement des fils en fonction de la densité des fils pour une armure toile et une armure de sergé de 33 Tex en polyester144
Figure 3.33	Variation du module initial en fonction de la force de glissement pour des tissus en polyester146
Figure 3.34	Variation de la force à la rupture en fonction de la force de glissement pour des tissus en polyester147
Figure 3.35	Variation de la déformation à la rupture en fonction de la force de glissement pour des tissus en polyester148
Figure 3.36	Variation de la force de glissement en fonction de la force d'empilement pour des tissus en polyester149
Figure 3.37	Variation de la force à la rupture en fonction de la force d'empilement pour des tissus en polyester150
Figure 3.38	Variation du déplacement l en fonction de la longueur de déchirure c152
Figure 3.39	Modélisation de la zone Del (Teixeira, Latt et al. 1955).....154
Figure 3.41	Mécanique (énergie) et mécanismes (glissement et rupture des fils) de déchirure des tissus.....159
Figure 3.42	Caractéristique du matériau160
Figure 3.43	Taux de restitution d'énergie de rupture théorique versus taux de restitution d'énergie de rupture expérimental.....162

Figure 4.1	Mécanismes de déchirure des textiles enduits, issus d'un test de déchirure pantalon.....	165
Figure 4.2	Faciès de rupture d'un tissu enduit : traces de délaminage	166
Figure 4.3	Méthode de déchirure pantalon des plaques d'élastomères.....	167
Figure 4.4	Groupe d'agglomérats.....	168
Figure 4.5	Faciès de rupture du matériau après déchirure	169
Figure 4.6	Mécanisme de déchirure, a) cavitation spontanée, b) cavitation aux pôles des inclusions	170
Figure 4.7	Mécanisme de déchirure : décohésion des inclusions	171
Figure 4.8	Cavitation autour d'un agglomérat qui favorise son décohésion	171
Figure 4.9	Mécanismes de déchirure : a) rupture des inclusions, b) présence de résidus des inclusions, c) rupture des inclusions par cavitation	172
Figure 4.10	Courbes force-déplacement issues des essais de déchirure pantalon des plaques d'élastomères : néoprène, Polyacétate de vinyle ou caoutchouc naturel	173
Figure 4.11	Variation du travail de déchirure en fonction de la surface déchirée des plaques d'élastomères : néoprène, polyacétate de vinyle ou caoutchouc naturel	174
Figure 4.12	Caractérisation du comportement en adhésion du textile avec l'enduit par la méthode T-peel.....	174
Figure 4.13	Courbes de délaminage force-déplacement obtenues à la suite des essais de délaminage T-peel	176
Figure 4.14	Effet du degré de pénétration de l'enduit sur la force de délaminage du tissu en polyester et du polyacétate de vinyle	178
Figure 4.15	Effet du degré de pénétration de l'enduit sur la force de délaminage du tricot en kevlar et d'élastomère en caoutchouc	179
Figure 4.16	Effet du degré de pénétration de l'enduit sur la force de délaminage du tricot en coton et d'élastomère en caoutchouc.....	180
Figure 4.17	Supports textiles tricotés à mailles cueillies	180

Figure 4.18	Renfort des mailles par un fil de charge	182
Figure 4.19	Essai de déchirure pantalon d'un tissu enduit	182
Figure 4.20	Courbe de force de déchirure - déplacement obtenue à partir des essais de déchirure pantalon	183
Figure 4.21	Variation du travail de déchirure en fonction de la surface de déchirure pour différents textiles enduits	185
Figure 4.22	Exemple d'allures de la force de déchirure des tissus et des tissus enduits, issues d'un essai de déchirure pantalon	187
Figure 4.23	Exemple d'allures de la force de déchirure des tricots et des tricots enduits déchirés selon la direction colonne	188
Figure 4.24	Exemple d'allures de la force de déchirure des tricots et des tricots enduits déchirés selon la direction rangée	189
Figure 4.25	Valeurs de la force et de l'énergie de rupture du textile enduit, du support textile et de l'enduit obtenues dans le cas du matériau M1	191
Figure 4.26	Valeurs de la force et de l'énergie de rupture du textile enduit, du support textile et de l'enduit obtenues dans le cas du matériau M2	192
Figure 4.27	Valeurs de la force et de l'énergie de rupture du textile enduit, du support textile et de l'enduit obtenues dans le cas du matériau M3	193
Figure 4.28	Effet de l'angle de déchirure sur la valeur de l'énergie de déchirure des tissus enduits (M1)	194
Figure 4.29	Effet de l'angle de déchirure sur la valeur de l'énergie de déchirure des tricots enduits (M2)	195
Figure 5.1	Effet du vieillissement sur la rétention de l'énergie de rupture des tissus.....	198
Figure 5.2	Effet du vieillissement sur la rétention de l'énergie de rupture des tissus enduits.....	201
Figure 5.3	Effet du vieillissement sur la rétention de l'énergie de rupture des enduits.....	202
Figure 5.4	Évolution de $\ln(aT)$ en fonction de $1/T$ obtenue pour les tissus.....	202

Figure 5.5	Évolution de la courbe maitresse TTS à différentes températures de vieillissement des tissus205
Figure 5.6	Évolution de $\ln(aT)$ en fonction de $1/T$ obtenue pour les tissus enduits..204
Figure 5.7	Évolution de la courbe maitresse TTS à différentes températures de vieillissement des tissus enduits207
Figure 5.8	Courbe de la DSC d'un tissu en PET vieilli à 170°C208
Figure 5.9	Évolution du taux de cristallinité des tissus vieillis à 170°C..... 209
Figure 5.10	Analyse FTIR sur des tissus en polyester vieillis et non vieillis211
Figure 5.11	Changement de la morphologie des fibres en polyester avant et après vieillissement, a) non vieillis et b) vieillis.....211
Figure 5.12	L'effet du vieillissement thermique sur l'énergie de rupture du support textile, de l'enduit et du textile enduit.....213
Figure 5.13	Effet du vieillissement thermique sur la rétention de la force d'adhésion du textile avec l'enduit.....214
Figure 5.14	Évolution de la courbe maitresse TTS à différentes températures de vieillissement des tissus et des tissus enduits215
Figure 5.15	Dégradation thermique de PET proposée 215
Figure 5.16	Courbe maitresse de rétention de l'énergie de rupture en fonction de la durée de vieillissement et son interpolation par l'équation d'Hill pour la thermo-oxydation du tissu en polyester218
Figure 5.17	Courbe maitresse de rétention de l'énergie de rupture en fonction de la durée de vieillissement et son interpolation par l'équation d'Hill pour la thermo-oxydation du tissu en polyester- vinyle.....217

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

G_C	Énergie de rupture des tissus
G_S	Énergie de rupture des élastomères
W, U	Travail élastique stocké dans le matériau
c	Longueur de déchirure
A	Surface de rupture
e	Épaisseur du matériau
l	Longueur du déplacement appliqué
$W_{\text{déch}}$	Travail de déchirure des tissus
W_{init}	Travail initial
$F_{\text{déch}}$	Force de déchirure
L_i	Déplacement initial
L_d	Déplacement de déchirure
c_0	Longueur de la pré-fissure
E_F	Module initial des tissus
F_{FB}	Force à la rupture des tissus
ε_{FB}	Déformation à la rupture des tissus
E_Y	Module initial d'un fil
F_{YB}	Force à la rupture d'un fil
ε_{YB}	Déformation à la rupture d'un fil
F_S	Force de glissement
F_J	Force d'empilement
t	Densité des fils
n	Nombre de points de croisement des fils de chaîne et de trame
S	Espacement entre deux fils
N	Nombre d'espacements
l_{\blacktriangledown}	Longueur de la zone <i>Del</i>
h	Hauteur de la zone <i>Del</i>
l_s	Longueur totale de glissement des fils dans la zone <i>Del</i>

G_{CE}	Énergie de rupture des enduits
W_E	Travail de déchirure des enduits
A_E	Surface de rupture des enduits
ξ	Degré de pénétration
δ	Épaisseur de pénétration de l'enduit
e_T	Épaisseur du support textile
G_{CTE}	Énergie de rupture des textiles enduits
W_{TE}	Travail de déchirure des textiles enduits
A_{TE}	Surface de rupture des textiles enduits
a_T	Temps de décalage
E_a	Énergie d'activation
T	Température et force de déchirure
ΔH_f	Enthalpie de fusion
ΔH_0	Enthalpie à l'infini
χ_C	Taux de cristallinité
R	Constante de gaz
TTS	Superposition temps-température (Time Temperature Superposition)
FTIR	Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (Fourier Transform
Infrared)	
DSC	Calorimétrie différentielle à balayage (Differential Scanning Calorimetry)
MEB	Microscope électronique à balayage
S	Souffre
O	Oxygène
Mg	Magnésium
Si	Silicium
Cl	Chlore
K	Potassium
Ca	Calcium
Zn	Zinc

Cst	Constante
DENT	Géométrie en tension à double entaille (Double Edge-Notched Tension)
EN	Norme européenne
ASTM	American Society for Testing and Materials
IRSST	Institut de Recherche en Santé et en Sécurité du Travail du Québec

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

Unités de Base

m	mètre (unité de longueur)
kg	kilogramme (unité de masse)
s	seconde (unité de temps)
K	Kelvin (unité de température)
mol	mole (unité de quantité de matière)

Longueur

mm	millimètre
cm	centimètre

Surface

mm ²	millimètre carré
-----------------	------------------

Force

N	Newton
g	Gramme

Travail

N.mm	Newton millimètre
------	-------------------

Énergie

J	Joule
kJ	kilojoule
N/mm	Newton par millimètre
N.mm/mm ²	Newton millimètre par millimètre carré

Unités de Base des tissus

Tex	Titre = g/Km
Fils/cm	fils par centimètre

Angle

° degré

Temps

s seconde

h heure

min minute

Température

°C degré Celsius

K Kelvin

Fréquence

cm⁻¹ centimètre moins un

Masse molaire

kg/mol kilogramme par mol

g/mol gramme par mol

INTRODUCTION

Motivation du projet de recherche

La santé et la sécurité au travail occupent aujourd'hui une place très importante dans les préoccupations de l'entreprise. Pour améliorer le niveau de sécurité des employés, plusieurs instituts et centre de recherche ont été mis en place afin de développer des normes et des méthodologies de travail plus sécuritaires. La situation s'est améliorée, mais, dans certains cas, elle est encore particulièrement alarmante.

À titre d'exemple, au Québec, les blessures aux mains, aux doigts et aux poignets comptent pour environ 18% de l'ensemble des lésions indemnisées. Les indemnisations sont encore plus élevées dans le domaine de l'industrie des produits de métal, où elles peuvent atteindre 29% des lésions indemnisées (Harrabi 2009). Dans le cas de l'industrie de la fabrication des produits métalliques, en moyenne, 650 travailleurs manuels doivent s'absenter du travail chaque jour en raison de lésions professionnelles. Les zones les plus touchées sont les mains et les doigts qui comptent pour 30% des cas. L'absence de travail causée par ce genre de blessures est en moyenne de 20 jours (IRSST 1990).

Aux États-Unis, le phénomène est à peu près semblable. Ainsi, une étude récente du « *Department of Labor* » a démontré que les blessures aux doigts et aux mains sont les plus fréquentes en milieu de travail (plus de 27 %) et qu'elles se classent également au premier rang des blessures évitables (KEVLAR® 1999). En ce qui a trait aux blessures entraînant un arrêt de travail, elles se classent au deuxième rang après les blessures au dos et au cou. Le Bureau du laboratoire statistique américain a aussi confirmé que la majorité des employés blessés aux mains ne portaient pas de gants au moment de leur accident et que les gants portés par de nombreux employés blessés n'étaient pas appropriés à la tâche effectuée (KEVLAR® 1999). Dans une autre étude, ce même bureau a également montré que les blessures aux mains sont plus de deux fois et demie plus fréquentes chez les travailleurs ne portant pas de gants de protection.

Pour cette raison, le port des vêtements de protection est indispensable afin de réduire la fréquence et la gravité des lésions professionnelles. Parmi les matériaux utilisés pour fabriquer ces vêtements se trouvent les élastomères, les textiles et les textiles enduits. Des études sur la résistance des vêtements de protection aux agresseurs mécaniques, en particulier à la coupure, à la perforation et la piqûre par les aiguilles, ont été réalisées au cours de ces dernières années. Les chercheurs ont contribué à une meilleure compréhension de la rupture par coupure et par piqûre de certains matériaux de protection (Vu Thi 2004 ; Nguyen 2009). Cependant, le comportement à la déchirure de ces matériaux, notamment ceux en textiles et en textiles enduits, reste relativement peu exploré. Pourtant, la résistance à la déchirure figure généralement parmi les exigences des normes sur les vêtements de protection. Dans la littérature, la résistance à la déchirure a souvent été caractérisée par la mesure de force ou le calcul du travail. Cependant, ces études ne prennent pas en considération la surface de rupture qui constitue un paramètre indispensable à l'étude de la mécanique de la rupture du matériau. Ainsi, jusqu'à présent aucun critère des structures textiles qui permette de déterminer l'énergie de rupture par déchirure n'a été développé.

Il est donc important d'approfondir les connaissances sur le phénomène de déchirure dans les matériaux de protection, afin entre autres de permettre le développement de vêtements de protection plus performants et ainsi augmenter la sécurité des travailleurs.

Objectifs

Le travail présenté dans cette thèse concerne l'étude de la mécanique et des mécanismes de la déchirure des textiles et textiles enduits, en particulier ceux utilisés dans le contexte des vêtements de protection. L'objectif principal de cette étude est d'apporter une amélioration significative à la compréhension et à la modélisation des mécanismes de déchirure des textiles et des textiles enduits. Il s'agit en particulier de proposer un critère de rupture et d'élaborer un modèle de calcul de l'énergie de rupture des matériaux textiles et textiles enduits qui prenne en compte les mécanismes en jeu lors de la déchirure. Comme l'utilisation des textiles dépasse les domaines traditionnels pour conquérir les domaines techniques, nous revisiterons l'analyse de l'effet de l'armure, de la densité et la masse linéique des fils sur les mécanismes et l'énergie de rupture dans le cas des textiles techniques à fibres synthétiques.

Par ailleurs, afin de caractériser l'évolution de leurs performances au cours de l'utilisation des matériaux de protection, une analyse de l'évolution de l'énergie de rupture par déchirure des textiles et textiles enduits suite à des traitements de vieillissement accéléré fera partie de cette étude.

Cette thèse inclut cinq chapitres suivis d'une conclusion:

Le premier chapitre présentera une étude bibliographique relative aux matériaux utilisés dans la fabrication des vêtements de protection ainsi qu'une description de leur comportement en déchirure. Quelques modèles empiriques développés pour modéliser la force de déchirure des textiles et textiles enduits seront également rapportés. Finalement, un aperçu général sur le vieillissement des matériaux polymères sera inclus à la fin de ce chapitre.

Le deuxième chapitre sera consacré au développement d'un critère pour calculer l'énergie de rupture des structures textiles. La démarche utilisée pour établir ce critère y sera aussi présentée. Par la suite, ce critère sera appliqué à l'étude de l'effet des caractéristiques des textiles sur l'énergie de rupture.

Dans le troisième chapitre, une modélisation physique de l'énergie de rupture des tissus sera présentée. Tout d'abord, les différentes propriétés mécaniques qui contribuent à la propagation de la fissure seront identifiées. Par la suite, les propriétés les plus influentes sur la déchirure seront retenues. Comme l'accent est mis sur la simplicité du modèle, une étude analytique basée sur des hypothèses a été employée pour élaborer un modèle de calcul de l'énergie de rupture.

Le quatrième chapitre abordera la déchirure des textiles enduits. Les mécanismes de déchirure de ces matériaux ainsi que leurs couches constituantes seront déterminés. En particulier, l'interaction entre le support textile et l'enduit sera mise en évidence. Pour apporter des informations nouvelles en ce qui a trait à ce sujet difficile, l'analyse du comportement en déchirure des textiles enduits par rapport à celui observé pour ses matériaux constitutifs sera réalisée. L'étude s'intéressera aussi à la contribution de l'adhésion du système textile/enduit.

Le cinquième chapitre sera consacré à l'étude de l'effet du vieillissement sur l'énergie de rupture des textiles enduits. L'objectif principal de ce chapitre est de développer une approche

prédictive de l'énergie de rupture à long terme. Ainsi, les mécanismes de dégradation par thermo-oxydation de ces matériaux seront mis en évidence.

Finalement, une conclusion et des perspectives nouvelles issues de cette recherche sont proposées.

CHAPITRE 1

REVUE DE LA LITTÉRATURE

1.1 Introduction

Dans ce chapitre, une description des matériaux de protection sera tout d'abord présentée. Ensuite, la déchirure des caoutchoucs, des textiles et des textiles enduits sera décrite en mettant en évidence les méthodes de déchirure, les mécanismes de propagation de la fissure, les différents paramètres influençant la déchirure et les différents modèles développés pour calculer la résistance à la déchirure. Nous terminerons par un rappel sur l'effet du vieillissement sur les propriétés mécaniques de matériaux.

1.2 Matériaux utilisés pour les vêtements de protection

Les vêtements de protection sont fabriqués en différents matériaux et selon différentes structures, en particulier les élastomères monolithiques, les textiles et les textiles enduits. Ces matériaux possèdent des propriétés mécaniques différentes. Ils sont utilisés dans diverses applications telles que les gants de protection, les vêtements de pompiers et les combinaisons de protection.

1.2.1 Élastomères

Les élastomères englobent des matériaux de même structure moléculaire et avec des propriétés mécaniques similaires mais qui ont des compositions chimiques différentes. Ces matériaux présentent une excellente élasticité. Ils sont constitués de longues chaînes moléculaires repliées sur elles-mêmes (enchevêtrées). Ceux qui sont les plus utilisés pour fabriquer des vêtements de protection sont le nitrile, le néoprène, et le caoutchouc naturel.

Un constituant majeur des élastomères est la charge de renfort. C'est une phase rigide introduite au sein du polymère (avant même la réticulation) pour, entre autres, améliorer les propriétés mécaniques du matériau. Généralement, il existe différents types de charges. On peut les classer en fonction de leur niveau renforçant :

- très peu renforçant : craie naturelle, talc (Kozak, et al. 2004);

- semi-renforçant: argiles (kaolins) (Helaly, et al. 1994), carbonates de calcium (étanchéité) (Zuiderduin, et al. 2003) et billes de verre;
- renforçant : principalement le noir de carbone (Tricas, et al. 2003) et la silice (Berriot, et al. 2002).

Les élastomères peuvent être répartis en deux familles (Thoma 2003).

Les élastomères vulcanisés, qui sont classés dans la famille des thermodurcissables. Ces matériaux sont mis en œuvre :

- Soit par voie solide : les matériaux sont soumis à un malaxage puis au moulage/vulcanisation d'une gomme. Ce procédé s'applique aux caoutchoucs naturels, aux nitriles, au polychloroprène ou néoprène, aux butyles, aux fluorocarbonés, aux silicones et aux polyuréthanes.
- Soit par voie liquide : les matériaux sont obtenus par mélange, coulée ou injection et réticulation. Les silicones et les polyuréthanes peuvent être mis en œuvre de cette façon.

Les élastomères thermoplastiques (TPE) s'obtiennent de la même manière que les polymères thermoplastiques rigides : par injection, extrusion ou compression. Nous retrouvons les familles et les applications suivantes : oléfiniques, co-polyesters, co-polyamides, élastomères polypropylènes et polyacétate de vinyle.

Exemples d'élastomères

De nombreux élastomères sont utilisés pour la fabrication et le revêtement des vêtements de protection. Les quatre matériaux qui ont fait l'objet d'une étude dans le cadre de cette thèse sont le nitrile, le polychloroprène, le caoutchouc naturel et le polyacétate de vinyle. Quelques informations à leur propos sont fournies dans les paragraphes suivants.

1.2.1.1 Nitrile

Le nitrile ou caoutchouc acrylonitrile butadiène est un copolymère de synthèse polyvalent (May-Lin 1958; Ward and Hadley 1993; Institute 2000) (Figure 1.1). Ce matériau constitue le matériau le plus important d'élastomères pour la fabrication des gants de protection surtout

ceux qui sont utilisés pour la protection contre les agresseurs mécaniques. Du point de vue chimique, il résiste à la plupart des produits chimiques, plus spécifiquement aux solvants forts et aux agents cytotoxiques. Les caoutchoucs de nitrile ont de bonnes propriétés physiques et elles sont supérieures à celles de la plupart des autres caoutchoucs (Ward and Hadley 1993; Institute 2000).

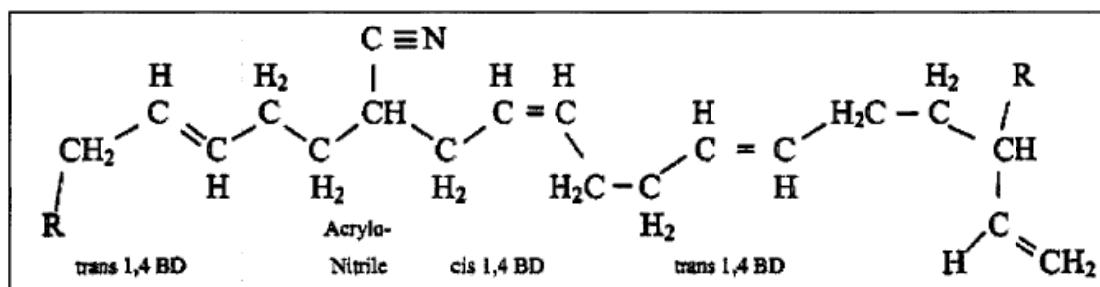


Figure 1.1 Structure chimique du Nitrile
Tirée de Ward and Hadley (1993)

1.2.1.2 Néoprène

Le polychloroprène est généralement vendu sous le nom Néoprène (Figure 1.2). C'est le premier élastomère synthétique, ou caoutchouc qui a eu un succès commercial (Lourdin and Couvrat 1999 ; Mardelle 2009). Ce matériau se caractérise par des bonnes propriétés mécaniques. En effet, le néoprène possède une haute résistance à la traction et au choc. Aussi, le néoprène a montré une meilleure résistance thermique ainsi qu'une bonne résistance aux variations environnementales. Ce type d'élastomère a une excellente résistance contre les solvants organiques, les huiles, les graisses et les produits pétrochimiques. Ce bon équilibre de propriétés permet à ce matériau d'être utilisé dans le domaine de la santé et sécurité de travail.

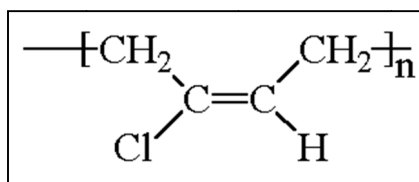


Figure 1.2 Structure chimique du Néoprène polyacétate de vinyle

Le polyacétate de vinyle est produit par polymérisation de l'acétate de vinyle (Figure 1.3). Il est utilisé dans une gamme de produits industriels, tels que des peintures, des adhésifs et des revêtements pour substrats souples, notamment les structures textiles (Calvarin 1994).

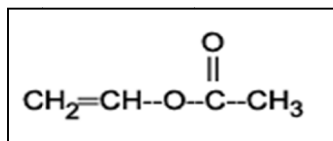


Figure 1.3 Structure chimique du monomère d'acétate de vinyle Matériaux textiles

1.2.1.3 Les fibres

Les fibres textiles trouvent aujourd'hui des applications dans des domaines de plus en plus variés. Elles sont utilisées dans les structures composites, les vêtements de protection et les géotextiles par exemple. L'origine de ces fibres est soit naturelle (fibre de coton, fibre de laine, filament de soie, etc.), artificielle (viscose, etc.), ou synthétique (polyester, polyamide, aramide, etc.). Certaines fibres synthétiques à haute performance par exemple peuvent être employées pour augmenter le niveau de sécurité offert par les vêtements de protection. Pour leur part, les fibres de coton contribuent à améliorer leur confort. Dans ce qui suit, nous allons présenter trois types de fibres utilisées pour fabriquer des vêtements de protection, notamment les gants de protection, et qui ont fait l'objet de recherches menées dans le cadre de cette thèse :

a. Fibres de coton

Le coton, constitué de cellulose, est utilisé dans la majorité de nos vêtements (Figure 1.4). Les fibres de coton possèdent un bon pouvoir absorbant. Elles présentent une souplesse élevée, avec un module d'Young entre 5,3 à 8 GPa. Les fibres sont vrillées, ce qui contribue à leur donner un taux d'allongement de 5 à 8% (Warner 1995).

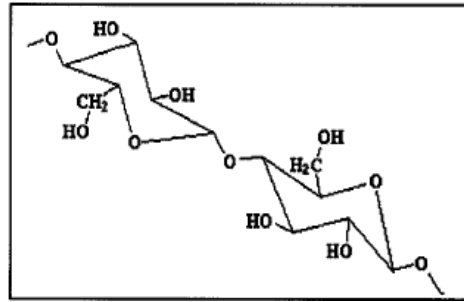


Figure 1.4 Structure chimique du coton
Tirée de Warner (1995)

b. Fibres de polyester

Les fibres de polyester ont une excellente résistance à l'oxydation (Hu and Yang 2000). Ces fibres montrent une meilleure résistance au blanchissement sévère que d'autres fibres textiles. Elles ont une haute résistance à la plupart des solvants organiques et hydrocarbures communs. Elles ont aussi une résistance à l'humidité élevée, grâce à leur faible absorption d'eau (0.5 %).

Les fibres de polyester présentent des excellentes propriétés mécaniques telles qu'une ténacité à la rupture et un module élastique élevés, une résilience élastique modérée, des bonnes propriétés de résistance à la chaleur, thermique et à la lumière. De plus, les tissus en fibres de polyester possèdent une bonne esthétique, des bonnes propriétés de lavage et d'usage, et sèchent rapidement. En plus, ces fibres sont difficilement inflammables, sauf lorsqu'elles sont mélangées avec des fibres cellulosiques tel que le coton.

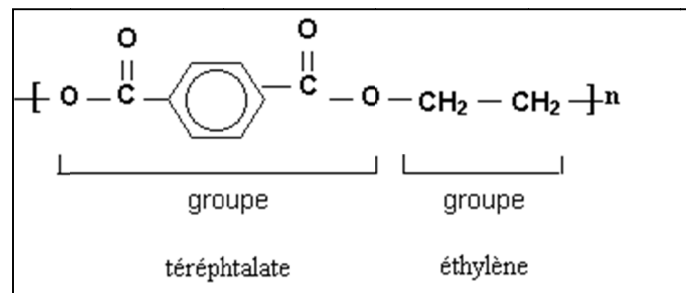


Figure 1.5 Structure chimique du PolyesterFibres de Kevlar®

Le poly-para-phénylène téréphtalamide est plus connu sous le nom commercial de Kevlar® (Dupont 2011) (Figure 1.6). Bien qu'il existe d'autres formes commerciales d'aramides, Kevlar® est la plus ancienne et la plus utilisée sur le marché. Les différentes macromolécules de « Kevlar® » sont liées grâce à des liaisons hydrogène (entre les hydrogènes portés par l'azote d'une chaîne avec les oxygènes d'une autre) (Arrieta et al. 2011; Dupont 2011). Le nombre élevé de ces liaisons confère aux fibres une grande résistance à la traction (haute ténacité). En outre, le Kevlar® est très cristallin, d'où sa solidité et sa résistance à la rupture. En revanche, cette cristallinité engendre une rupture fragile. Les fibres de Kevlar® sont sensibles au vieillissement aux UV (le changement de couleur, originellement jaune d'or et qui passe au marron sous l'effet des UV, est un indice intéressant). Le Kevlar® est aussi très fortement affecté par l'humidité (Arrieta et al. 2011). Plusieurs « versions » du Kevlar® ont été développées : notamment le K-29 et le K-49 (module d'élasticité double de celui du K-29, mais moindre résistance en flexion) (Dupont 2011).

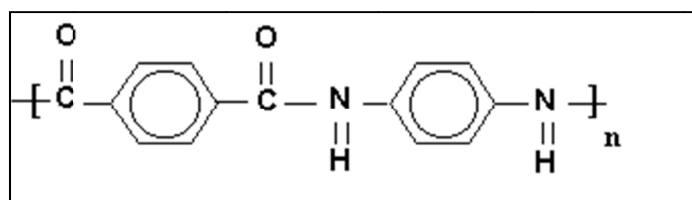


Figure 1.6 Structure chimique du Kevlar®

1.2.1.4 Différentes structures textiles




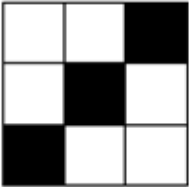

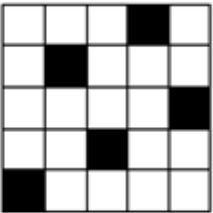
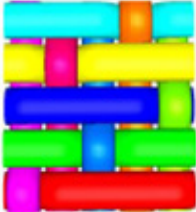
Il existe trois types de structures textiles: tissus, tricots et non-tissés. Leurs modes d'obtention, ainsi que leurs domaines d'application et leurs propriétés mécaniques sont différents. Par exemple, la plupart des gants de protection sont des tricots et des tricots enduits pour bénéficier de l'extensibilité de cette structure; les vêtements de pompiers sont des textiles tissés :

a. Tissu

Les tissus sont réalisés sur des métiers à tisser par entrelacement de fils, dans deux directions perpendiculaires (Gautier 1998). On appelle chaîne le fil placé dans le sens de la longueur du tissu, et trame celui qui est entraîné transversalement par la navette pour former le motif du tissage. La cohésion de la structure est assurée par la compensation des ondulations de ces deux fils. Aucun apport de résine ou d'enduction n'est nécessaire dans ce cas.

Le mode d'entrecroisement de ces fils est appelé armure. On distingue trois armures fondamentales pour les structures tissées: la toile, le sergé et le satin (Tableau 1.1) (Dridi 2010). Ces armures sont différenciées par le nombre de point de croisement des fils de chaîne et de trame par motif. L'armure toile donne au tissu une mobilité des fils très limitée au contraire de l'armure satin.

Tableau 1.1 Structures tissées
Motifs tirées de Dridi (2010)

Armure toile	Armure sergé	Armure satin
 <p>Motif répétitif</p>  <p>Mise en carte</p>  <p>Fils de chaîne</p> <p>Fil de trame</p>	 <p>Mise en carte</p>  <p>Motif répétitif</p>	 <p>Mise en carte</p>  <p>Motif répétitif</p>

b. Le tricot

Le tricot est une étoffe formée d'un fil disposé en mailles entrelacées les unes dans les autres. Il existe deux familles de tricots : les tricots à mailles cueillies et les tricots à mailles jetées (Figure 1.1) (Kawabata 1989). Un tricot à mailles cueillies (ou tricot trame) possède des mailles disposées dans le sens rangé et formées par un même fil (Figure 1.7a). Pour les tricots à mailles jetées (ou tricot « chaîne »), les mailles formées par un même fil n'appartiennent pas à une même rangée, ce qui leur confère la particularité d'être indémaillables (Figure 1.7b).

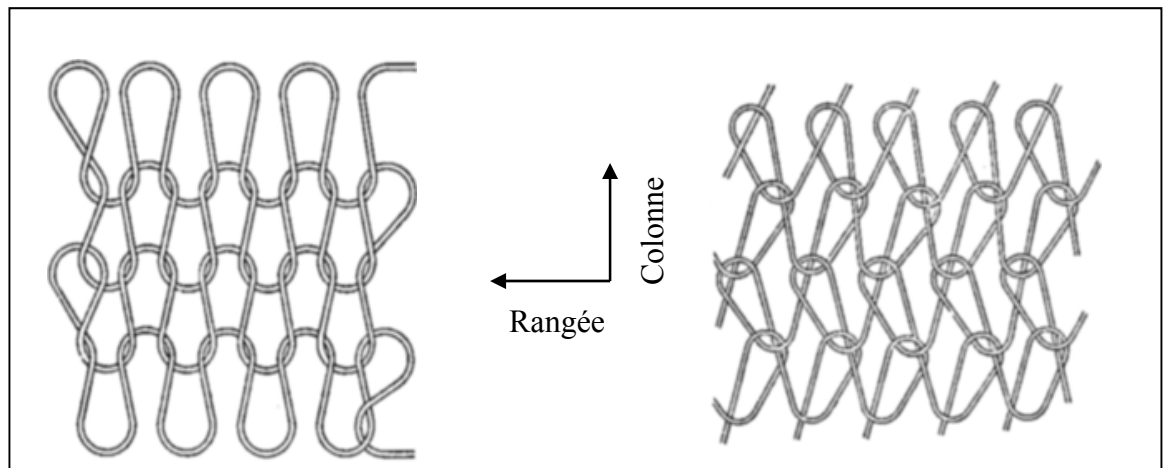


Figure 1.7 a) Les tricots à mailles cueillies et b) les tricots à mailles jetées
Tirée de Kawabata (1989)

c. Le non-tissé

Les non-tissés sont des nappes de filaments, des fibres discontinues ou des fils de bases, maintenus ensemble par un liant soluble. Ce sont des matériaux déformables, peu coûteux et quasi-isotropes (Figure 1.8) (Coste 2004).

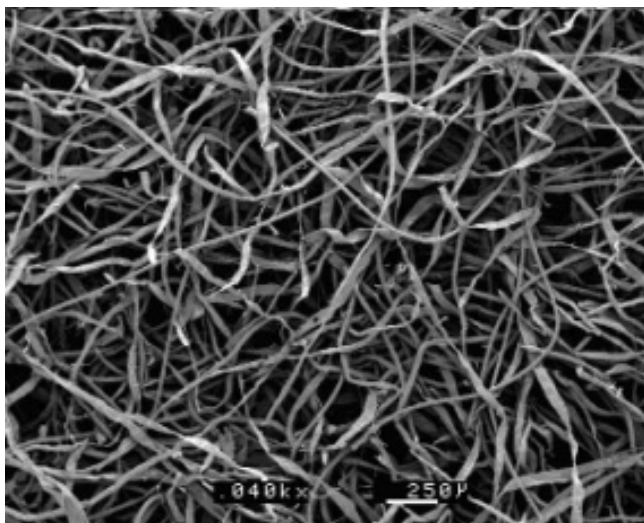


Figure 1.8 Textile non-tissé
Tirée de Coste (2004)

1.2.2 Textiles enduits

Les tissus enduits sont constitués d'un support textile laminé par une couche de polymère ou d'élastomère (Figure 1.9).



Figure 1.9 Photos de gants en enduit de polyuréthane
sur tricot de Dyneema/Polyamide

Le mode d'enduction diffère d'une application à une autre. À titre d'exemple, les gants de protection enduits sont obtenus par trempage (Figure 1.10), alors que la couche de revêtement

des vêtements de pompiers est déposée par un système d'enduction ou par un système de revêtement au couteau.

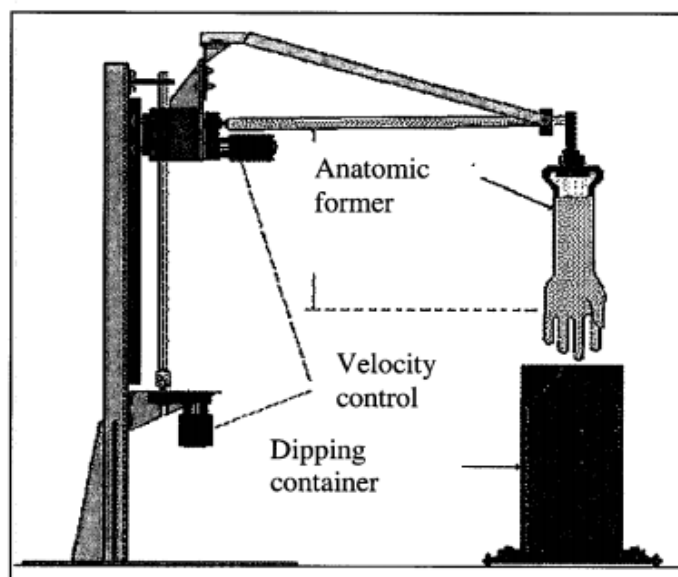


Figure 1.10 Processus de fabrication des gants de protection enduits
Tirée de Harrabi (2009)

Les matériaux utilisés pour faire l'enduction du textile sont à base de polychlorure de vinyle, de polyuréthane, d'acrylique et d'élastomères naturels ou synthétiques. Dans certains cas, l'ajout de plastifiants, de charges minérales ou d'autres additifs permet d'adapter le produit pour une utilisation spécifique. Grâce à sa structure, cette famille de textile a de larges applications. Par exemple, les textiles enduits sont largement présents dans plusieurs domaines tels que les vêtements de protection, les membranes flexibles pour des structures civiles, les sacs de protection gonflables, les géotextiles et les tissus industriels. Dans le cas des gants de protection, les structures textiles sont généralement tissées ou tricotées, et laminées par une couche de polymère ou d'élastomère. Ces structures sont caractérisées par une géométrie très complexe. En particulier, l'interface textile-enduit rend difficile l'étude de leurs propriétés mécaniques.

1.3 Déchirure des matériaux de protection

L'étude de la déchirure des matériaux de vêtements de protection favorise, depuis son origine, la production de vêtements plus sécuritaires. À titre d'application, les gants de protection s'utilisent dans le domaine médical (élastomères monolithiques) et dans l'industrie automobile (textile et textile enduit). Dans cette section, nous commencerons par une brève étude bibliographique sur la déchirure des élastomères. Puis, de façon détaillée, nous étudierons la déchirure des textiles. Enfin, nous terminerons cette revue de la littérature par les travaux de déchirure des textiles enduits.

1.3.1 Déchirure des élastomères

À la fin de la Seconde Guerre mondiale, plusieurs chercheurs ont commencé à travailler sur les phénomènes de la déchirure, plus particulièrement sur les caoutchoucs naturels afin de déterminer les paramètres de ceux-ci. Rivlin et Thomas (1953) ont revisité les travaux de Griffith (1920) et ont établi, pour la première fois, dans le cas des élastomères, un critère de rupture par la notion de la force de déchirure.

1.3.1.1 Différentes méthodes de tests de déchirure

D'après les études de Rivlin et Thomas (1953), il existe cinq types d'éprouvettes principaux qui permettent la réalisation des essais de déchirure afin d'estimer le comportement en déchirure des élastomères (Figure 1.11) (Martin 1998) :

- éprouvette lanière «*Single edge crack test piece*»;
- éprouvette de cisaillement pure «*Pure-shear test piece*»;
- éprouvette d'une fente de déchirure «*Split tear test piece*»;
- éprouvette d'un angle de déchirure «*Angle tear test piece*»;
- éprouvette de déchirure pantalon «*Trouser-tear*».

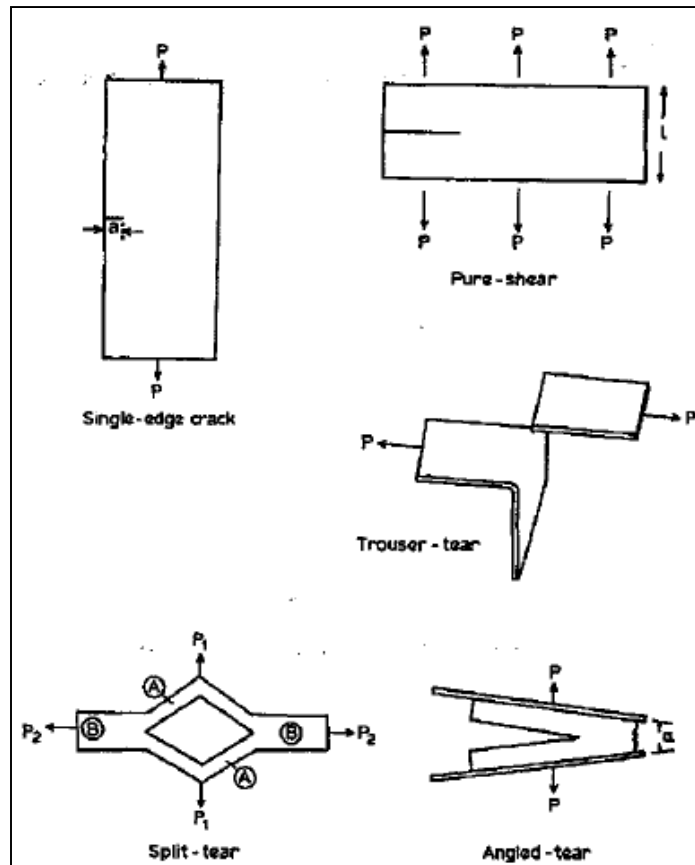


Figure 1.11 Les cinq éprouvettes les plus courantes pour étudier la déchirure des élastomères
Tirée de Martin (1998)

1.3.1.2 Mécanismes de déchirure

Greensmith et Thomas (1955) ont présenté les premiers résultats expérimentaux de la mesure de la force de déchirure des caoutchoucs chargés et non-chargés en se servant de la vitesse de propagation de la fissure comme variable d'étude. Ils ont montré clairement dans leurs travaux qu'il existe deux types de propagation :

- une propagation stationnaire («*Steady*») ;
- une propagation saccadée («*Stick-Slip*») : Ici, la fissure avance par saccades, de points d'arrêt en points d'arrêt sous la forme de courtes propagations très rapides. La force mesurée fluctue entre une valeur maximale atteinte lentement à partir d'un point d'arrêt et

une valeur minimale atteinte très rapidement pendant la propagation rapide jusqu'au nouveau point d'arrêt.

Lorsque la propagation de la fissure dans le matériau est stationnaire, la valeur exacte de la force de déchirure est facile à identifier. Mais, dans le cas d'une propagation «*stick-slip*», la force fluctue entre un maximum et un minimum. Quelle valeur de la force de déchirure doit-on alors choisir ? Greensmith et Thomas (1955) ont utilisé la moyenne pour déterminer la force de déchirure. Il est à noter que les essais de déchirure des élastomères avec des charges peu renforçantes ne semblent pas permettre d'observer clairement le phénomène de «*stick-slip*» (Greensmith and Thomas 1955), alors que dans la déchirure des matériaux chargés par du noir de carbone, ce groupe de recherche parle plutôt de «*Knotty tearing*», ou propagation en épine.

Gdoutos et *al.* ont présenté dans (Gdoutos, et al. 2003) des résultats d'une étude du phénomène «*stick-slip*» réalisée pour des caoutchoucs vulcanisés chargés. Ils ont modifié des éprouvettes pantalon soumises en collant des feuilles de cuivre de part et d'autre du trajet de la propagation droite de la fissure. Cette méthodologie oblige la fissure à se propager d'une manière droite ou stationnaire. Dans le cas non contraint, c'est à dire sans les guides en cuivre, la fissure se propageait en dents de scie. Dans ces conditions, la force de déchirure fluctuait beaucoup. Plus les guides en cuivre étaient rapprochés les uns des autres, plus les dents de scie étaient petites au sommet de la fissure. La propagation devenait stationnaire quand l'écartement des guides était quasi-nul. Les résultats montrent que la force de déchirure décroît quand l'écartement des guides en cuivre tend vers zéro.

Le phénomène «*stick-slip*» s'accompagne du phénomène de cavitation qui est un phénomène macroscopique produit lors de la propagation de la fissure dans les élastomères. Dans ce cas, ces matériaux se comportent comme des fluides. Par des essais de rupture, Gent et Lindley (1959) ont montré que la rupture des éprouvettes est due à la formation de bulles.

Une modélisation de mécanisme de rupture beaucoup plus complet a été proposée par Kadir et Thomas (1981). Ils expliquent le passage d'une propagation saccadée à une propagation stationnaire par la transition entre un mode de rupture par cavitation à un mode de rupture

fragile. Si la vitesse de la propagation de la fissure est importante, les chaînes en tête de fissure sont sollicitées à des vitesses très élevées, et par conséquent sont figées dans leur état vitreux. En revanche, si la vitesse de propagation est faible, il devient possible que ces chaînes restent dans leur état caoutchouteux et que la propagation de la fissure soit régie par la cavitation.

1.3.1.3 Facteurs influençant la déchirure des élastomères

Les parties précédentes présentent les mécanismes de déchirure des élastomères ainsi que les différentes méthodes de tests de déchirure. Or, il paraît essentiel de présenter aussi les différents facteurs influençant la déchirure des élastomères.

Kadir et Thomas (1981) montrent, dans le cas des caoutchoucs non chargés, que la courbe de l'évolution de la force de déchirure avec la vitesse de sollicitation comporte trois régions:

1. À vitesse élevée, la propagation est stationnaire. La surface de fissuration obtenue est alors lisse;
2. À vitesse moyenne, la propagation est en « *stick-slip* ». La surface de fissuration est rugueuse. Les rugosités sont visibles à l'œil nu et sont autant de petites stries perpendiculaires à la direction de la propagation de la fissure. On peut même observer entre deux stries une portion de surface lisse, associée à une petite propagation stationnaire;
3. À faible vitesse, la propagation redevient stationnaire. Une observation au microscope montre cependant que la surface de fissuration est encore constituée de microrugosités.

Dans ce même contexte, des tests de déchirure des élastomères ont montré que l'énergie de rupture du matériau varie avec la vitesse de sollicitation. En effet, une augmentation de la vitesse engendre une augmentation importante de l'énergie de rupture (Tsunoda et al. 2000; Gdoutos et al. 2003; Zuiderduin et al. 2003).

Tsunoda a étudié aussi l'effet de l'épaisseur de l'éprouvette sur la résistance à la déchirure. Les résultats obtenus ont montré clairement qu'à faible vitesse de sollicitation l'épaisseur de l'éprouvette influe sur le comportement en déchirure du matériau, alors qu'à vitesse élevée

(supérieure à 450 mm/min), cette épaisseur n'a aucun effet sur la résistance à la déchirure (Tsunoda et al. 2000).

Selon l'article de Mazich et *al.* (1989), la déformation à la rupture du matériau influe sur son comportement en déchirure. En effet, quelle que soit l'épaisseur du matériau, l'énergie de rupture augmente en fonction de la déformation du matériau.

1.3.1.4 Modèles de calcul de la résistance à la déchirure

En se basant sur les travaux de Griffith (1920), Rivlin et Thomas (1953) ont montré que pour les élastomères, la variation de l'énergie élastique obtenue lors de la propagation de la fissure doit être égale à l'énergie nécessaire pour faire avancer la fissure dans le matériau, sans négliger tous les phénomènes dissipatifs produits lors de la rupture des élastomères (viscoélasticité, endommagement, etc.). Ils ont défini l'énergie de rupture selon la configuration pantalon comme la variation de l'énergie élastique stockée U_{Total} par unité de longueur de déchirure c obtenue à un déplacement l :

$$T = -\frac{1}{t} \left(\frac{\partial U_{Total}}{\partial c} \right)_l \quad (1.1)$$

Où t est l'épaisseur du matériau.

Le premier calcul de l'énergie de rupture T pour les éprouvettes de configuration pantalon est dû à Rivlin et Thomas (1953). Ces derniers montrent qu'une bonne estimation de T est donnée par :

$$T = 2 \frac{\lambda F}{t} - 2bw \quad (1.2)$$

En utilisant comme principales variables:

F = Force mesurée sur une jambe de l'éprouvette;

λ = extension des jambes = l/l_0 ;

t = épaisseur de l'éprouvette;

b = largeur de jambe;

w = la densité d'énergie de déformation des jambes de l'éprouvette.

Cette formule est simplifiée au moyen des hypothèses suivantes :

- Comportement élastique ($w = 0$) ;
- Une faible déformation des jambes de l'éprouvette ($\lambda = 1$).

L'expression finale obtenue est la suivante :

$$T = 2 \frac{F}{t} \quad (1.3)$$

La résistance à la déchirure obtenue en utilisant la méthode de déchirure « *pure shear test piece* », ou éprouvette PS a été exprimée en fonction de la densité d'énergie élastique stockée W_0 et de la largeur initiale l_0 de l'éprouvette selon la relation :

$$T = W_0 l_0 \quad (1.4)$$

Selon Kadir et Thomas (1981), l'énergie élastique W_0 est égale à l'aire sous la courbe de décharge des essais de traction depuis l'état naturel.

Les résultats obtenus par les essais d'éprouvettes PS sont souvent comparés à ceux qui sont obtenus par les essais réalisés avec des éprouvettes pantalons. Par exemple, Gent et Kim (1978) ont comparé la valeur de la force de déchirure obtenue par les deux configurations. Ils ont trouvé que :

$$T_{pantalon} = 2T_{PS}$$

D'autres formes ont été utilisées pour calculer la résistance de déchirure des élastomères. Une synthèse bibliographique présentant tous les modèles de calcul de la force de déchirure peut être trouvée dans (Martin 1998). Elle inclut :

- Éprouvette lanière « *Single edge crack test piece* »:

$$T = 2K(\lambda)W_0(\lambda), K(\lambda) = \frac{\pi}{\sqrt{\lambda}} \quad (1.6)$$

- Éprouvette de déchirure fendue «*Split tear test piece*»:

$$T = \frac{\lambda_A^2 + \lambda_B^2}{2t} \left(\sqrt{P_1^2 + P_2^2} - P_2 \right) \quad (1.7)$$

λ_A (resp λ_B) est l'extension de la branche A (resp B)

- Éprouvette de déchirure à angle «*Angle tear test piece*»:

$$T = 2 \frac{P}{t} \sin \frac{\alpha}{2} \quad (1.8)$$

1.3.2 Déchirure des matériaux textiles

Depuis les années 1940, plusieurs chercheurs ont commencé à s'intéresser à la déchirure des textiles. À cette époque, l'étude microscopique de la déchirure de ces matériaux n'était pas encore établie. Cinq ans plus tard, Krook et Fox (1945) ont proposé le premier modèle empirique macroscopique de déchirure des structures textiles. Puis récemment, Scelzo et *al.* (1994a), ont étudié les interactions des fils au cours de la propagation de la fissure à l'échelle microscopique. Ils semblent d'ailleurs être parmi les premiers à penser que l'étude de la déchirure doit être faite en regardant à une échelle locale près de la zone de la propagation de la fissure.

1.3.2.1 Différentes méthodes de tests de déchirure

Plusieurs méthodes ont été développées pour étudier la déchirure des structures textiles (Figure 1.12). Essentiellement, il y a trois méthodes suggérées pour déterminer la résistance de déchirure (Scelzo et al. 1994a) :

- essai de déchirure simple (Uni-axial) (c);
- essai de déchirure trapèze (f);
- essai de déchirure pantalon (d).

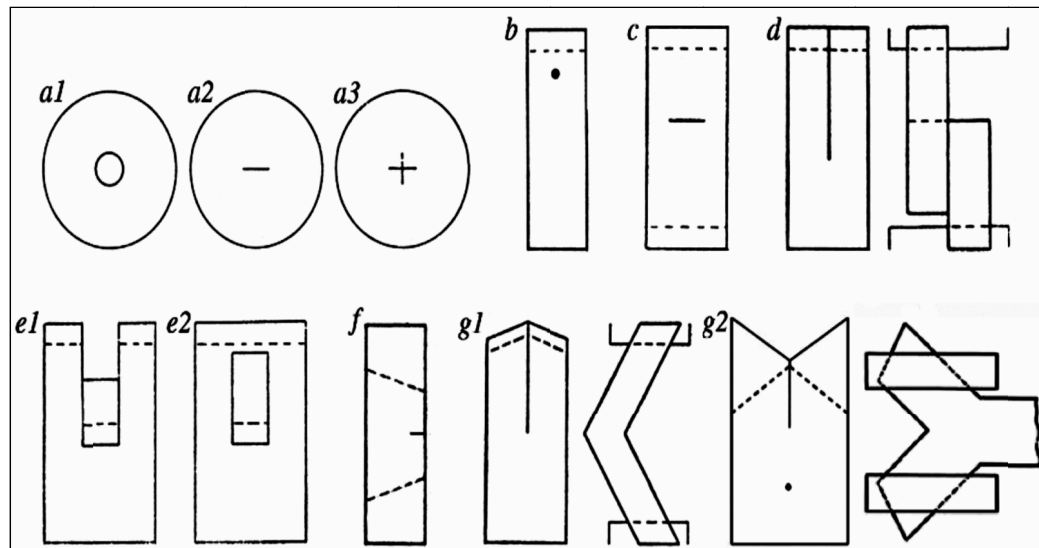


Figure 1.12 Différentes méthodes de déchirure des textiles
Tirée de Witkowska et Frydrych (2008)

1.3.2.2 Mécanismes de déchirure

Pour mettre en évidence les différents mécanismes de déchirure des textiles, l'échantillon de forme pantalon est le plus utilisé, parce qu'il permet d'examiner en détail la propagation de la fissure dans le matériau, notamment l'interaction entre les fils de chaîne et de trame.

La déchirure par la configuration pantalon est décrite par plusieurs auteurs (Krook and Fox 1945; Teixeira et al. 1955; Hamkins and Backer 1980; Scelzo et al. 1994a). Ces derniers ont montré qu'à la suite d'une sollicitation de l'échantillon, les fils longitudinaux sont étirés et commencent à glisser le long des fils transversaux, formant une zone dénommée zone *Del* dans laquelle il n'y a aucun fil longitudinal (Figure 1.13).

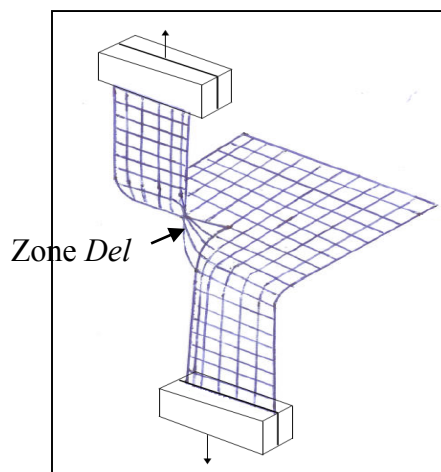


Figure 1.13 Configuration de la déchirure pantalon:
Formation de la zone *Del*

À mesure que la force de déchirure augmente, les fils longitudinaux continuent à glisser et à s'empiler sur les bords de la zone *Del*, ce qui augmente graduellement sa taille et génère un grand nombre de points de friction de contact dans une petite zone de tissu. Dès que les fils longitudinaux s'immobilisent sur les bords de la zone *Del*, la force est transférée progressivement aux fils transversaux. Ensuite, ces fils transversaux s'empilent les uns sur les autres sous l'effet de la tension subie (Teixeira et al. 1955). À partir d'une valeur maximale de la force de déchirure, certains fils transversaux cassent, relâchant les fils longitudinaux, qui repartent en glissement stationnaire pour former la nouvelle zone *Del* et ainsi de suite jusqu'à la déchirure totale de l'échantillon.

Le cycle de déchirure du matériau textile est généralement discontinu. Cette discontinuité a lieu lors de la rupture des fils transversaux, la zone *Del* se déplaçant par sauts le long de la ligne de déchirure en se reformant. Lors de la formation de cette nouvelle zone *Del*, la force de déchirure est minimale et les fils transversaux sont moins tendus (Teixeira et al. 1955).

1.3.2.3 Résistance à la déchirure

La résistance à la déchirure est utilisée pour l'évaluation des performances des textiles utilisés en protection. La force de déchirure des structures textiles varie entre une valeur maximale et une valeur minimale tout au long de la propagation de la fissure. Cette variation s'explique par l'effet des mécanismes de déchirure qui sont décrits au préalable.

Scelzo et *al.* (Scelzo et al. 1994a) ont décrit trois méthodes standard pour mesurer la force de déchirure:

- la force de déchirure est égale à la moyenne de cinq maxima obtenus sur cinq intervalles successifs, chacun de longueur de 1,3cm, dans la courbe de déchirure force-déplacement ;
- la force de déchirure est égale à la moyenne des pics jusqu'à 0,6 cm de la déchirure ;
- le calcul de la résistance à la déchirure est fondé sur la détermination de l'aire sous la courbe force-déplacement (ASTM 1989).

Pendant un essai de déchirure pantalon, Schwartz et *al.* (1982) ont caractérisé la résistance à la déchirure à la fois par la mesure de la force maximale et par le calcul du travail de déchirure qui est égal à l'aire sous la courbe force-déplacement (Figure 1.14).

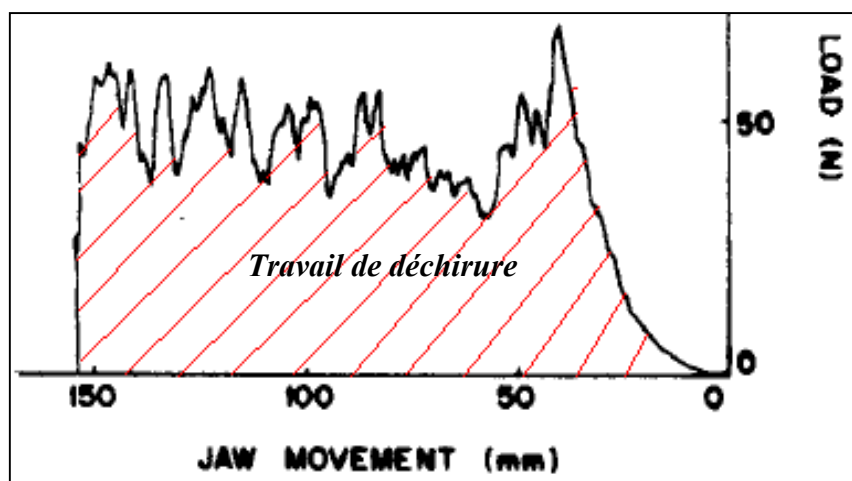


Figure 1.14 Courbe de la force de déchirure des tissus,
issue d'un essai de déchirure pantalon
Tirée de Schwartz et *al.* (1982)

De même, pendant un essai de déchirure pantalon, Teixeira et *al.* (Teixeira et al. 1955) ont montré que la résistance de déchirure peut être obtenue par le calcul du travail moyen :

$$E = \frac{P_u + P_m}{2} \times \Delta L \quad (1.9)$$

Où P_u désigne la force maximale, P_m désigne la force minimale et ΔL désigne le déplacement (Figure 1.15).

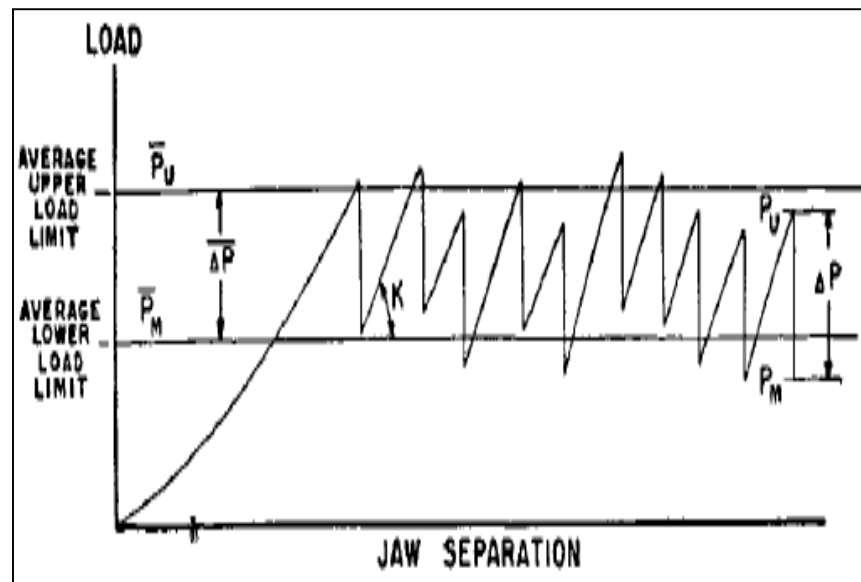


Figure 1.15 Courbe de la force de déchirure des tissus en coton,
issue d'un essai de déchirure pantalon
Tirée de Teixeira et *al.* (1955)

Aussi Krook et Fox (1945) ont montré que l'utilisation de la moyenne des maxima de la force de déchirure est préférable. En effet, la déchirure des tissus se produit à ces maxima. D'après eux, la valeur moyenne des maxima est la plus proche de la force réelle de déchirure. Ils ont également indiqué qu'on ne peut pas considérer la valeur moyenne des minima parce qu'elle caractérise uniquement le glissement et la friction des fils. Ces auteurs ont aussi proposé d'utiliser le calcul du travail pour caractériser la résistance de déchirure. Ce travail correspond uniquement à la surface A (Figure 1.16). Ils ont indiqué que le secteur CEF représente

seulement l'énergie nécessaire pour étirer le tissu au point de déchirure. Cette partie ne doit donc pas être considérée dans le calcul du travail moyen de déchirure.

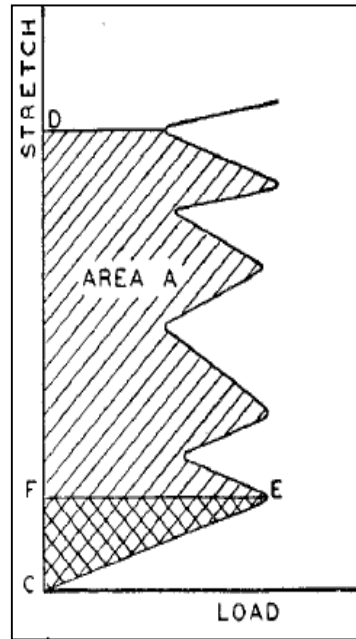


Figure 1.16 Courbe de la force de déchirure des tissus en coton,
issue d'un essai de déchirure pantalon
Tirée de Krook et Fox (1945)

1.3.2.4 Modèles prédictifs de résistance à la déchirure des tissus

La modélisation de la résistance à la déchirure a fait l'objet de plusieurs études. En effet, différentes tentatives de modélisation ont été faites afin d'exprimer la force de déchirure en fonction des propriétés mécaniques du textile ainsi que leurs différentes caractéristiques (Hager et al. 1947; Teixeira et al. 1955; Taylor 1959; Seo 1989; Scelzo et al. 1994b).

Par le biais de la méthode de déchirure trapèze, Hager et *al.* (1947) ont exprimé la force de déchirure en fonction de la géométrie de l'échantillon et des propriétés mécaniques des tissus. Leur modèle est présenté par la formule suivante :

$$F = \frac{ghL_0}{2Cot\alpha} f(E) \quad (1.10)$$

En utilisant les variables suivantes :

- $f(E) = E(2 + E) - 2(1 + E)\ln(1 + E)$;
- E: L'élongation du matériau à la rupture;
- g: Module d'Young;
- h: Épaisseur du matériau;
- L_0 : Longueur entre les deux côtés de trapèze;
- α : Angle de trapèze.

En outre, des études antérieures ont proposé des modèles analytiques pour modéliser les mécanismes de déchirure des tissus. Par exemple, Teixeira et *al.* (1955) ont proposé un modèle formé par un ensemble de ressorts (Figure 1.17). Chaque ressort désigne un module qui peut être déterminé à partir de la courbe de la force de déchirure. Chaque module caractérise le comportement mécanique d'une zone de l'échantillon lors de la propagation de la fissure.

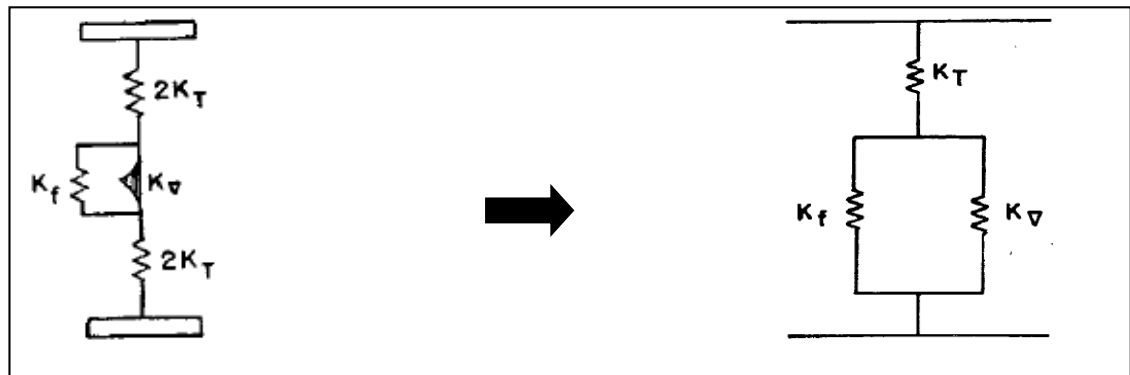


Figure 1.17 Modélisation de la résistance à la déchirure des tissus
Tirée de Teixeira et *al.* (1955)

En utilisant les variables suivantes :

- K_T : Module des languettes d'attache de l'échantillon pantalon;
- K_{∇} : Module de la zone « Del » ;
- K_f : Module du matériau en amont de la zone *Del*.

Un modèle relativement simple a été développé par Taylor (1959). Sur la base d'un raisonnement physique, l'auteur note que la force de déchirure T des tissus doit inclure la contribution de la force à la rupture d'un fil f ainsi que la force de glissement d'un fil f_s , en plus des principales caractéristiques du tissu. Taylor a donc proposé l'expression suivante pour la force de déchirure :

$$T = f \left(Snt \frac{f}{f_s} + 2 \right)$$

Où t est la densité des fils, S est l'espacement entre deux fils et n est le nombre de points de croisement des fils traversés pour mesurer la force de glissement.

Ensuite, Seo (1989) a développé un modèle de calcul de la force de déchirure des textiles basé sur celui de Taylor. Son modèle a pris en considération la déformation du matériau sans tenir en compte de la force de glissement des fils :

$$T_R = \left[\frac{\left(\frac{p - D \sin \theta}{\cos \theta} + D\theta \right) \epsilon_{YB}}{(e^{\mu 2\theta} - 1) p \tan \alpha} + 1 \right] \frac{f}{2}$$

En utilisant les variables suivantes :

- p : Espacement entre les fils;
- θ : Angle de contact dans les nœuds;
- μ : Coefficient de frottement;
- α : Angle de sommet de la zone de forme *Del*;
- D : la somme des diamètres des fils de chaîne et de trame;
- $1 - D\theta$: La section droite d'un fil ;
- ϵ_{YB} : La déformation à la rupture d'un fil.

Finalement, le modèle de Scélzo et *al.* (Scelzo, Backer et al. 1994b) est basé sur celui de Teixeira et *al.* (Teixeira, Latt et al. 1955). Il est obtenu en émettant quelques hypothèses afin

de simplifier les mécanismes de la propagation de la fissure. En particulier, les deux languettes d'attache de l'échantillon pantalon sont considérées comme rigides et la contrainte dans le matériau non déchiré (devant la zone *Del*) est prise nulle. Seuls les fils qui se trouvent dans la zone *Del* soutiennent la charge (Figure 1.18).

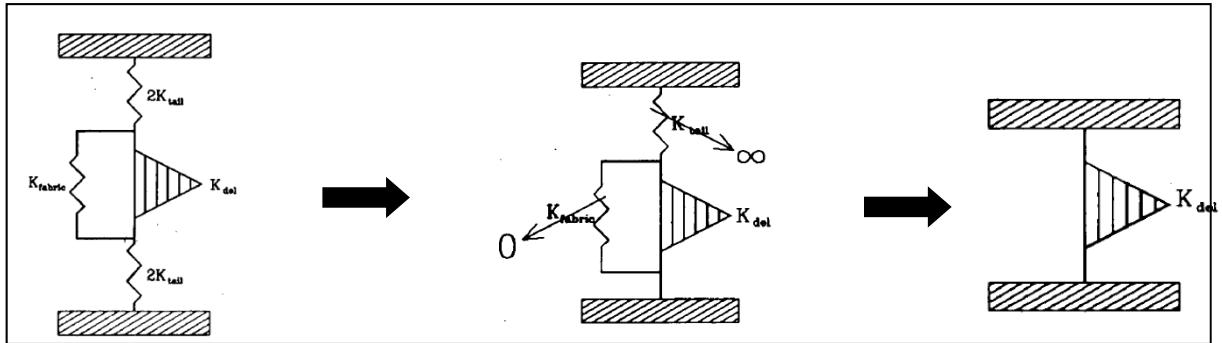


Figure 1.18 Modélisation de la déchirure des tissus
Tirée de Scelzo et *al.* (1994b)

Par la suite, Scelzo et *al.* (1994b) ont détaillé les mécanismes responsables à la déchirure. Ils ont montré qu'il y a uniquement trois principaux mécanismes responsables de la propagation de la fissure. Le premier mécanisme est le glissement des fils dans le tissu. Ce mécanisme est pris en compte soit par le biais du module de glissement (Scelzo et *al.* 1994a), soit par la force de glissement (Taylor 1959; Kirkwood et *al.* 2004). Les mécanismes de déchirure contiennent aussi l'empilement des fils (*jamming*). Ce mécanisme est observé juste avant la rupture des fils. Le comportement élastique en traction d'un fil constitue le troisième mécanisme. La zone *Del* peut donc être modélisée par trois modules qui sont déterminés expérimentalement selon le schéma illustré à la Figure 1.19.

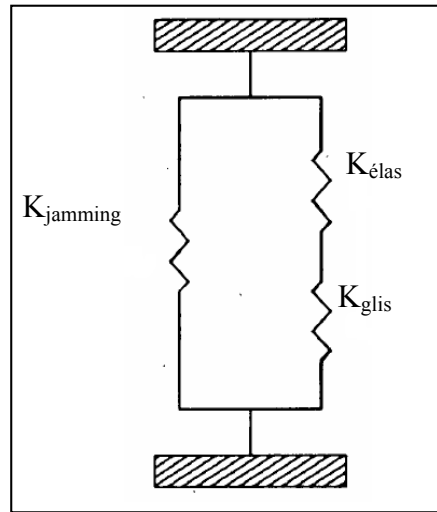


Figure 1.19 Modèle simplifié
Tirée de Scelzo et *al.* (1994b)

À partir de ce modèle rhéologique simplifié, Scelzo a proposé une formulation empirique pour calculer la force de déchirure. Il a multiplié la combinaison de ces trois modules $t(y)$ par le déplacement. L'expression finale du calcul de la force nécessaire pour déchirer y fils est la suivante :

$$f(y) = \frac{t(y)[d - d_{\min}(y)]}{2} \quad (1.13)$$

Avec :

- $t(y) = K(y) + K_{\text{jamming}}$ et $\frac{1}{K(y)} = \frac{1}{K_{\text{élas}}} + \frac{1}{K_{\text{gliss}}}$ (1.14)
- d : déplacement total de la partie mobile de la machine;
- $d_{\min}(y)$: déplacement minimal pour mettre en charge y fils de languettes d'attache de l'échantillon pantalon.

Tous ces travaux ont permis d'identifier les différents mécanismes de déchirure. Cependant, les modèles proposés pour le comportement en déchirure du textile ne semblent pas capables de donner accès à la valeur réelle de la résistance à la déchirure. En effet, ces modèles négligent la surface de rupture. Or, dans le cas de la déchirure des élastomères, la résistance à

la déchirure est caractérisée par le calcul de l'énergie. Celle-ci est basée sur la théorie de la mécanique de la rupture qui prend en compte la longueur déchirée (Rivlin and Thomas 1953). Ce travail vise donc à proposer un modèle du calcul de l'énergie de rupture pour les tissus.

1.3.2.5 Facteurs influençant la résistance à la déchirure

Comme il a été cité auparavant, la déchirure des structures textiles implique différents mécanismes. Quelles que soient les méthodes d'essais et les conditions expérimentales, la majorité des auteurs s'accorde à dire que la propagation de la fissure dans les tissus est contrôlée principalement par le type de l'armure, la densité des fils et les caractéristiques de ces fils.

1.3.2.5.1 Effet de l'armure

Teixeira et *al.* (1955) ont constaté en utilisant la méthode de déchirure pantalon que le type de l'armure influe sur la force de déchirure des tissus. Les armures testées étaient de type sergé et toile. Ces auteurs ont indiqué que l'armure qui présente moins de points de croisement des fils de chaîne et de trame par motif est la plus résistante à la déchirure quel que soit le type des fils constitutifs. Comme l'armure sergé comporte moins de points de croisement, elle présente, ainsi, la force de déchirure la plus élevée (Figure 1.20). Ce résultat est expliqué par le fait que, s'il existe moins de points de croisement par motif dans le tissu, il est alors plus facile pour les fils de glisser les uns sur les autres, ce qui réduit la force de friction entre les fils. Par conséquent, il y a de plus des fils transversaux dans la zone *Del*, qui vont supporter la force de déchirure, ce qui augmente la résistance à la déchirure.

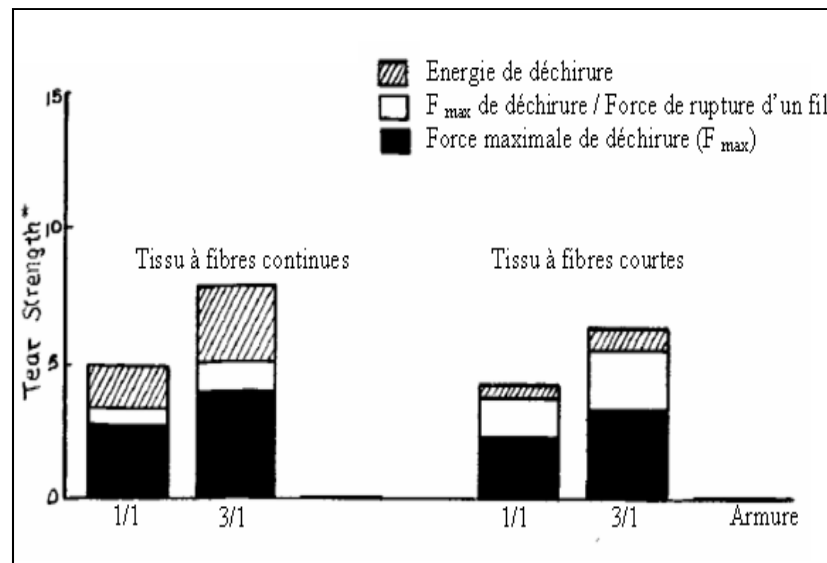


Figure 1.20 Effet du type de l'armure sur la variation de la force de déchirure : 1/1 : Armure toile - 3/1 : Armure de sergé
Tirée de Teixeira et *al.* (1955)

1.3.2.5.2 Effet de la densité des fils

L'effet de la densité des fils sur le comportement à la déchirure a été étudié par certains auteurs. Teixeira et *al.* (1955) ont montré que la densité des fils influe sur la force de déchirure du tissu. Plus particulièrement, ils ont montré à l'aide d'essais de déchirure pantalon que plus le nombre de fils est faible, plus grande est la force de déchirure, quels que soient le type de l'armure, la direction de la déchirure (chaîne ou trame) et le type de fils.

Scelzo et *al.* (1994a) ont confirmé également les résultats de Teixeira et *al.* (1955). En effet, ils ont montré que si la densité des fils est faible, leur mobilité dans la structure est plus facile. Ainsi, la force de friction des fils entre eux est réduite et le nombre de fils transversaux soutenant la charge augmente.

Pour expliquer plus en détail l'influence de la densité des fils sur la force de déchirure, Scelzo et *al.* (1994a) présentent une comparaison au niveau de la zone de déchirure entre deux tissus de densités des fils différentes. Suite aux essais de déchirures pantalon, ils ont observé que le tissu le moins dense présente une forte distorsion des fils près de la zone *Del*, il constitue donc le matériau le plus résistant à la déchirure (Figure 1.21). Par contre, la propagation de la fissure pour le tissu le plus dense semble stationnaire avec une taille de la zone *Del* plus petite.

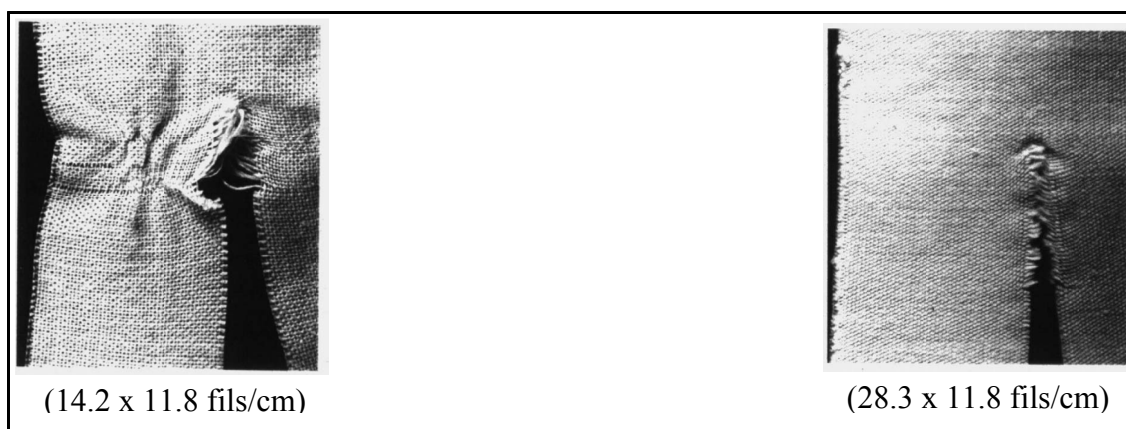


Figure 1.21 Effet de la densité des fils sur la propagation de la fissure dans des structures textiles
Tirée de Scelzo et *al.* (1994a)

1.3.2.5.3 Effet des caractéristiques des fils

Les fils textiles sont composés par un ensemble de fibres continues ou de fibres courtes torsadées selon différentes techniques.

Lord et Stuckey (1986) ont testé des structures textiles faites de fils à fibres courtes afin de mettre en évidence l'influence de la torsion des fils sur la force de déchirure. Les résultats obtenus montrent que plus les fils sont torsadés, plus la force de déchirure est importante (Selling and Bok 1968; Lord and Stuckey 1986) (Figure 1.22). En outre, cette influence est devenue plus significative et plus importante avec les tissus de faible densité des fils.

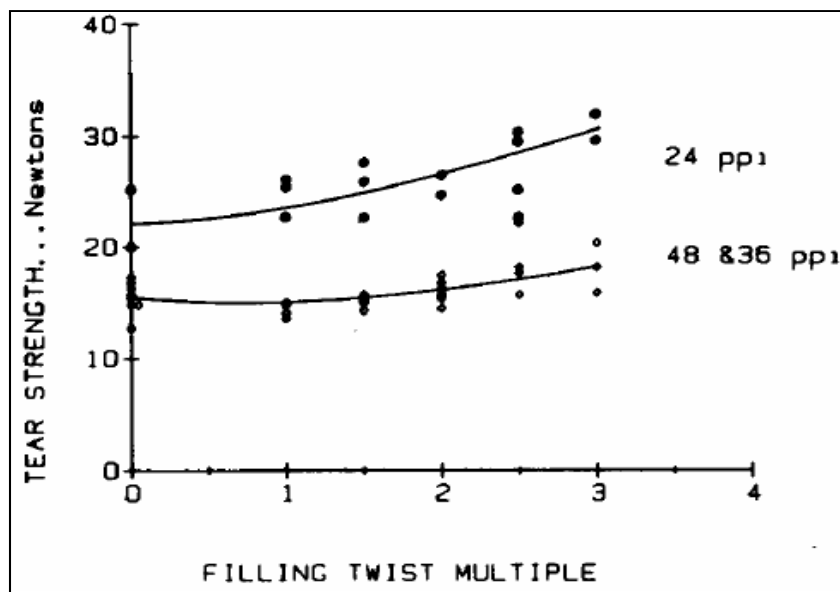


Figure 1.22 Effet de la torsion des fils sur la force de déchirure des tissus
Tirée de Lord et Stuckey (1986)

Cependant, Teixeira et *al.* (1955) ont montré que ce résultat n'est pas toujours vrai. Selon ces auteurs, la force de déchirure ne varie pas d'une manière systématique avec la torsion des fils. Par ailleurs, ils ont déterminé des valeurs optimales de la torsion des fils qui peuvent donner une bonne résistance à la déchirure du tissu.

La longueur des fibres est une caractéristique fondamentale des tissus. La résistance à la déchirure dépend aussi de cette caractéristique (Teixeira et *al.* 1955). Les matériaux textiles faits de fils à fibres continues sont plus résistants en déchirure que ceux faits de fils à fibres courtes. Cette observation s'explique par la résistance en traction des fils qui est plus élevée pour les fils à fibres continues. Cependant, ce résultat dépend toujours de la valeur de la torsion des fils.

1.3.3 Déchirure des textiles enduits

1.3.3.1 Différentes méthodes de tests de déchirure

La déchirure des textiles enduits a surtout été caractérisée dans deux configurations. La majorité des auteurs a utilisé la méthode de déchirure pantalon (Mewes 1989; Julie et *al.*

2002; Zhong et al. 2003; Farboodmanesh et al. 2005), alors que Minami (1978) ont effectué des tests de déchirure uni-axial pour modéliser l'énergie de rupture.

1.3.3.2 Mécanismes de déchirure

L'enduction des textiles par une couche de polymère ou d'élastomère engendre une modification de leurs propriétés mécaniques. En effet, le comportement en déchirure change, entre autres à cause de la réduction du glissement des fils dans la structure textile (Mewes 1989). Des mesures de la force de déchirure de tissus partiellement laminés (Figure 1.23) ont été réalisées par Julie et *al.* (2002). Les résultats obtenus permettent de constater que l'augmentation de la surface laminée engendre une diminution de la force de déchirure. Ces résultats s'expliquent par la mobilité des fils dans la structure textile qui devient très faible et peut même disparaître dans certains cas (Zhong et al. 2003; Farboodmanesh et al. 2005). Selon Abbott et *al.* (1971b), la déchirure des textiles enduits est contrôlée par trois facteurs: le comportement en déchirure de l'enduit, le comportement en déchirure du support textile et le comportement en adhésion de système textile-enduit.

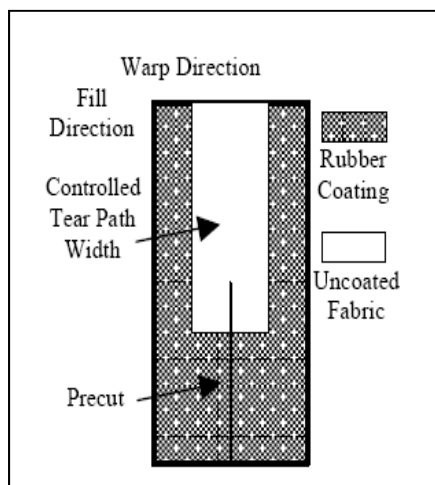


Figure 1.23 Enduction partielle d'un tissu de forme pantalon par une couche de caoutchouc
Tirée de Julie et *al.* (2002)

1.3.3.3 Résistance de déchirure

La résistance de déchirure est obtenue soit par la mesure de la valeur minimale, soit par la valeur maximale de la force de déchirure (Farboodmanesh et al. 2005). Jusqu'à présent, seul Minami (1978) a proposé un modèle du calcul de l'énergie de rupture des textiles enduits.

1.3.3.3.1 Modélisation de la résistance de déchirure

La modélisation des mécanismes de déchirure des textiles enduits a pour objectif principal de décrire le phénomène de la propagation de la fissure afin de comprendre l'interaction entre les trois composants : enduit, interface et support textile. Jusqu'à présent, il y a eu peu de travail de modélisation de ces mécanismes réalisé.

Minami (1978) a présenté dans ses études un modèle empirique de calcul de l'énergie de rupture pour des échantillons fabriqués en fibres de polyvinyle laminées par une couche de PVC. Cette énergie est évaluée par la méthode de déchirure uni-axiale. L'auteur a exprimé l'énergie de rupture du matériau en fonction de la force de rupture T_p , du module d'Young du matériau E_t , de la longueur initiale de la pré-fissure a et du nombre des fils n_c en faisant appel à la théorie de Griffith :

$$G_c = \frac{\pi}{8\sqrt{E_t}} \left(4a + \frac{1}{n_c} \right) T_p^2 (1 - 2a T_p C)^2 \quad (1.15)$$

Avec : $C = 0.0038$ (1/Kg)

Cependant, ce modèle ne prend pas en compte l'interaction entre le textile et l'enduit. Or, la propagation de la fissure dans les textiles enduits inclut des processus dissipatifs tels que le délaminage du textile et de l'enduit. L'importance de l'interface entre le textile et l'enduit impose qu'on tienne compte de cette interaction dans la modélisation de l'énergie de rupture des textiles enduits. De fait, nous montrerons plus loin que l'adhésion entre le support textile et l'enduit joue un rôle primordial dans l'évolution de l'énergie de rupture.

De leur côté, Zhong et al. (2003) ont pris en compte l'effet de l'interaction entre l'enduit et le support textile pour modéliser le mécanisme de déchirure des textiles enduits. À cette fin, ils

ont développé un modèle mathématique basé sur la méthode « Monte Carlo » et le « système Hamiltonien » pour étudier le phénomène de déchirure.

L'avantage principal du modèle de Hamilton est qu'en raison de son expression simple, il peut être utilisé pour décrire un système complexe par le biais de deux configurations interchangeables, c'est-à-dire par la numérisation du mécanisme de déchirure par une grille des cellules avec l'état 1 ou 0. Zhong et *al.* l'ont utilisé pour décrire les résultats obtenus par la méthode de déchirure pantalon à l'aide d'un modèle tridimensionnel discret. À cette fin, ils ont modélisé individuellement l'enduit, le support textile et l'interface par un ensemble de couches composées par des cellules cubiques (Figure 1.24) :

- enduit : modélisé par les couches h_1, \dots, h_{dc} avec d_c son épaisseur;
- support textile : modélisé par les couches j_1, \dots, j_{df} avec d_f son épaisseur;
- l'interface : modélisé les couches i_1, \dots, i_{din} avec d_{in} son épaisseur.

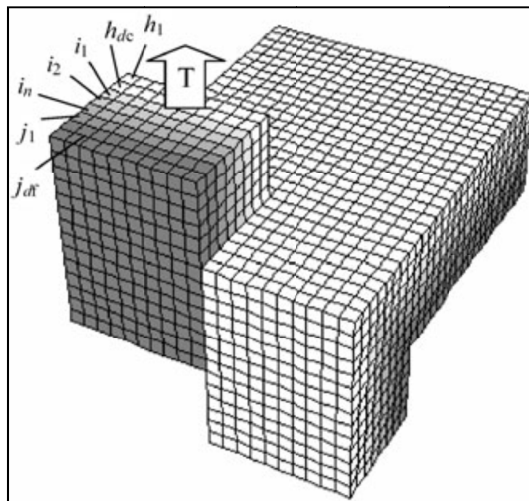


Figure 1.24 Modélisation mathématique de la déchirure des tissus enduits
Tirée de Zhong et *al.* (2003)

Le comportement en déchirure de l'enduit et de son support textile peut être décrit comme une cellule qui passe de son état d'origine non déchiré à un nouvel état déchiré.

En utilisant le système de Hamilton, Zhong et *al.* ont déterminé l'énergie H de cet espace tridimensionnel en fonction de quatre variables (F , M , f et m) caractérisant les comportements de chaque cellule cubique :

$$H = \sum_i^{d_f+d_c+d_{in}} H_i = -A \sum_i^{d_f+d_c+d_{in}} \sum_j^{cn} F_i F_j - B \sum_i^{d_f+d_c+d_{in}} \sum_j^{cn} M_i M_j - J \sum_i^{d_f+d_c+d_{in}} \left(f_i m_i + \sum_j^{ct} (f_i m_j + m_i f_j) \right) \quad (1.16)$$

En utilisant les variables suivantes :

- M_i : indique si une cellule i est occupée par l'enduit ($M_i = 1$) ou pas ($M_i = 0$);
- F_i : montre si une cellule i comprend le support textile ($F_i = 1$) ou pas ($F_i = 0$);
- f_i : représente si une cellule i pour support textile est toujours dans un état collé avec l'enduit ($f_i = 1$) ou dans un état décollé ($f_i = 0$);
- m_i : représente si une cellule occupée de l'enduit est toujours dans un état collé avec le support textile ($m_i = 1$) ou dans un état décollé ($m_i = 0$);
- A : représente l'énergie de cohésion du support textile;
- B : représente l'énergie de cohésion de l'enduit;
- J : correspond à l'énergie d'adhésion entre le support textile et l'enduit.

L'énergie totale ΔE de passage de H_1 (étape N°1) à H_2 (étape N°2) dépend aussi de l'énergie de rupture W_T et l'énergie de friction W_F associée à la force de friction F_r entre le support et l'enduit :

$$\Delta E = H_2 - H_1 - W_T + W_F \quad (1.17)$$

Pour étudier le mécanisme de déchirure, Zhong et *al.* ont modélisé la zone *Del* en utilisant la méthode Monte Carlo. Il s'agit de suivre les nœuds des cellules cubiques au cours de la déchirure afin de déterminer le point de rupture. Pour chaque nœud, une coordonnée est définie afin de déterminer une matrice qui décrit l'évolution de la zone *Del* pendant la propagation de la fissure. Cette matrice est composée des coordonnées de ces nœuds. Ensuite,

un algorithme qui décrit les mécanismes de déchirure est développé pour observer l'état du matériau pour chaque étape k de déchirure.

À l'aide de leur modèle, Zhong et *al.* ont étudié l'effet de l'énergie de cohésion du support textile A , de l'énergie de cohésion de l'enduit B , de l'énergie d'adhésion entre le support textile et l'enduit J , de la force de friction F_r entre le support et l'enduit et de l'allongement à la rupture de l'enduit sur la force de déchirure maximale et minimale. Ils ont montré que seulement A et B influent sur la force de déchirure maximale. Tous ces paramètres n'ont aucun effet sur la force minimale qui est toujours constante.

1.3.3.3.2 Facteurs influençant la résistance à la déchirure

Plusieurs études ont mis en évidence la contribution de différents facteurs sur la propagation de la fissure dans les textiles enduits : le support textile, l'enduit et l'adhésion du textile avec l'enduit (Abbott et al. 1971a; Dutta 1994). Plus particulièrement, ces auteurs se sont intéressés à l'étude de la relation entre la force d'adhésion et la force de déchirure du textile enduit. Ils ont montré qu'il y a une forte chute de la force de déchirure lors de l'augmentation de l'adhésion du textile avec l'enduit (Mewes 1989; Dutta 1994).

a. Influence du support textile

La déchirure des textiles enduits est générée en partie par la déchirure du support textile. Plusieurs études ont montré que les facteurs influant sur la déchirure des textiles affectent aussi le comportement en déchirure des textiles enduits. Les travaux rapportés dans la littérature révèlent que l'effet de la torsion des fils, du type de l'armure et de la densité des fils sur la force de déchirure est déterminant.

L'influence de la torsion des fils sur la résistance à la déchirure a été étudiée par différents auteurs. Ces études ont trouvé des résultats divergents. Eichert (1981) a constaté que l'augmentation de la torsion des fils engendre une croissance puis une stabilisation de la force de déchirure (Figure 1.25), alors que Dutta (1994) a indiqué que l'augmentation de la torsion des fils fait augmenter la pénétration de l'enduit dans le textile, et conséquemment cause une diminution de la force de déchirure. Les résultats trouvés dans (Eichert 1981)

semblent en accord d'une manière indirecte avec ceux qui ont été obtenus par Abbott et *al.* (1971a). Ces auteurs ont effectué des recherches afin de mettre en évidence l'influence de l'ondulation des fils. Les résultats obtenus montrent que l'augmentation de l'ondulation des fils (qui est obtenue par la diminution de la torsion des fils) se manifeste, pour sa part, par une décroissance de la force de déchirure.

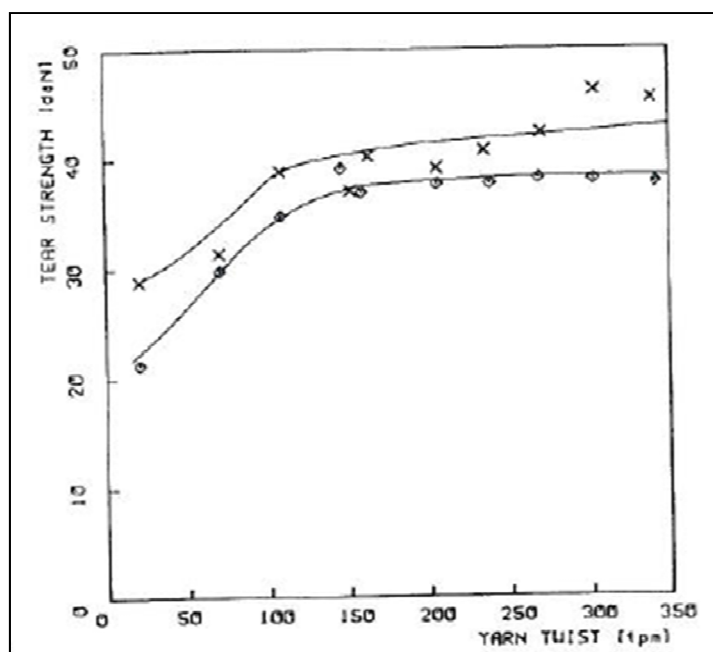


Figure 1.25 Effet de la torsion des fils sur la force de déchirure des tissus enduits
Tirée de Eichert (1981)

L'influence de l'armure sur la déchirure des textiles enduits a été étudiée par Abbott et *al.* (1971a). Le type de l'armure est considéré comme le facteur le plus influent sur la force de déchirure. Les résultats trouvés sont semblables à ceux qui ont été obtenus durant la déchirure des structures textiles. L'armure satin est la plus résistante à la déchirure, tandis que l'armure toile est classée troisième après l'armure de sergé. Cependant, selon ces auteurs, l'enduction de l'armure toile fait diminuer sa force de déchirure de 25%, alors que la réduction est de 60% pour l'armure de sergé et de 70% pour l'armure satin.

L'influence de la densité des fils sur la force de déchirure des textiles enduits a également été étudiée par Eichert (1981). Cet auteur a mesuré la force de déchirure des textiles

enduits dans les deux directions pour des structures avec des densités différentes des fils de chaîne et de trame. Les résultats obtenus sont illustrés par la Figure 1.26. Ces résultats révèlent que la force de déchirure augmente avec la densité des fils de chaîne, alors qu'elle diminue linéairement avec la densité des fils de trame. Cette évolution de la force de déchirure est justifiée dans (Abbott et al. 1971a) par l'effet de la pénétration de l'enduit dans le support textile qui varie d'une direction à une autre.

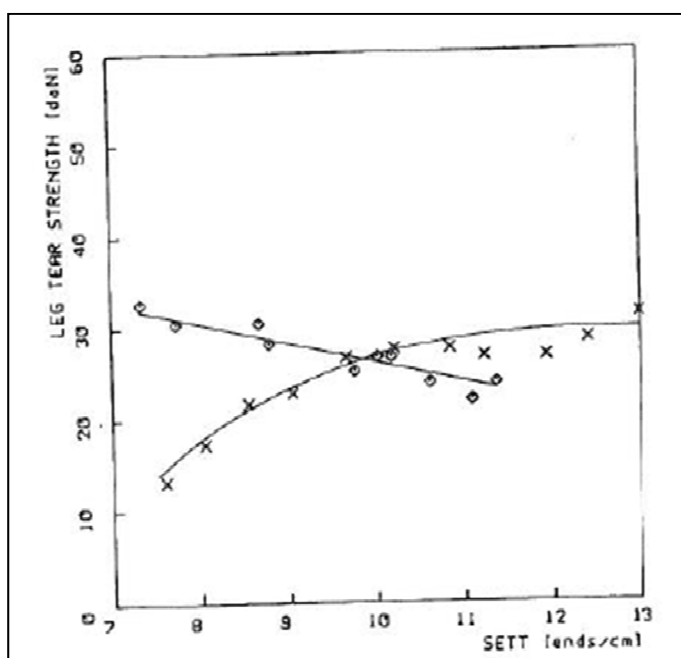


Figure 1.26 Effet de la densité des fils sur la force de déchirure des tissus enduits, obtenue par la méthode pantalon
Tirée de Eichert (1981)

Cependant, le même chercheur a présenté dans un autre travail (Eichert 1994) des résultats totalement contradictoires à ceux qui ont été présentés dans (Eichert 1981). Les résultats sont obtenus par deux configurations différentes de déchirure. La configuration pantalon montre que la force de déchirure obtenue selon la direction des fils de chaîne diminue avec l'augmentation de la densité des fils, alors que la force de déchirure qui correspond à la direction des fils de trame varie d'une part et d'autre part d'un maximum et d'un minimum. En revanche, la configuration trapèze montre que l'augmentation de la densité

des fils dans les deux directions se manifeste par une croissance de la force de déchirure (Figure 1.27).

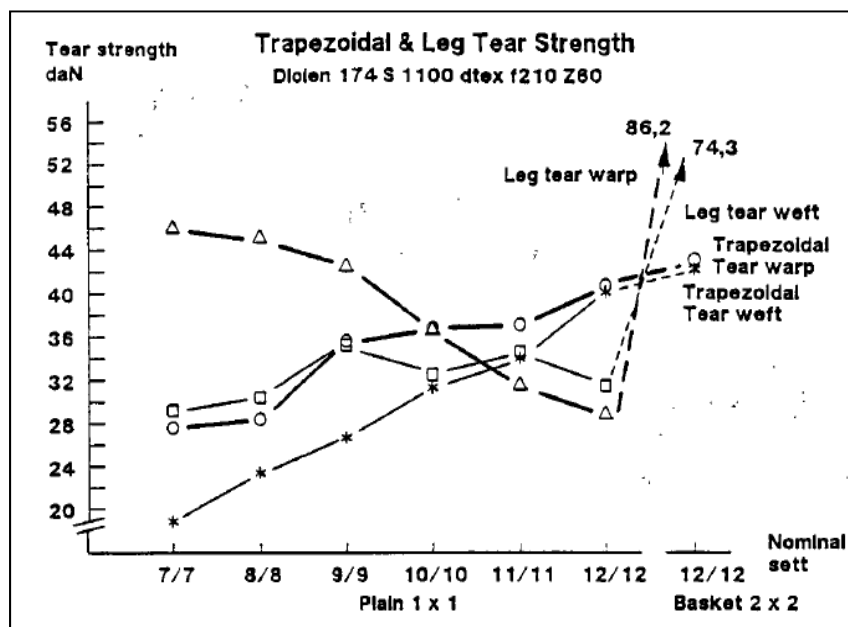


Figure 1.27 Effet de la densité des fils sur la force de déchirure des tissus enduits
Tirée de Eichert (1994)

L'état de l'art sur l'effet de la densité des fils sur la déchirure des textiles enduits permet de réaliser l'importance de la direction de déchirure par rapport à l'axe du tissage. Cette différence peut éventuellement être liée à un effet de la pénétration de l'enduit sur la propagation de la fissure. Par conséquent, dans notre étude de la déchirure des textiles enduits, nous allons prendre en compte l'interface textile-enduit.

b. Influence de l'adhésion du textile avec l'enduit

L'adhésion de l'enduit avec le support textile est considérée comme une propriété très importante pour les textiles enduits (Eichert 1981; Wypych 1988.; Mewes 1989; Sen and John 2001). De façon générale, l'augmentation de la force d'adhésion se manifeste par une chute importante de la force de déchirure des textiles enduits (Figure 1.28) (Eichert 1981; Mewes 1989). Cette évolution de la force de déchirure peut être expliquée par la

diminution du glissement des fils à cause de la pénétration de l'enduit dans la structure textile. Selon Sen et John (2001), cette variation de la force de déchirure en fonction de l'adhésion est reliée à la déformation du textile qui diminue par l'ajout de la couche de l'enduit.

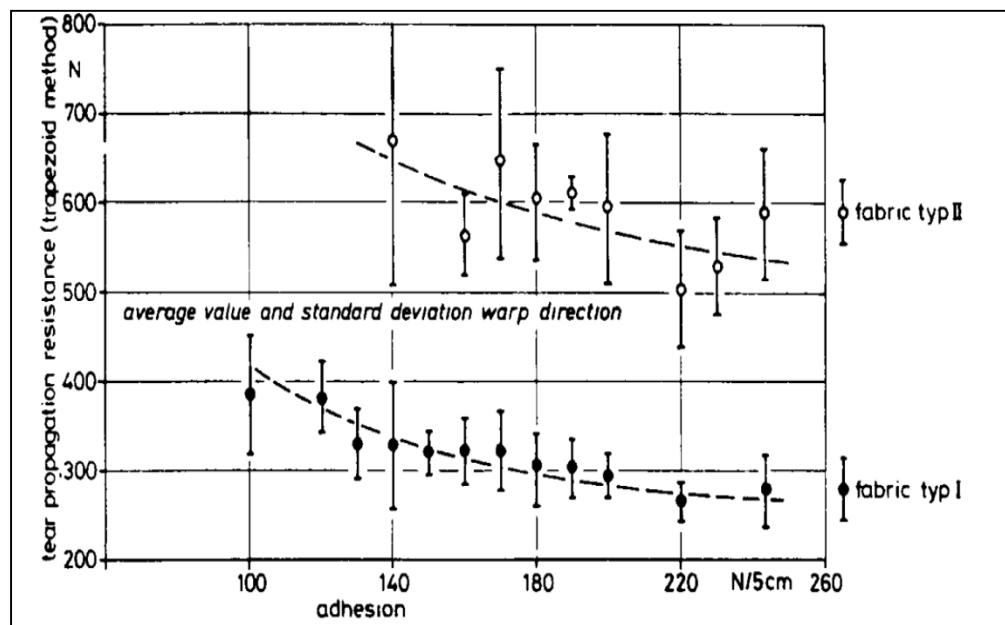


Figure 1.28 L'effet de la force d'adhésion sur la variation de la force de déchirure des textiles enduits
Tirée de Mewes (1989)

Le comportement de l'adhésion du textile avec l'enduit dépend de plusieurs facteurs. Les caractéristiques du support textile telles que la densité des fils, l'armure, etc., qui influent sur la variation de la force de déchirure des textiles enduits, affectent aussi la force d'adhésion (Eichert 1981).

L'évolution de la force d'adhésion de l'interface textile-enduit avec la densité des fils semble similaire dans les deux directions de déchirure (fils de chaîne et fils de trame). Après une chute initiale importante, la force d'adhésion tend vers un plateau (voir Figures 1.29 et 1.30). D'une manière générale, l'augmentation de la densité des fils se manifeste par une réduction de la force d'adhésion du textile avec l'enduit. On peut distinguer deux

catégories de textiles. Les tissus à basse densité des fils montrent une bonne adhésion; au contraire, pour les tissus de haute densité des fils la force d'adhésion entre les deux couches devient faible. Cet effet peut éventuellement être associé à la pénétration de l'enduit à travers l'épaisseur des tissus, qui diminue avec l'augmentation de la densité des fils.

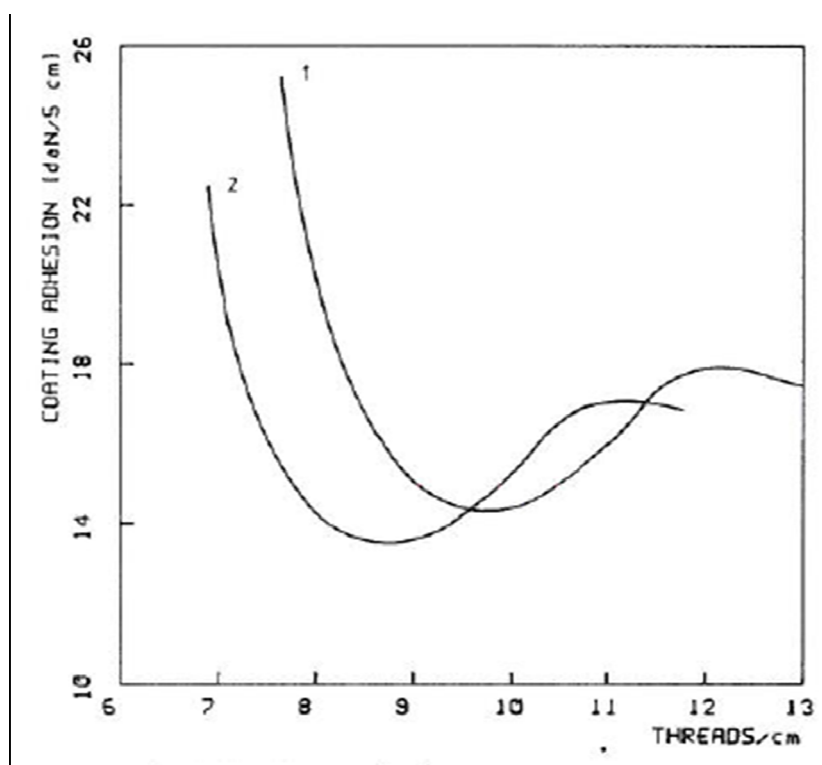


Figure 1.29 Effet de la densité des fils de chaîne (1) et des fils de trame (2) sur la force d'adhésion des tissus enduits
Tirée de Eichert (1981)

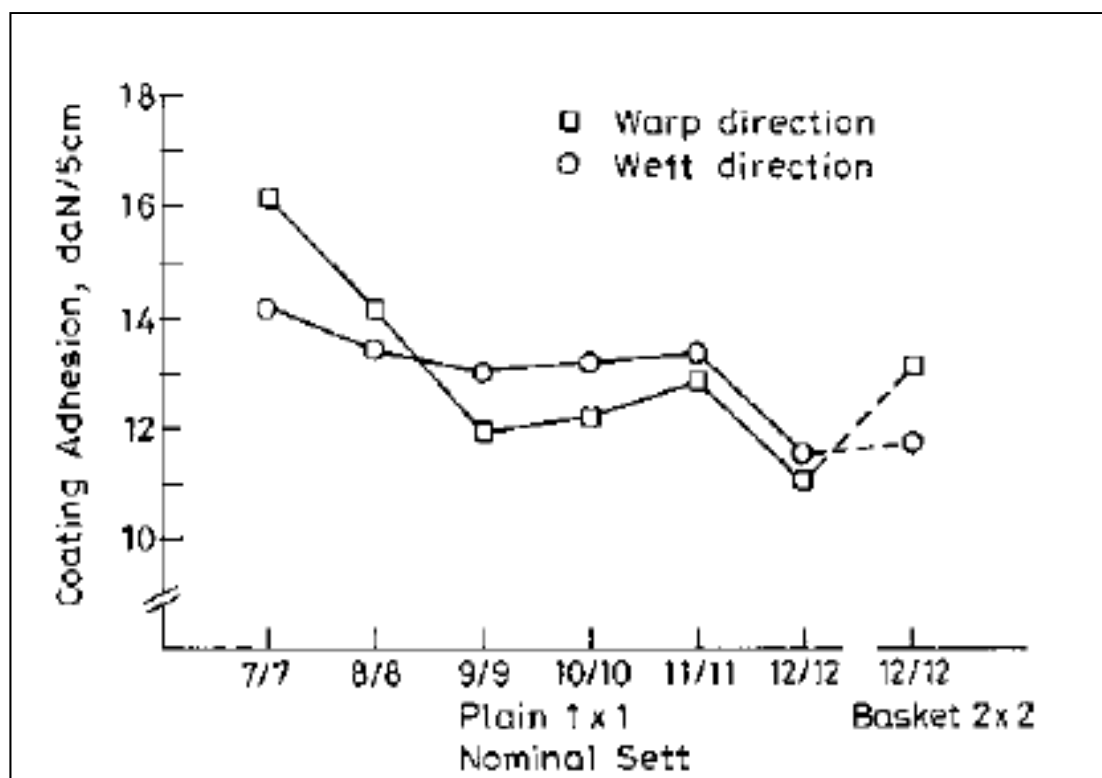


Figure 1.30 Effet de la densité des fils de trame et des fils de chaîne sur la force d'adhésion du textile avec l'enduit
Tirée de Eichert (1994)

Eichter a aussi étudié l'influence de la torsion des fils sur la force d'adhésion (Eichert 1981). Il a montré que l'adhésion de l'enduit avec le substrat augmente avec la torsion des fils (Figure 1.31). Cet accroissement est attribué au fait que l'augmentation de la torsion des fils facilite beaucoup la pénétration de l'enduit. Cela permet d'obtenir une épaisseur de pénétration plus élevée qui produit une force d'adhésion du textile avec l'enduit plus importante.

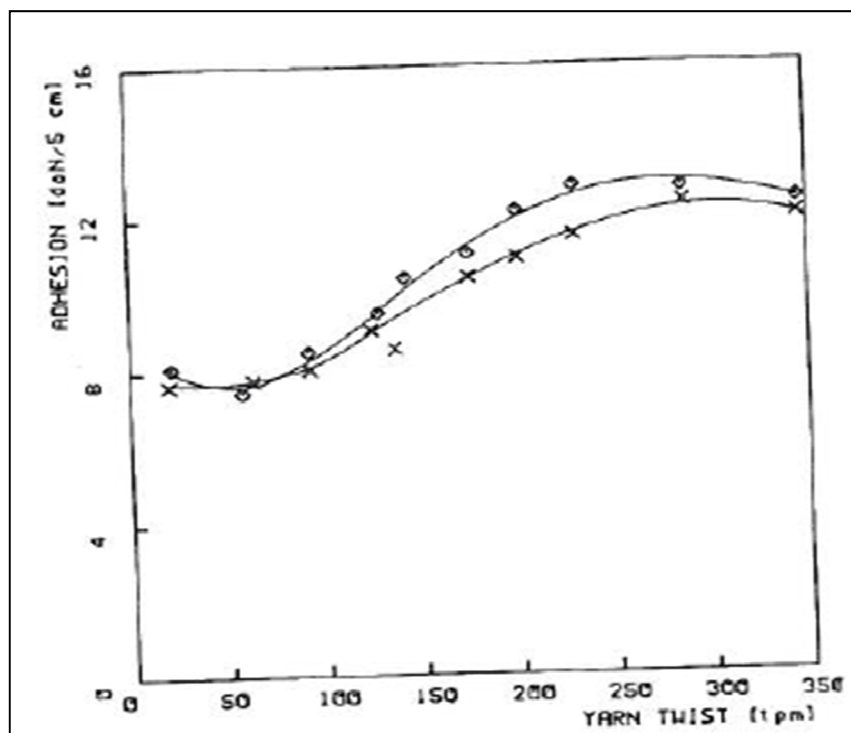


Figure 1.31 Effet de la torsion des fils de trame et des fils de chaîne
sur la force d'adhésion du textile avec l'enduit
Tirée de Eichert (1981)

Wake (1973) a conduit des recherches pour analyser l'influence de la longueur des fibres sur la force d'adhésion. Les textiles constitués par des fibres courtes présentent une surface disponible à l'adhésion de 10% supérieure à ceux qui ont été fabriqués par des fibres longues. Cet auteur a indiqué que les fibres courtes jouent un rôle dominant dans l'adhésion du textile avec l'enduit. Les textiles fabriqués avec des fibres courtes comme les fibres de coton n'ont pas besoin d'agents de liage, tandis que les textiles faits de fibres longues (fibres synthétiques) présentent un fini de surface lisse et des ondulations de fils importantes. Ces textiles ont besoin d'agents de liage afin d'assurer une bonne adhésion entre les deux couches (Dutta 1994).

c. L'effet des propriétés de l'enduit sur la déchirure

L'étude de l'effet des caractéristiques de l'enduit sur la déchirure des textiles enduits a été abordée par Abbott et al. (1971b). Des tests de déchirure ont été réalisés sur des tissus en coton laminés par une couche de PVC-Plastisols de différentes duretés et viscosités. Les résultats montrent que le type de l'enduit n'affecte pas la force de déchirure, mais la pénétration de l'enduit à travers le tissu diminue celle-ci. Ils ont attribué ce résultat à l'interaction mécanique et chimique de l'interface textile-enduit. Ainsi, ils ont indiqué qu'une force de déchirure des textiles enduits élevée peut être obtenue avec n'importe quel type d'enduit. Le facteur le plus important est la forme de l'interface textile-enduit.

1.4 Effet du vieillissement sur la résistance mécanique des vêtements de protection

Les matériaux sont sensibles à différents types de vieillissement, par exemple thermique, photochimique ou hydrolytique, qui affectent leurs propriétés. La résistance des vêtements de protection au vieillissement est souvent évaluée par le biais de la force de rupture en traction ou en déchirure. Or, comme cela a déjà été mentionné, cette méthode ne prend pas en compte la surface de rupture, ce qui ne permet pas d'avoir accès aux caractéristiques intrinsèques du matériau.

Par conséquent et bien que ce ne soit pas l'objectif principal de cette étude, des travaux ont également été réalisés pour analyser l'influence du vieillissement sur l'énergie de rupture des matériaux textiles. Dans cette partie, nous présenterons un aperçu général sur l'effet de la température, de l'humidité et du rayonnement UV sur les propriétés mécaniques des matériaux polymères ainsi que sur les différents mécanismes de dégradation.

1.4.1 Vieillissement des polymères

Différentes études sur le vieillissement rapportées dans la littérature permettent de distinguer deux types de vieillissement. Le vieillissement physique n'entraîne que des changements structuraux réversibles. Par contre, dans le cas du vieillissement chimique, que se produit par

exemple lorsqu'un polymère est exposé à des températures élevées, des modifications irréversibles sont générées au niveau de la structure macromoléculaire du matériau.

1.4.2 L'effet du vieillissement

Les effets du vieillissement sur les matériaux cités dans la littérature sont très nombreux (Verdu 2002). Généralement, cette influence est classée en différentes catégories : dégradation par thermolyse qui est purement thermique; dégradation par thermo-oxydation qui est due à la présence de l'oxygène; dégradation par coupure homolytique de chaînes, ce processus est produit par la thermolyse ou la photolyse des groupements macromoléculaire; dégradation par hydrolyse qui peut être amorcée par un acide ; les réactions de polymérisation qui se produisent à hautes température dans les polymères synthétisés par addition. Les réactions qui peuvent se produire lors de la dégradation des matériaux polymères sont :

- **Les coupures de chaînes**

Le processus de scissions de chaînes peut avoir lieu lorsque la quantité d'énergie fournie au matériau est capable d'engendrer des coupures statiques de chaînes, des réactions de dépolymérisation et des réticulations et des réactions dans des groupements latéraux. Les coupures de chaînes engendrent une perte de masse moléculaire très rapide sans élimination des fragments moléculaires.

- **La dépolymérisation**

La dépolymérisation est l'inverse de la polymérisation. Ce mécanisme est favorisé lorsque l'énergie de liaison monomère-monomère est faible. Au contraire des coupures de chaînes, un acte de dépolymérisation engendre une élimination des molécules de monomère et une perte de masse très faible. L'exposition de certains polymères tels que les polyéthylènes à des températures très élevées peut engendrer une coupure de leurs liaisons chimiques qui favorise par la suite la volatilisation des monomères.

- **La réticulation**

La réticulation est une réaction qui conduit à la formation des nouveaux ponts entre les segments de chaînes voisins. Celle-ci se traduit par une diminution de la mobilité moléculaire.

- **Les réactions des groupes latéraux**

Ces réactions conduisent une modification du squelette par des cyclisations intramoléculaires. De fait, des nouveaux groupes fonctionnels sont formés. À titre d'exemple, des hydrocarbonés et des apolaires sont transformés en groupes oxygénés (hydroxyles, cétones). Dans le cas des structures aromatiques, un chromophore (groupement d'atomes comportant une ou plusieurs doubles liaisons) peut apparaître à la suite d'une transformation chimique.

- **L'oxydation surfacique**

Cette réaction se manifeste par le changement de la couleur « surfacique » du matériau. Ce processus est dû à la réaction de l'oxygène qui se trouve au sein du polymère avec d'autres radicaux présents à la structure macromoléculaire.

- **Processus de formation de structures colorés**

Pour certains matériaux, ce processus se manifeste par des réactions d'élimination qui peuvent être présentées par des cas comme suit :

- le PVC : élimination d'acide chlorhydrique;
- le poly (acétate de vinyle) : élimination d'acide acétique;
- le poly (alcool vinylique) : élimination de H_2O .

La coloration peut résulter, d'une manière indirecte, d'une oxydation s'il y a formation des complexes colorés avec des impuretés ou adjuvants.

Ces processus de coloration sont largement favorisés dans le cas des polymères comportant des groupes aromatiques, par exemple lors de la transformation chimique des structures quinoniques.

1.4.3 Influence du vieillissement sur les propriétés mécaniques

Lors du vieillissement, différents processus peuvent avoir lieu tels que la réduction de la masse molaire suite à la scission des chaînes, la diminution du degré de réticulation et de la température de transition vitreuse (Pogany 1969; Patterson 1975; Arrieta et al. 2011). Ces processus de dégradation peuvent engendrer des modifications des propriétés mécaniques du matériau. Verdu (Verdu 2002) a montré que la contrainte à la rupture d'un polymère vieilli diminue avec la réduction de sa masse molaire. Cette évolution est décrite de la manière suivante :

$$\sigma_R = \sigma_{R_\infty} - \frac{C}{M_n}$$

En utilisant les variables suivantes : σ_R est la contrainte à la rupture, σ_{R_∞} est la contrainte à la rupture d'un matériau avec une masse molaire infinie, C est une constante et M_n est la masse molaire.

Cette réduction de la masse molaire a été exprimée en fonction de la masse initiale et de la masse finale du matériau ainsi que la vitesse de dégradation qui a été déterminé à partir de la loi d'Arrhenius (Kim et al. 2002). La variation de la masse linéique a été alors modélisée de la manière suivante :

$$\frac{d\alpha}{dt} = k[y_1(1-\alpha) + y_2\alpha(1-\alpha)]$$

En utilisant α comme un paramètre qui désigne la proportion de la perte de masse :

$$\alpha = \frac{M_0 - M}{M_0 - M_f}$$

M , M_0 et M_f sont respectivement la masse molaire courante, initiale et finale. y_1 et y_2 contenant des réactions de premier et de second ordre durant lesquelles le paramètre α est déterminé. k désigne la vitesse de dégradation.

La réduction de la masse molaire se manifeste souvent d'une part par une augmentation du nombre d'extrémités de chaînes, et d'autre part, par une diminution du taux d'enchevêtrement de chaînes. Ces deux facteurs engendrent alors une diminution des propriétés à la rupture du matériau. Cependant, les propriétés mesurées à des faibles déformations, notamment le module d'élasticité et la contrainte au seuil d'écoulement, ne peuvent pas être considérés comme des critères de vieillissement intéressants. De fait, ces propriétés ne sont pas sensibles à la dégradation du matériau.

Plusieurs études ont caractérisé la dégradation des matériaux en suivant la variation de certaines propriétés mécaniques. En ce qui concerne le vieillissement du polyester, sur lequel certaines recherches de cette thèse ont porté, citons, par exemple, les travaux de Datye et Palan (1989) qui se sont intéressés à la variation de la perte de masse et des propriétés mécaniques des tricots en PET, immergés dans une solution de NaOH (PH 14) à différentes températures (25-100°C) pendant 40 minutes. Les résultats obtenus montrent que, dans l'intervalle de températures comprises entre 64 et 75°C, la ténacité et l'allongement à la rupture sont quasiment stables. Ce domaine de température correspond à la zone de transition vitreuse (T_g) du matériau. Par ailleurs, l'augmentation de la température engendre une chute de ces deux propriétés. Cette réduction a été attribuée à l'augmentation de la mobilité moléculaire des chaînes polymères. En outre, cette diminution des propriétés mécaniques a été accompagnée d'une perte de la masse molaire.

Nayak et al. (2010) ont conduit des recherches sur le vieillissement thermique des fils en polyester afin de déterminer l'effet de la température sur les propriétés mécaniques et physico-chimique. Ce matériau a été exposé, durant des périodes de 5 à 60 min, à des températures de 275–285°C. Ces auteurs ont montré que l'influence du vieillissement thermique se manifeste de sa part par une réduction de l'allongement à la rupture et de la ténacité du matériau. Les auteurs ont indiqué qu'un phénomène de coupures de chaîne a été observé à la suite d'un processus de transfert d'hydrogène. La dégradation de ce matériau a été accompagnée par une augmentation de son acidité. De fait, l'analyse MEB montre que la surface des fils présente des particules blanches de taille égale à quelques micromètres. En outre, cette dégradation engendre une augmentation de la cristallinité du matériau.

Mathur et al. (1994) ont aussi mené des essais de vieillissement thermique des tissus en fibres de polyester en contact avec un acide et un milieu alcalin. L'étude des propriétés mécaniques a montré que le vieillissement à faible température ($< 70^{\circ}\text{C}$) ne nuit pas à la rétention de la force et de la déformation à la rupture des tissus. Par ailleurs, les hautes températures ($> 70^{\circ}\text{C}$) engendrent une réduction de ces deux propriétés. Selon ces auteurs, la réduction des comportements en traction de ces matériaux est due aux modifications de leurs propriétés physico-chimiques. De fait, une perte de la masse et une diminution de la température de transition vitreuse T_g ont été observées. Les analyses en DSC révèlent que la cristallinité varie selon le type de solution et les conditions de vieillissement. Une augmentation de la cristallinité a été observée à 70°C et pour les deux liquides, alors qu'une importante diminution de la cristallinité (48,95 à 36,40 kJ/kg) a été obtenue à 95°C et dans un milieu alcalin. Ces auteurs ont constaté que pour les deux solutions (acide et milieu alcalin) un mécanisme de dégradation par hydrolyse de ces matériaux est aussi observé lors du vieillissement à des températures supérieures à T_g .

Il est à noter que les propriétés mécaniques à faible déformation comme le module d'Young et le seuil d'écoulement sont peu touchées par le vieillissement (Verdu 2002).

1.4.4 Détermination des paramètres cinétiques

Différentes approches sont utilisées pour déterminer les paramètres cinétiques dont la principale est l'énergie d'activation de la dégradation thermique. Parmi ces approches, citons la loi de type Arrhénius (Nelson 1971; Budrugaec et al. 1991). Cette méthode permet de décrire une relation entre la température absolue T et une constante de vitesse k :

$$k(T) = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$$

Où A et E_a représentent respectivement le facteur pré-exponentiel et l'énergie d'activation et R est la constante des gaz.

Malgré le fait que cette approche présente plusieurs avantages, en particulier sa simplicité pour « quantifier » le mécanisme de dégradation thermique du matériau, plusieurs auteurs

critiquent cette pratique (Gillen et al. 1997; Tsotsis et al. 1999; Lu et al. 2000). Selon eux, un changement dans le mécanisme de dégradation peut se produire en fonction de la température, ce qui engendre une non-linéarité du phénomène, surtout pour la plage de température de vieillissement proche ou supérieure à T_g . Par exemple, Patterson-Jones (1975) a observé un changement de mécanisme de dégradation lors du vieillissement d'époxy. Dans ce cas, il a été attribué à une variation des produits de dégradation avec la température de vieillissement.

1.4.5 Prédiction de la durée de vie

L'objectif principal des études réalisées sur le vieillissement thermique accéléré est généralement soit la prédiction de la durée de vie d'un matériau, soit l'extrapolation d'une propriété à un temps donné d'utilisation. Il s'agit ici de modéliser l'évolution d'une propriété donnée à des temps courts afin de l'extrapoler à des temps longs. La plupart des prévisions déterminent la variation d'une propriété en fonction de la température selon une loi de type Arrhenius :

$$\frac{dx}{dt} = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) f(x)$$

Où x est la variation de la propriété, t est le temps de vieillissement et $f(x)$ est une fonction caractéristique.

L'utilisation de cette méthode permet de déterminer l'énergie d'activation E_a pour chaque propriété donnée. Cette énergie doit être constante dans l'intervalle de température de vieillissement.

Cette étude bibliographique sur le vieillissement donne une idée des mécanismes de dégradation des polymères soumis à des conditions thermiques sévères. Il ressort de cette étude qu'il est possible d'associer l'évolution d'une propriété à une loi de type Arrhenius afin de quantifier les mécanismes de dégradation thermique par le calcul de l'énergie d'activation. Cette méthode sera appliquée pour mettre en évidence l'effet du vieillissement thermique sur le comportement à la déchirure des textiles et des textiles enduits, et plus particulièrement leur

énergie de rupture. La technique d'analyse gravimétrique sera utilisée pour tenter de comprendre les résultats obtenus.

1.5 Conclusion

Dans ce chapitre, les différents matériaux utilisés pour les vêtements de protection, les méthodes de mesure et d'analyse de la déchirure ainsi que les comportements en déchirure des textiles et textiles enduits ont été présentés.

Jusqu'à présent aucun critère de rupture n'a été établi pour calculer l'énergie de rupture. La majorité des études ont utilisé la force de déchirure pour évaluer le comportement en déchirure des structures textiles. Or, cette méthode néglige la surface de rupture, ce qui ne permet pas d'avoir accès aux caractéristiques intrinsèques du matériau et d'appliquer les concepts de la mécanique de la rupture.

Dans ces études, plusieurs auteurs se sont intéressés à la modélisation de la résistance à la déchirure des structures textiles. À partir des différents modèles proposés, nous pouvons constater que le glissement des fils ainsi que le comportement en traction des fils constituent les mécanismes principaux de la déchirure des textiles.

En ce qui concerne l'effet du vieillissement, il apparaît que les propriétés mécaniques des polymères, notamment l'énergie de rupture, sont sensibles à la dégradation thermique.

En se basant sur les études antérieures, des approches simples pour le calcul de la résistance à la déchirure des structures textiles et textiles enduits à fibres synthétiques seront établies. En particulier, dans le chapitre suivant, nous présenterons la formulation d'un critère de rupture des textiles fondée sur la théorie de la mécanique de la rupture et validé par une étude expérimentale.

CHAPITRE 2

CRITÈRE DE DÉCHIRURE

2.1 Introduction

L'énergie de rupture des structures textiles est une caractéristique intrinsèque importante du matériau. Cette propriété prend une importance particulière pour les matériaux utilisés dans les équipements de protection. Cependant, jusqu'à présent, aucun critère de rupture des textiles n'a encore été établi. Effectivement, les travaux concernant la déchirure des textiles ont surtout porté sur l'étude de la force ou du travail de déchirure.

Cette étude vise à proposer une démarche pour déterminer un critère d'énergie de rupture pour les structures textiles. Pour ce faire, des tests de déchirure uni-axiale et pantalon ont été réalisés sur des tissus en coton, en mélange polyester/coton et en polyester. Le développement de ce critère est fondé sur la théorie de la mécanique de la rupture. L'objet de cette nouvelle approche est d'établir une relation entre l'énergie de rupture, le travail de déchirure et la longueur de la propagation de la fissure.

Par la suite, ce critère sera utilisé pour étudier l'effet de la densité des fils, de la masse linéique et de l'armure sur l'évolution de l'énergie de rupture. Il offre également des opportunités intéressantes pour mettre en évidence la relation entre les mécanismes de la propagation de la fissure et le comportement en déchirure.

2.2 Mécanique de la rupture

2.2.1 Théorie de Griffith

Le concept de la mécanique de la rupture a pour origine une approche macroscopique de l'étude des problèmes de la propagation instable d'une fissure préexistante dans le matériau. Cette propagation est due à l'existence d'une discontinuité du matériau à l'échelle macroscopique. La théorie de la mécanique de la rupture étudie les conditions pour qu'une fissure préexistante dans le matériau se propage. Selon Griffith (1920), l'étude d'une propagation de fissure dans un matériau fragile est basée sur l'équilibre de l'énergie dans ce matériau. Cet auteur a postulé qu'une fissure se propage si l'énergie de déformation élastique, qui est stockée dans le matériau, est supérieure à l'énergie libre du matériau qui est elle-même égale à l'énergie nécessaire pour créer une nouvelle surface dans le matériau (Tung and Vukhanh 2007) :

$$-\left(\frac{\partial U}{\partial A}\right)_l \geq 2\gamma \quad (2.1)$$

Où U est l'énergie totale de déformation élastique, A est la surface de rupture, l est le déplacement appliqué à une vitesse de déformation constante et γ est l'énergie libre de la surface.

La mécanique de la rupture élastique linéaire (LEFM) a été largement appliquée pour déterminer la résistance à la rupture de matériaux dans la région de comportement fragile (Griffith 1920). Cette résistance a été caractérisée par le calcul de la ténacité K_{Ic} ou l'énergie de rupture G_{Ic} surtout à haute vitesse de déformation et à basse température. Par contre, ces deux facteurs K_{Ic} ou G_{Ic} n'ont été pas vérifiés avec les matériaux qui ont des comportements mécaniques non linéaires, notamment les élastomères et les textiles.

2.2.2 Mécanique de la rupture non linéaire

La rupture des matériaux élastiques non linéaires tels que les élastomères peut être classée sous le thème de mécanique de la rupture non linéaire. Ce concept est consacré éventuellement aux caoutchoucs.

Dans le cadre de la rupture des caoutchoucs synthétiques, Rivlin et Thomas (1953) ont réussi à déterminer l'énergie de rupture en se basant sur la théorie de Griffith. Ils ont démontré que pour faire propager une fissure de longueur dc ou d'une surface dA , il faut que l'énergie élastique du matériau diminue d'une quantité $-dW$. Ils ont abouti à l'équation suivante :

$$-(dW/dc) > T(dA/dc) \quad (2.2)$$

Où T est l'énergie de surface du matériau. Cette étude est basée sur l'hypothèse que seul le fond de la fissure subit une grande déformation.

En utilisant le bilan énergétique, Rivlin et Thomas ont montré, comme Griffith, que le taux de restitution d'énergie, $\left(\frac{\partial W}{\partial c}\right)$, est défini en fonction de l'énergie élastique stockée dans le matériau. Ainsi, ce taux peut être utilisé comme un critère d'amorçage de déchirure dans les élastomères :

$$-\left(\frac{\partial W}{\partial A}\right)_l = T_c \quad (2.3)$$

L'indice l indique que cette équation est valable pour un déplacement constant, t est l'épaisseur du matériau et T_c est l'énergie de rupture critique.

Ces auteurs ont postulé, dans le cas d'un matériau déformé et contenant une pré-fissure, qu'une propagation de fissure se produit lorsque l'énergie de rupture T (qui est considérée comme le taux de restitution d'énergie) dépasse l'énergie de rupture critique :

$$T = -\frac{1}{t} \left(\frac{\partial W}{\partial c} \right)_l \quad (2.4)$$

À partir de la variation de l'énergie élastique stockée (l'énergie absorbée par l'échantillon pour créer une surface de rupture), W , en fonction de la surface de rupture (A), cette énergie de rupture T a été déterminée par le calcul de la pente (Rivlin and Thomas 1953). Cette approche a été vérifiée avec différentes configurations de rupture. Ainsi, plusieurs modèles de calcul de l'énergie de rupture des élastomères ont été développés. Ces modèles ont été présentés dans la partie 1.3.1.4.

2.2.3 Déchirure des textiles

La déchirure des structures textiles est un phénomène complexe qui dépend largement de l'interaction entre les fils de chaîne et les fils de trame. Cette interaction se manifeste par la présence de différents mécanismes de déchirure, notamment la déformation, le glissement, l'empilement et la rupture des fils. Ainsi, la force de déchirure est instable au moment de la propagation de la fissure. Cette propriété varie entre un maximum et un minimum. Cette variation engendre un problème pour la caractérisation de la résistance à la déchirure du matériau. De fait, quelle valeur de la force de déchirure doit être utilisée ? Scelzo et al. (1994a) ont déterminé la moyenne des valeurs maximales afin d'étudier l'effet de certaines caractéristiques sur le comportement en déchirure. De même, Krook et Fox (1945) ont montré que l'utilisation de la moyenne des valeurs maximales de la force de déchirure est la plus souhaitable. En effet, la déchirure réelle des tissus se produit à ces maximas. Cependant, Teixeira et al. (1955) ont calculé le travail de déchirure en utilisant la moyenne de la valeur maximale et de la valeur minimale. Aussi, Krook et Fox (1945) ont proposé aussi le calcul du travail pour caractériser la résistance de déchirure.

D'après cette revue de la littérature qui porte sur l'étude de la résistance à la déchirure des textiles, nous pouvons constater qu'aucun critère de rupture n'a été pas établi. En effet, la force et le travail de déchirure ne prennent pas en compte l'énergie globale de déformation stockée qui se produit à la pointe de la fissure. Ces deux propriétés ne peuvent pas décrire d'une manière précise la propagation de la fissure dans les textiles. Ainsi, la définition d'un critère de rupture pour les textiles est indispensable surtout pour ceux qui imposent une grande performance, notamment les vêtements de protection.

Dans le cadre de leurs travaux sur la déchirure des élastomères, Rivlin et Thomas (1953) ont montré que la théorie de la mécanique de la rupture peut être appliquée à tous les matériaux (même ceux qui ont un comportement mécanique non linéaire) à partir du moment où il est possible de déterminer leur énergie élastique stockée afin de calculer le taux de restitution de l'énergie. Par conséquent, nous proposerons dans la partie suivante d'étendre l'approche de Griffith à la rupture des matériaux textiles.

2.3 Protocole expérimental et matériaux

2.3.1 Méthodes de déchirure

Les essais de déchirure pantalon ont été effectués selon la norme EN388 relative aux gants de protection (EN388 2003). Les échantillons ont une dimension de 100 x 50 mm, découpés selon la direction des fils de chaîne (lors de la déchirure, il y a rupture des fils de trame). Ces échantillons contiennent une pré-fissure centrale d'une longueur de 50 mm (Figure 2.1).

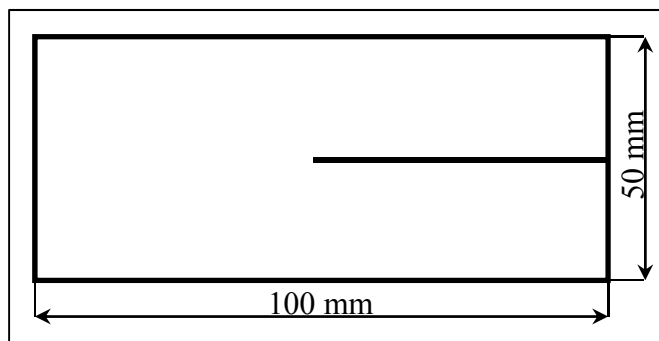


Figure 2.1 Configuration de l'échantillon pantalon

Les essais de déchirure pantalon consistent à fixer les languettes d'attache de l'échantillon dans les deux mâchoires de la machine de traction MTS-Alliance (Figure 2.2). Ensuite, des tests de chargement/déchargement ont été réalisés à une vitesse de 100 mm/min et à différents déplacements l .

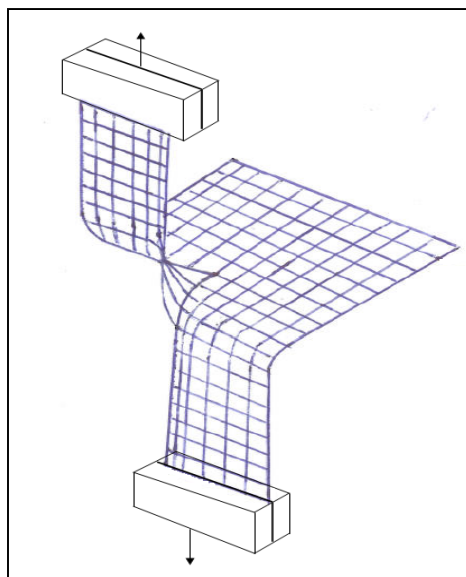


Figure 2.2 Essai de déchirure pantalon

Pendant chaque test de déchirure, la courbe force-déplacement a été enregistrée pour déterminer la force de déchirure et calculer le travail de déchirure. La Figure 2.3 donne un exemple qui illustre l'allure de la force de déchirure. L'examen de cette courbe montre l'existence de deux régions : la première partie présente le travail nécessaire pour mener le matériau au premier point de déchirure. Elle inclut la déformation élastique des languettes d'attache. La deuxième région de cette courbe correspond à la propagation de la fissure dans le tissu. La force de déchirure varie entre des minima et des maxima. Aux valeurs minimales, les fils longitudinaux sont étirés et glissent de manière stationnaire afin de former la zone *Del*. Dès que la force de déchirure atteint sa valeur maximale, la rupture d'un ou de quelques fils transversaux se produit dans la zone *Del*. Pour chaque test, la longueur déchirée a été mesurée dans l'état non déformé de l'échantillon.

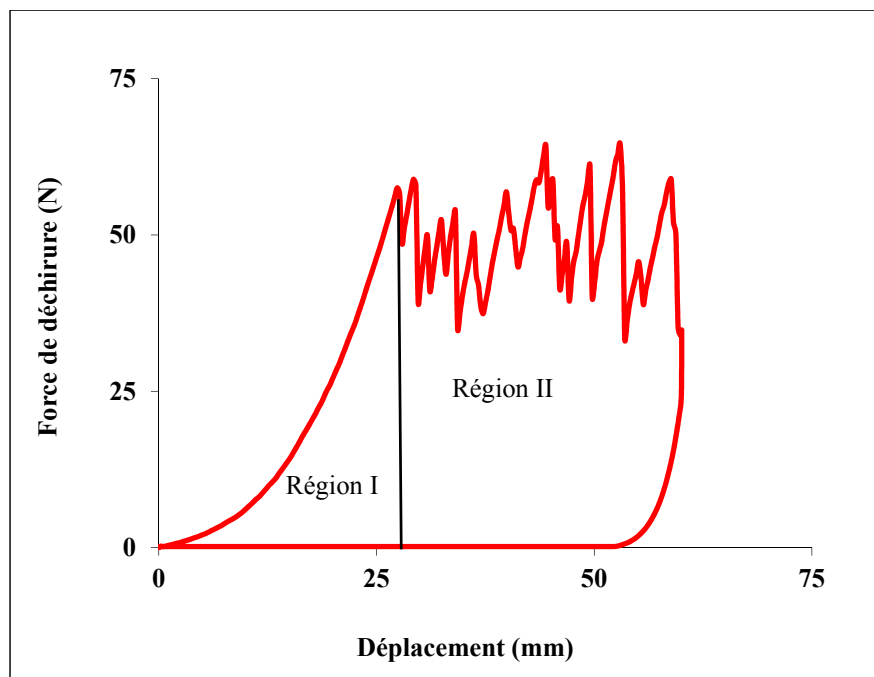


Figure 2.3 Exemple typique de la courbe force-déplacement, issue d'un test de déchirure charge/décharge réalisé dans la configuration pantalon

Une deuxième série de tests de déchirure a été menée sur des échantillons de forme uni-axiale qui ont la même dimension que celle des échantillons pantalon. Ces échantillons ont été découpés selon la direction des fils de trame. Ils présentent une pré-fissure centrale de longueur de 10mm qui est orientée selon la direction des fils de chaîne (Figure 2.4). De même, des tests de chargement/déchargement ont été menés dans les mêmes conditions que celles des essais de déchirure pantalon. Pour chaque test, une valeur maximale du déplacement δ a été appliquée. La courbe de déchirure force-déplacement a été enregistrée. La longueur de déchirure a également été mesurée à posteriori sur l'échantillon dans l'état non déformé.

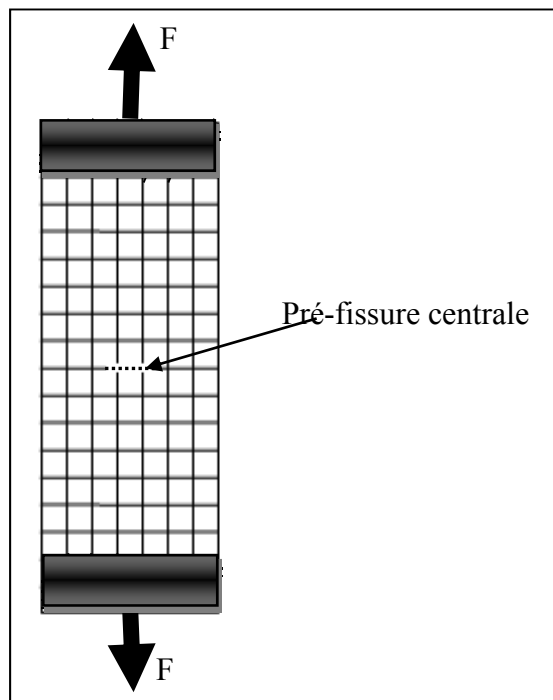


Figure 2.4 Essai de déchirure uni-axiale

La Figure 2.5 illustre un exemple de la courbe de déchirure force-déplacement obtenue pendant un essai de déchirure charge/décharge uni-axiale. Pour un même matériau, cette configuration de déchirure donne une force supérieure à celle obtenue lors de la configuration pantalon. Par conséquent, la force de déchirure ne peut être considérée comme un critère de rupture pour les structures textiles. Ce résultat peut s'expliquer par le fait que toute la charge appliquée est supportée par l'ensemble des fils longitudinaux. En effet, la déchirure dans la configuration uni-axiale se fait de manière catastrophique, par rupture brutale de tous les fils longitudinaux. La vitesse de déchirure est donc très rapide. En comparaison, la déchirure par la méthode pantalon est obtenue à la suite de la rupture graduelle de fils transversaux qui se trouvent à l'extrémité de la zone *Del*. De la même façon que pour la configuration pantalon, la courbe de déchargement permet de connaître l'énergie de déformation élastique dans les échantillons uni-axiaux et de la soustraire pour accéder à l'énergie de rupture.

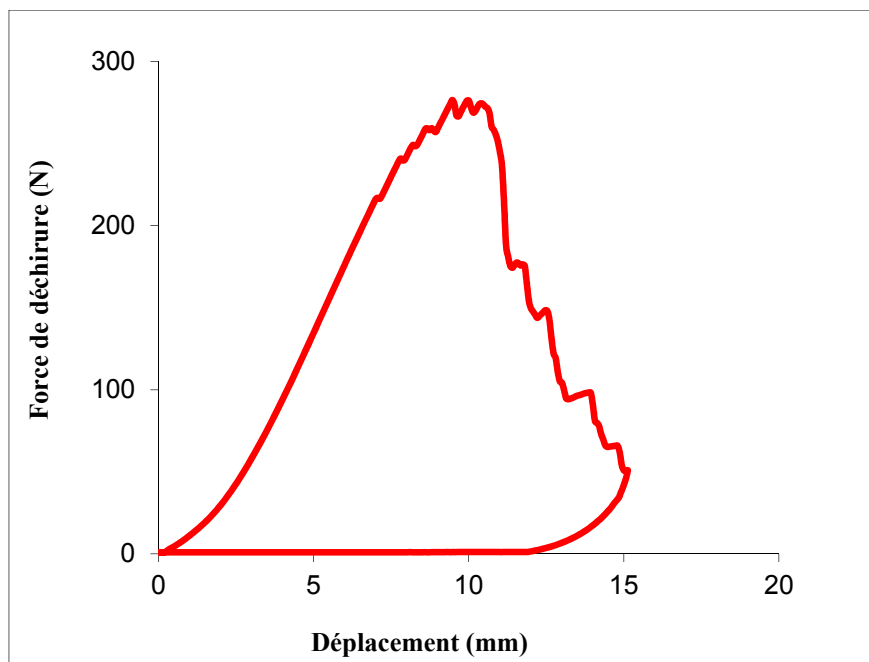


Figure 2.5 Exemple typique de la courbe force-déplacement, issue d'un test de déchirure charge/décharge réalisé par la configuration uni-axiale

2.3.2 Matériaux

Les essais de déchirure ont été réalisés sur des tissus en coton, en mélange polyester/coton et en polyester. Les deux premiers matériaux ont été utilisés pour établir et valider notre critère de déchirure. Ils sont faits d'une armure toile et leurs valeurs respectives de densité des fils et de masse linéique sont données dans le Tableau 2.1. Par ailleurs, pour caractériser l'influence de certaines caractéristiques du tissu sur l'énergie de rupture, des essais de déchirure pantalon ont été menés sur des tissus en polyester d'armure toile et sergé de différentes masses linéiques et de densités des fils de trame (Tableau 2.1). Les caractéristiques des fils de chaîne sont les mêmes pour tous ces tissus en polyester.

Tableau 2.1 Description des matériaux

Armure	Fil chaîne (Tex)	Fil trame (Tex)	Densité : Trame x Chaîne (fils/cm)
Coton			
Toile	31,2	66	17x40
Mélange 68 % polyester et 32 % coton			
Toile	30,8	43,2	13x38
Polyester			
Toile	17,2	33	10x48
		33	12x48
		33	15x48
		16,7	12x48
		15	12x48
Sergé		33	10x48
		33	12x48
		33	15x48
		16,7	15x48
		12	15x48

2.4 Formulation du critère de rupture

Dès les années 1920, un premier critère de rupture pour les matériaux fragiles a été proposé par Griffith (1920). Puis, en 1953, Rivlin et Thomas (1953) ont établi une formule pour le calcul de l'énergie de rupture pour les matériaux élastiques non linéaires. Pour ce faire, des essais de rupture ont été menés sur des échantillons en élastomères de différentes formes afin de développer un critère de rupture. Ce modèle développé par Rivlin et Thomas était inspiré par la théorie de Griffith. Ces auteurs ont démontré que pour propager une fissure de longueur

dc ou d'une surface $dA = e \times dc$, il faut que le travail élastique du matériau diminue d'une quantité $-dW$. Après une étude expérimentale et théorique, ils ont abouti à l'équation suivante pour calculer le taux de restitution d'énergie de rupture des élastomères:

$$G = -\frac{1}{e} \left(\frac{\partial W}{\partial c} \right)_l \quad (2.5)$$

En utilisant les variables suivantes : W est le travail élastique stocké dans le matériau, c est la longueur déchirée, l est le déplacement appliqué et e est l'épaisseur du matériau déchiré.

Par la suite, Felbeck et Atkins (1996) ont reformulé l'expression de l'équation 2.5 en tenant compte des principes de la mécanique de la rupture pour donner l'expression suivante :

$$G_s = -\left(\frac{\partial U}{\partial A} \right) \approx -\frac{\Delta U}{\Delta A} \quad (2.6)$$

Où G_s est l'énergie de rupture, ΔU est la variation du travail qui correspond au changement dans la surface de rupture $\Delta A = e * \Delta c$, avec c la longueur déchirée et e l'épaisseur du matériau. Ce critère d'énergie de rupture a été appliqué avec succès pour calculer l'énergie de rupture par piqure par les aiguilles dans le cas des membranes en élastomère (Nguyen et al. 2009). La variation du travail de déformation $-\Delta U_{ij}$ et la variation de la surface de rupture ΔA_{ij} peuvent être calculées par les expressions suivantes :

$$-\Delta U_{ij} = U_i - U_j \quad (2.7)$$

$$\Delta A_{ij} = A_i - A_j \quad (2.8)$$

En utilisant les variables suivantes : i et j correspondent aux numéros de tests de piqure à deux différentes longueurs de perforation.

Notre formulation du critère de l'énergie de rupture des textiles s'est inspirée de la théorie présentée ci-dessus. En effet, une expression du calcul de l'énergie de rupture G_C a été proposée à partir de la variation du travail de déchirure $-dW$ qui correspond à la variation de

la surface de rupture ΔA . Cette énergie sera déterminée sur la base de tests de déchirure réalisés à différents déplacements l :

$$G_C = - \left(\frac{\Delta W}{\Delta A} \right)_l \quad (2.9)$$

Dans ce qui suit, ce critère de rupture sera appliqué aux deux configurations de déchirure pantalon et uni-axiale ainsi que sur différents textiles.

2.4.1 Configuration pantalon

La Figure 2.6 illustre la variation de la force de déchirure pour deux valeurs du déplacement l . Quelle que soit la valeur du déplacement appliqué l , la fissure commence à se propager dans le matériau à partir d'une même valeur de déplacement L_i (Figure 2.6). Le travail stocké dans la structure, noté W , se décompose en un travail initial W_{init} qui amène le matériau au point de déchirure et en un travail de déchirure $W_{déch}$ faisant propager la fissure dans le tissu. Par conséquent, le travail de rupture W peut s'exprimer sous la forme suivante :

$$W = W_{init} + W_{déch} \quad (2.10)$$

Où W_{init} et $W_{déch}$ sont donnés par les relations suivantes :

$$W_{init} = \int_0^{L_i} F_{déch} . dl \quad (2.11)$$

$$W_{déch} = \int_{L_i}^{L_d} F_{déch} . dl \quad (2.12)$$

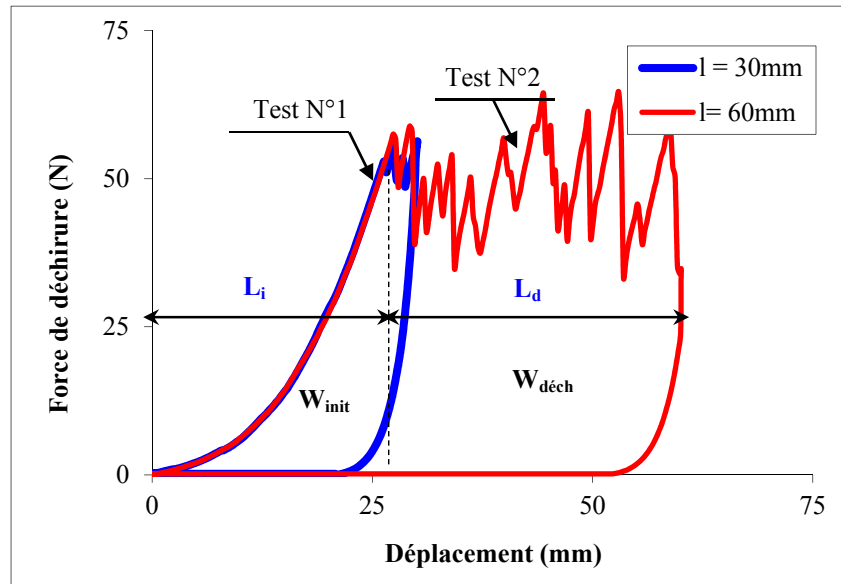


Figure 2.6 Courbes de déchirure force-déplacement à deux valeurs de déplacements l , issue d'essais de déchirure pantalon

La variation du travail de rupture $-\Delta W$ qui correspond à l'équation 2.9 a été calculée à partir de deux essais de déchirure à différents déplacements maximums l . À chaque déplacement l_i , le travail W_i qui correspond à une surface de rupture A_i a été calculé (l'indice i désigne le numéro de test de déchirure). Les valeurs de $-\Delta W$ et ΔA sont déterminées par les expressions suivantes :

(2.13)

$$-\Delta W = W_1 - W_2$$

$$\Delta A = A_1 - A_2 \quad (2.14)$$

En combinant les équations 2.13 et 2.14 avec l'équation 2.10, la variation du travail $-\Delta W$ prend donc la forme suivante :

$$-\Delta W = W_1 - W_2 = (W_{init} + W_{déch})_1 - (W_{init} + W_{déch})_2 \quad (2.15)$$

Les résultats des tests de déchirure des tissus en coton ont montré que pour une même longueur de la pré-fissure ($c_0 = 50$ mm) et quelle que soit la longueur déchirée c , le travail initial W_{init} reste constant (Figure 2.7). Ce travail initial dépend par contre éventuellement de la

forme de l'échantillon. Il est donc possible d'éliminer W_{int} de la formulation de $-\Delta W$ en accord avec la procédure proposée par Krook et *al.* (Krook and Fox 1945):

$$-\Delta W = W_1 - W_2 = (\cancel{W_{init}} + W_{déch})_1 - (\cancel{W_{init}} + W_{déch})_2 \quad (2.16)$$

L'expression finale de la variation du travail de rupture prend donc la forme suivante :

$$-\Delta W = W_{déch_1} - W_{déch_2} \quad (2.17)$$

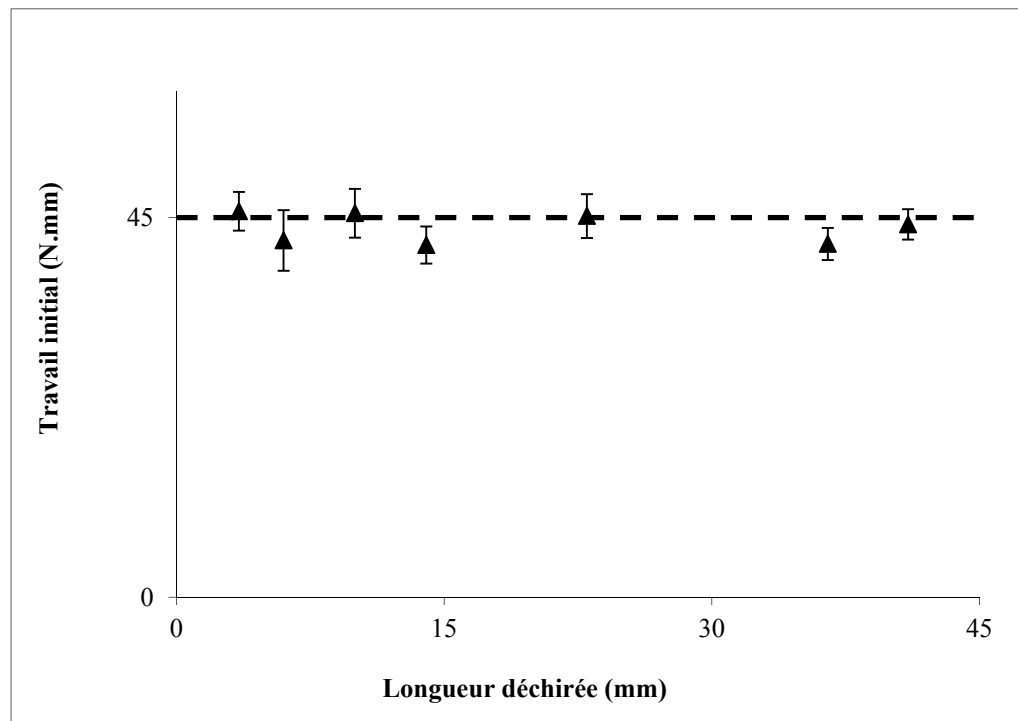


Figure 2.7 Variation du travail W_{init} en fonction de la longueur de déchirure c , issue d'essais de déchirure pantalon pour le tissu en coton

La Figure 2.8 illustre l'évolution du travail de déchirure $W_{déch}$ en fonction de la surface de la fissure A pour différentes valeurs de déplacement l . L'ensemble de points peut être décrit par une droite. La linéarité entre le travail de déchirure et la surface de rupture offre la possibilité de considérer l'expression du calcul de l'énergie G_C représentée par l'équation 2.5 comme un critère de rupture pour les tissus. Ainsi, la valeur de l'énergie G_C peut être obtenue par la

pente de cette droite. Dans ce cas, l'énergie de rupture du tissu en coton a une valeur de 67 N.mm/mm^2 .

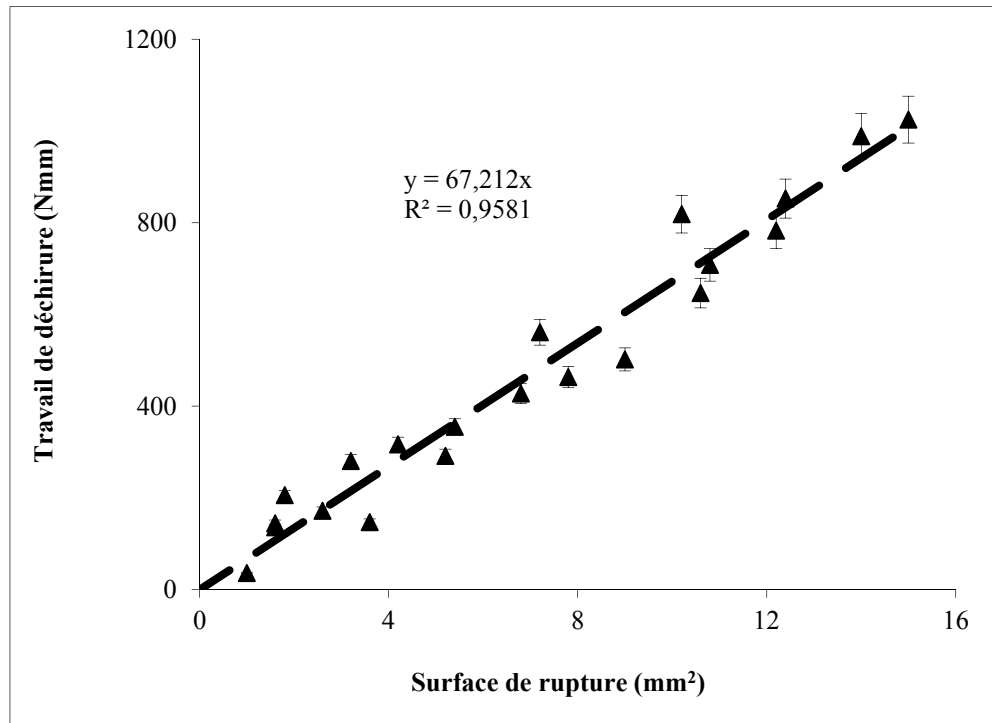


Figure 2.8 Courbe de la variation du travail de déchirure en fonction de la surface de rupture, issue d'essais de déchirure pantalon pour un tissu en coton

2.4.2 Configuration uni-axiale

Pour vérifier la validité du critère, des tests de chargement et déchargement ont également été menés à différents déplacements l sur des échantillons de configuration uni-axiale. La Figure 2.9 présente deux exemples de courbes de la force de déchirure obtenues pour deux différents déplacements l . Dans ce cas, au contraire de la méthode pantalon, dès que la force atteint la valeur maximale, l'échantillon se déchire brusquement. La propagation de la fissure dans le tissu est donc très rapide. De la même façon que pour la configuration pantalon, la variation du travail de rupture $-\Delta W$ est donnée par la différence entre W_1 et W_2 qui correspondent respectivement à deux longueurs de déplacement l_1 et l_2 . La quantité de travail et la surface ΔA (correspondant à $-\Delta W$) sont calculées par les équations suivantes :

$$-\Delta W = W_1 - W_2 \quad (2.18)$$

$$\Delta A = A_1 - A_2 \quad (2.19)$$

Le travail de rupture W est obtenu par l'équation suivante :

$$W = \int_0^L F_{déch}.dl \quad (2.20)$$

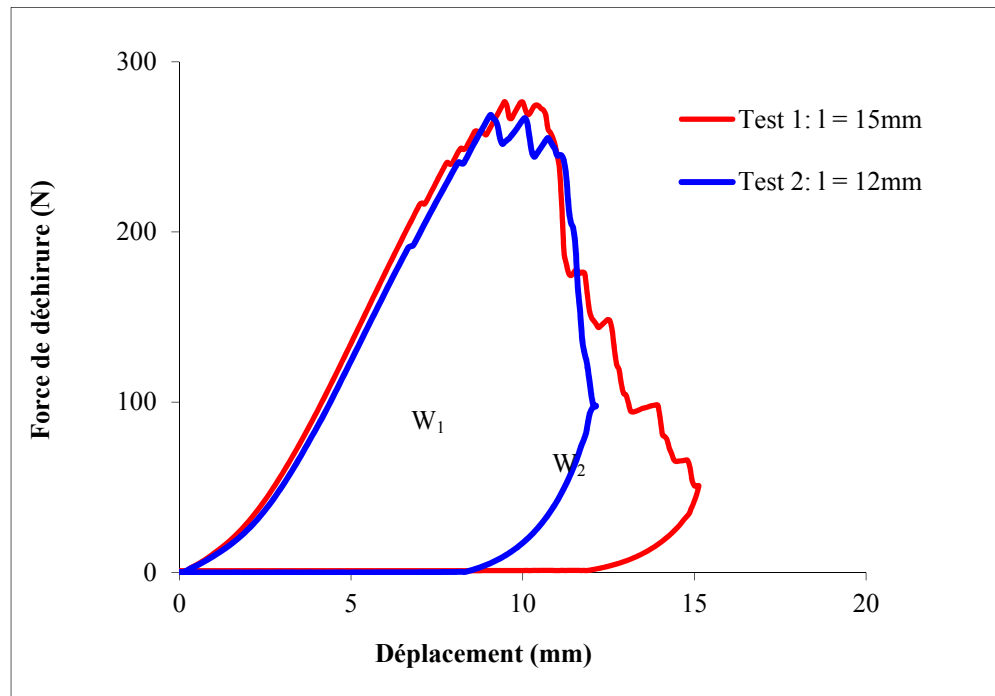


Figure 2.9 Courbes de déchirure force-déplacement à deux valeurs de déplacements l , issues d'essais de déchirure uni-axiale

Le travail de déchirure est exprimé en fonction de la surface de rupture obtenue à différents déplacement maximums l sur la Figure 2.10. La proportionnalité entre le travail de déchirure et la surface de rupture indique la possibilité d'appliquer aussi la configuration uni-axiale le critère de rupture exprimé sous forme d'énergie G_C à l'équation 2.5. Ces mesures réalisées dans la configuration uni-axiale donnent une valeur d'énergie G_C de rupture égale 68 N.mm/mm^2 . Cette valeur est très proche de celle qui est obtenue pour la configuration

pantalon. Ceci démontre que l'énergie de rupture G fournie par le critère de rupture ainsi développé est une propriété intrinsèque du matériau textile, donc indépendante de la géométrie de l'échantillon. Dans ce qui suit, ce critère va être appliqué pour étudier l'énergie de rupture de tissus de différentes armures, densités de fils et masses linéiques des fils.

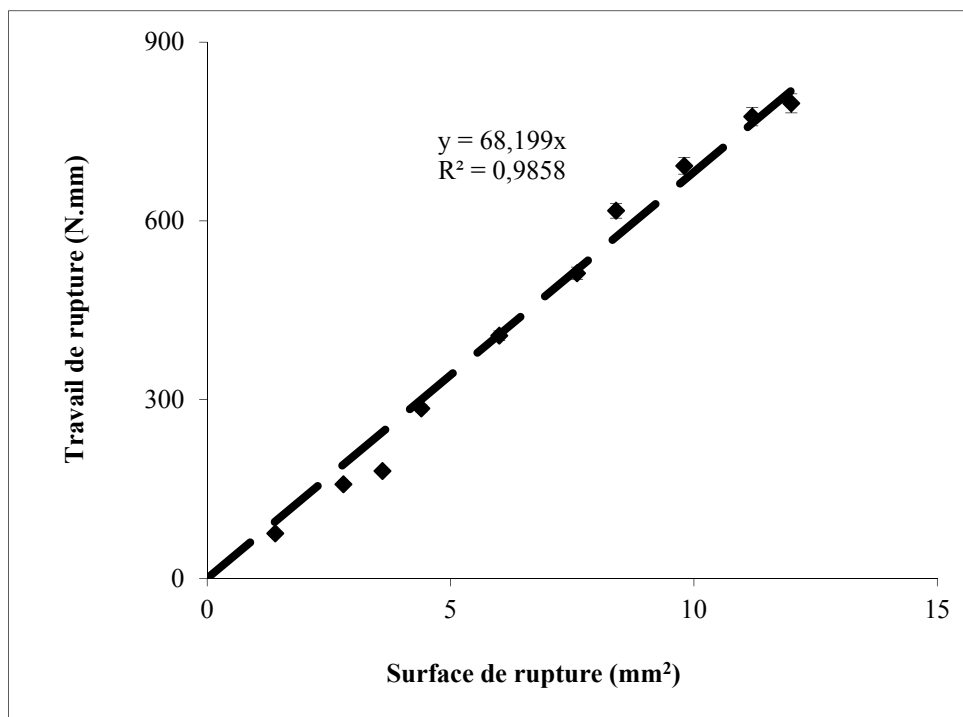


Figure 2.10 Courbe de la variation du travail de rupture en fonction de la surface de rupture, issue d'essais de déchirure uni-axiale pour le tissu en coton

2.5 Polyvalence du critère

Quand on cherche à établir un critère de rupture, on désire qu'il soit valable sur une large gamme de conditions expérimentales. À cette fin, la validité du critère de rupture a été testée sur deux configurations d'échantillon (pantalon et uni-axiale), sur trois types de matériaux (coton, mélange polyester/coton et polyester) ainsi que sur deux types d'armures (toile et sergé).

Des essais de déchirure selon les configurations pantalon et uni-axiale ont été effectués à différentes valeurs de déplacement l pour des tissus en mélange polyester/coton.

La Figure 2.11 montre une linéarité entre le travail de déchirure et la surface de rupture pour ces tissus en polyester/coton. Ce résultat indique que le critère de l'énergie s'applique également aux tissus en mélange polyester/coton. Par ailleurs, les valeurs de l'énergie G_C obtenues par les deux méthodes de déchirure sont très proches. Cela permet de confirmer ce qui avait déjà été observé avec le coton concernant le fait que les configurations pantalon et uni-axiale correspondent à la même valeur d'énergie de rupture.

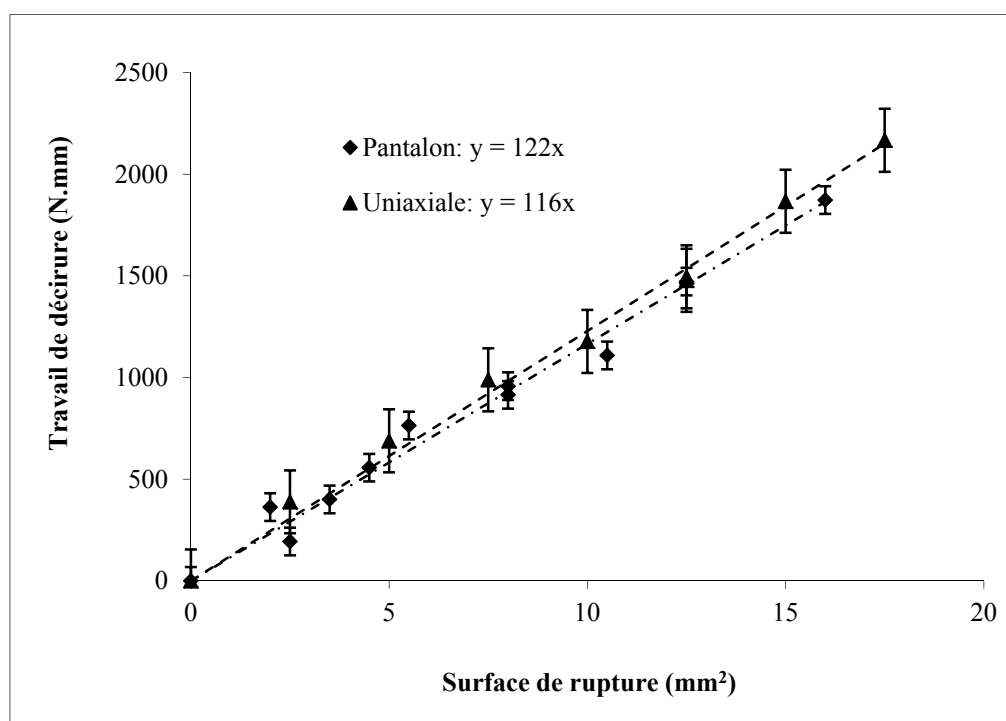


Figure 2.11 Courbes de la variation du travail de rupture en fonction de la surface de rupture, issues d'essais de déchirure pantalon et uni-axiale pour des tissus en mélange polyester/coton

Cette situation est largement différente de celle correspondant à d'autres matériaux comme les films polymères. En effet, pour ces matériaux, la rupture par la configuration pantalon est complètement différente de la rupture par la configuration uni-axiale. En particulier, tel que Wong et *al.* (2003) l'ont montré, la déformation plastique du matériau autour de la zone de rupture observée pour la configuration uni-axiale à double entaille (DENT) est plus importante que celle qui est obtenue pour la configuration pantalon. Par conséquent, des

valeurs différentes du travail total de déchirure sont obtenues pour ces deux configurations. Par contre, dans le cas des tissus, chaque fil contribue individuellement à la propagation de la fissure, qui est contrôlée par le glissement et le comportement à la rupture des fils de chaîne et de trame. Les mécanismes de déchirure étant les mêmes pour les méthodes de déchirure pantalon et uni-axiale, l'énergie de rupture est donc identique.

Des tests de déchirure pantalon ont également été menés sur des tissus en polyester d'armures différentes : toile et sergé. Les autres propriétés de ces tissus sont identiques, soit une masse linéique de valeur 33 Tex et une densité des fils de valeur 15 fils/cm. Les résultats obtenus sont illustrés par la Figure 2.12. On peut voir qu'une relation linéaire entre le travail de déchirure et la surface de rupture est obtenue aussi dans ces deux cas. Ces résultats indiquent que ce nouveau critère de rupture peut être appliqué à des tissus de différentes armures. Il peut également être observé que les valeurs d'énergie de rupture obtenues pour les deux armures sont très proches. Ce résultat, qui diffère de ce qui a été rapporté dans la littérature (Teixeira et al. 1955), sera discuté plus en détail dans la section de ce chapitre sur l'effet de l'armure sur l'énergie de rupture.

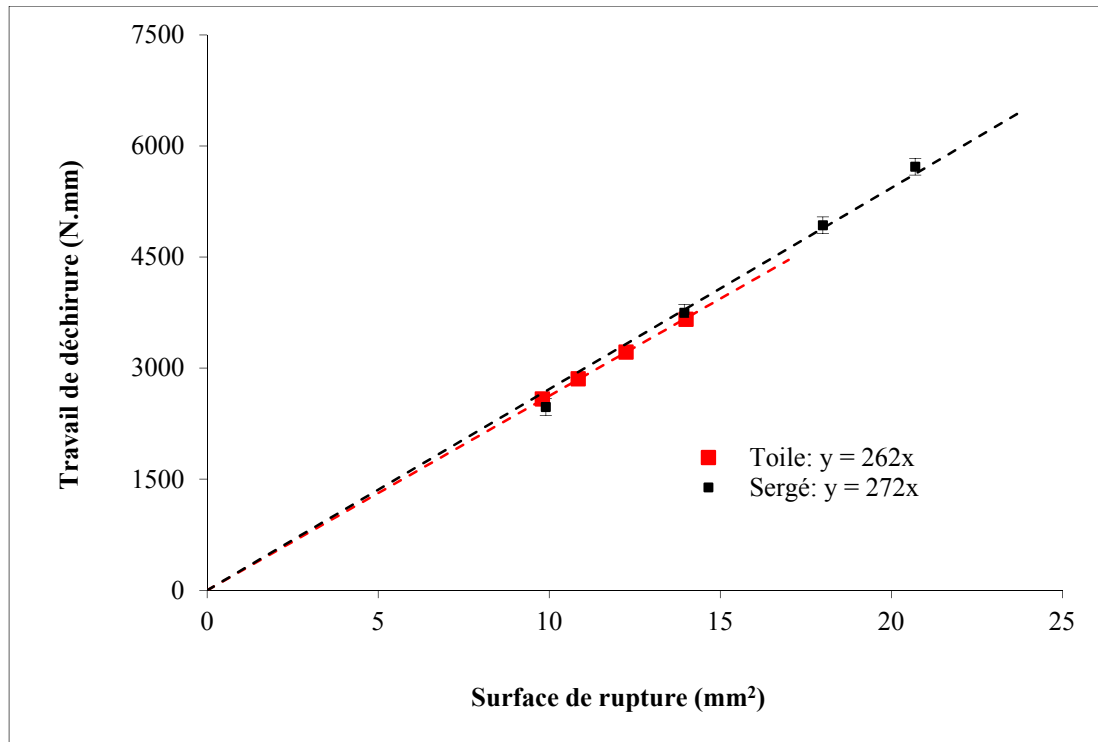


Figure 2.12 Courbes de la variation du travail de déchirure en fonction de la surface de rupture, issues d'essais de déchirure pantalon, pour deux armures toile et sergé en polyester

En conclusion de cette section, il apparaît que le critère de rupture défini par l'équation 2.5 et basé sur les principes de la mécanique de la rupture peut être appliqué indépendamment de la géométrie de l'échantillon, de l'armure du tissu et de la nature des fils. L'énergie de rupture correspondante, qui tient compte de la surface de rupture au contraire des travaux antérieurs menés par d'autres chercheurs, peut donc être considérée comme un paramètre intrinsèque des tissus.

2.6 Application de ce critère de rupture

Le nouveau critère de rupture qui a été développé précédemment est appliqué ici pour étudier l'effet de la densité des fils de trame, de la masse linéique des fils de trame et du type d'armure sur la résistance à la déchirure des tissus en polyester. Pour se faire, les échantillons sont découpés selon la direction des fils de chaîne. La configuration pantalon a été utilisée pour réaliser tous les tests de déchirure.

2.6.1 Effet de la densité des fils de trame

L'influence de la densité des fils de trame sur l'énergie de rupture est illustrée dans les Figures 2.13 et 2.14 respectivement pour l'armure toile et l'armure sergé. Un accroissement de la densité des fils se traduit par une hausse de l'énergie de rupture G . Cette tendance peut être attribuée à l'interaction entre les fils de chaîne et de trame. Effectivement, l'augmentation de la densité des fils de 12 à 15 fils/cm diminue le glissement des fils transversaux qui se trouvent dans la zone *Del*. Par conséquent, la déchirure du tissu est provoquée par la rupture des fils transversaux et non pas par leur glissement (observé dans le cas des tissus de densité 12 fils/cm). Or, selon Realff et al. (1991), la force de rupture des fils obtenue par glissement des fibres est inférieure à celle qui est associée à la rupture de ces mêmes fibres. Ceci explique donc l'augmentation de l'énergie de rupture G avec la densité des fils de trame.

Ces résultats sont complètement différents de ceux qui ont été rapportés dans la littérature. En effet, des nombreux auteurs (Krook and Fox 1945; Teixeira et al. 1955) ont montré que l'augmentation de la densité des fils dans le tissu fait diminuer la résistance à la déchirure. Ce résultat a été expliqué par Scelzo et al. (1994a). Ils indiquent que, en raison de la décroissance de la mobilité des fils longitudinaux dans le tissu due à l'augmentation de la densité des fils dans la structure, la force de friction entre les fils augmente et la taille de la zone *Del* diminue. Donc moins de fils sont disponibles pour supporter la charge. Par conséquent, la résistance à la déchirure du tissu diminue. Il est à noter que, dans le même article, Scelzo et al. (1994a) ont montré que ce résultat n'est pas toujours vrai. En effet, pour des tissus en coton de 65.7 Tex la force de déchirure diminue puis augmente quand la densité des fils transversaux diminue.

La différence entre nos résultats et ceux de la littérature peut être attribuée au fait que, dans le cas de nos échantillons, la densité des fils est faible par rapport aux tissus utilisés dans (Krook and Fox 1945; Teixeira et al. 1955). Le niveau de mobilité des fils est donc beaucoup plus élevé, ce qui permet le phénomène de déchirure par glissement des fils transversaux, lequel n'a pas été rapporté par ces auteurs.

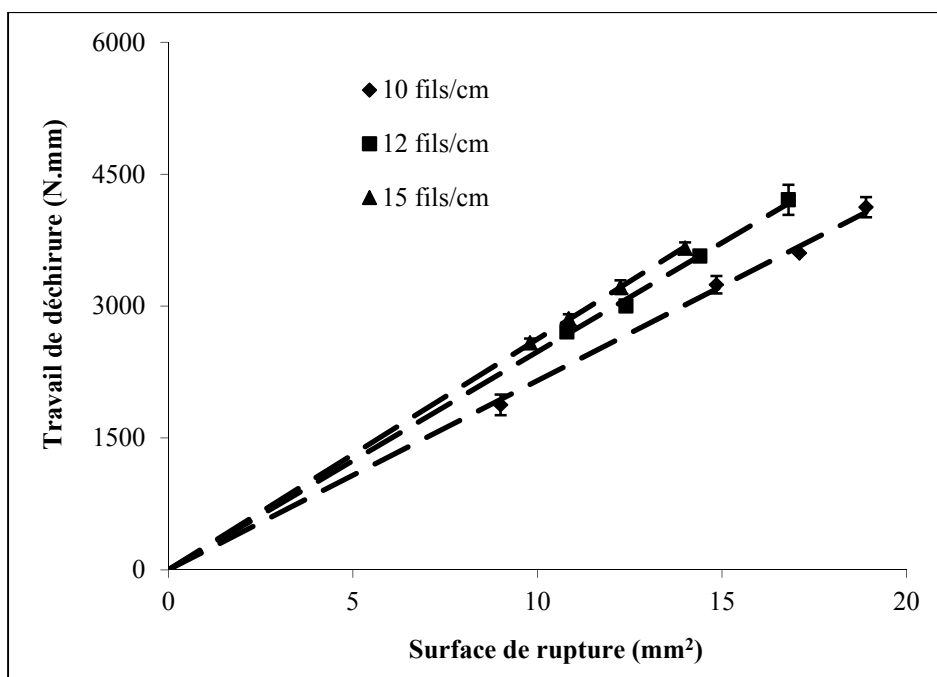


Figure 2.13 Courbes de la variation du travail de déchirure en fonction de la surface de rupture, issues d'essais de déchirure pantalon des tissus de 33 Tex et d'armure toile

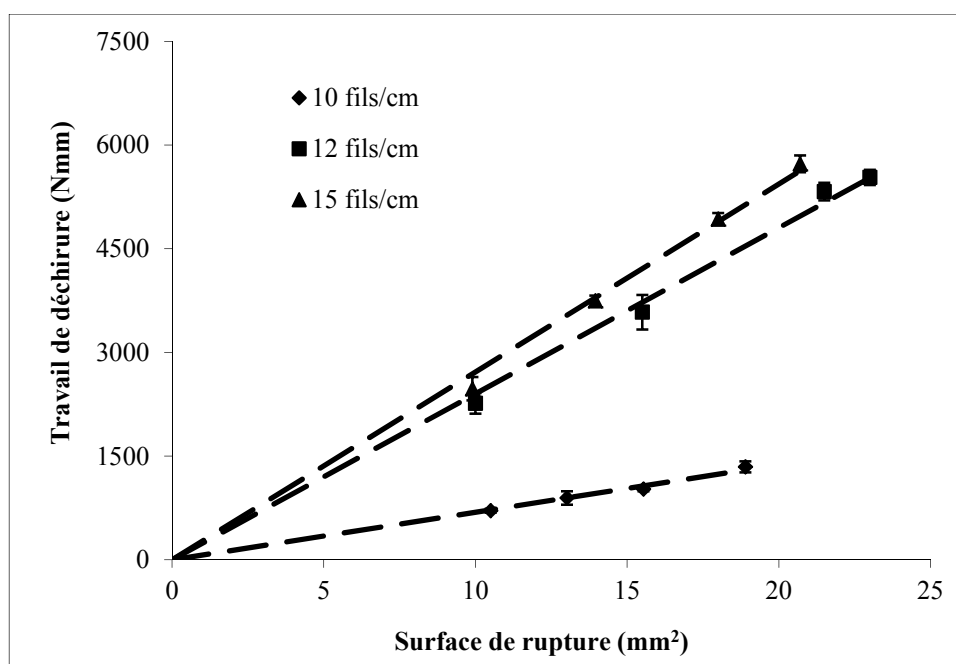


Figure 2.14 Courbes de la variation du travail de déchirure en fonction de la surface de rupture, issues d'essais de déchirure pantalon des tissus de 33 Tex et d'armure sergé

La Figure 2.15 illustre l'influence de la densité des fils de trame sur l'énergie de rupture pour l'armure toile et sergé. Une augmentation graduelle de l'énergie de rupture avec la densité des fils est observée pour l'armure toile. Par contre, pour l'armure sergé, l'énergie de rupture G_C est quasiment multipliée par trois lorsque la densité des fils passe de 10 à 12 fils/cm. Un accroissement plus limité de l'énergie de rupture est ensuite obtenu entre 12 et 15 fils/cm.

Cette différence de comportement peut être attribuée à l'évolution des contributions relatives des différents mécanismes de déchirure dans le processus de déchirure. Dans le cas de l'armure toile, la contribution du glissement des fils transversaux à la déchirure diminue graduellement avec l'augmentation de la densité des fils, jusqu'à atteindre une déchirure sans glissement à 15 fils/cm. Au contraire, dans le cas de l'armure sergé, le comportement évolue de déchirure par glissement des fils transversaux seul pour les tissus de 10 fils/cm à une combinaison de glissement et rupture pour les tissus de 12 fils/cm, et à une déchirure uniquement par rupture pour les tissus de 15 fils/cm. Ceci indique l'importance du phénomène de glissement des fils transversaux dans le processus de déchirure des tissus.

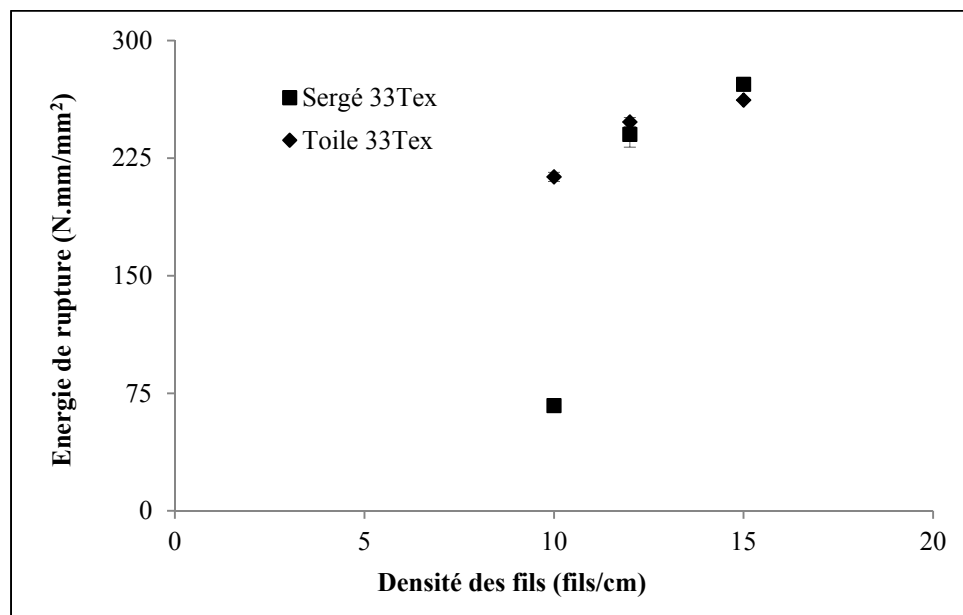


Figure 2.15 Diagramme de la variation de l'énergie de rupture en fonction de la densité des fils de trame, issues d'essais de déchirure pantalon des tissus de 33 Tex et d'armure toile et sergé

2.6.2 Effet de la masse linéique des fils de trame

L'influence de la masse linéique des fils de trame sur l'énergie de rupture a également été étudiée dans la configuration de déchirure pantalon. Celle-ci n'a pas encore été décrite dans la littérature. Les résultats obtenus pour l'armure toile et sergé sont illustrés respectivement dans les Figures 2.16 et 2.17. Quel que soit le type de l'armure, les résultats obtenus montrent que l'énergie de rupture augmente avec la masse linéique des fils de trame. Ces observations peuvent également être reliées à l'effet de glissement des fils transversaux qui augmente avec les fils de faibles masses linéiques. En effet, plus la masse linéique des fils de trame est faible, plus leur diamètre est petit, donc plus il y a d'espacement entre les fils voisins. Ceci engendre une grande mobilité des fils transversaux dans le tissu qui facilite leur glissement au moment de la déchirure. Ces conditions favorisent énormément la déchirure par glissement des fils. Par contre, aux valeurs de masse linéique des fils élevées (15 Tex et plus), le glissement des fils transversaux est disparu et la déchirure du tissu s'effectue uniquement par rupture des fils transversaux. Ceci mène à une énergie de rupture du tissu plus élevée.

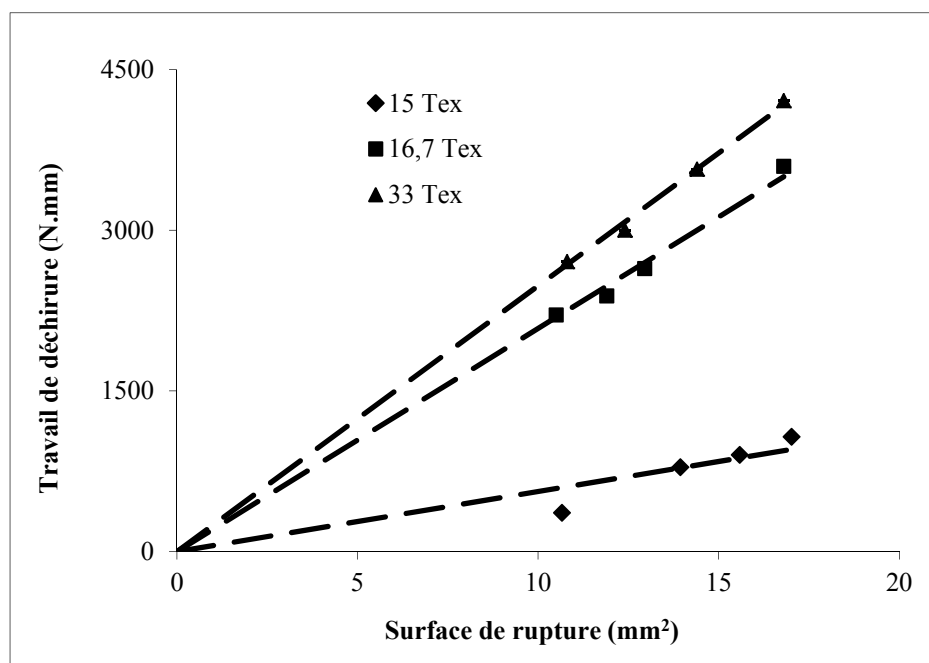


Figure 2.16 Courbes de la variation du travail de déchirure en fonction de la surface de rupture, issues d'essais de déchirure pantalon des tissus de 12 fils/cm et d'armure toile

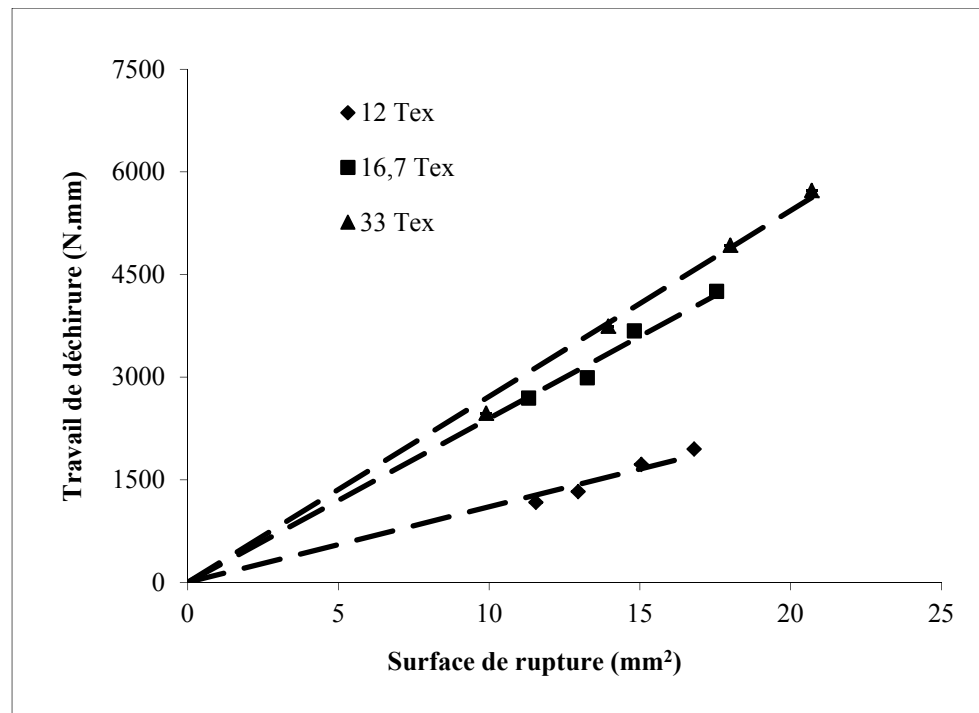


Figure 2.17 Courbes de la variation du travail de déchirure en fonction de la surface de rupture, issues d'essais de déchirure pantalon des tissus de 15 fils/cm et d'armure de sergé

La variation de l'énergie de rupture G_C en fonction de la masse linéique est illustrée à la Figure 2.18. La tendance semble similaire pour les deux armures, c'est-à-dire que l'augmentation de G_C avec la masse linéique est très rapide en dessous de 16,7 Tex et plus limité au-dessus de cette valeur. Ce résultat peut encore une fois être attribué au glissement des fils transversaux. En effet, pour les tissus de faible masse linéique (inférieure à 16,7 Tex) la déchirure du tissu se fait exclusivement par glissement des fils transversaux. Cela engendre une faible valeur de l'énergie de rupture G_C . Dans la zone intermédiaire se combinent glissement et rupture des fils transversaux. Finalement, pour les valeurs les plus élevées de masse linéique des fils, le glissement des fils transversaux a totalement disparu et la fissure se propage dans le tissu uniquement par rupture des fils, ce qui provoque une augmentation majeure de l'énergie de rupture G_C . Ce comportement illustre une fois encore l'importance du glissement des fils transversaux sur le comportement en déchirure du matériau.

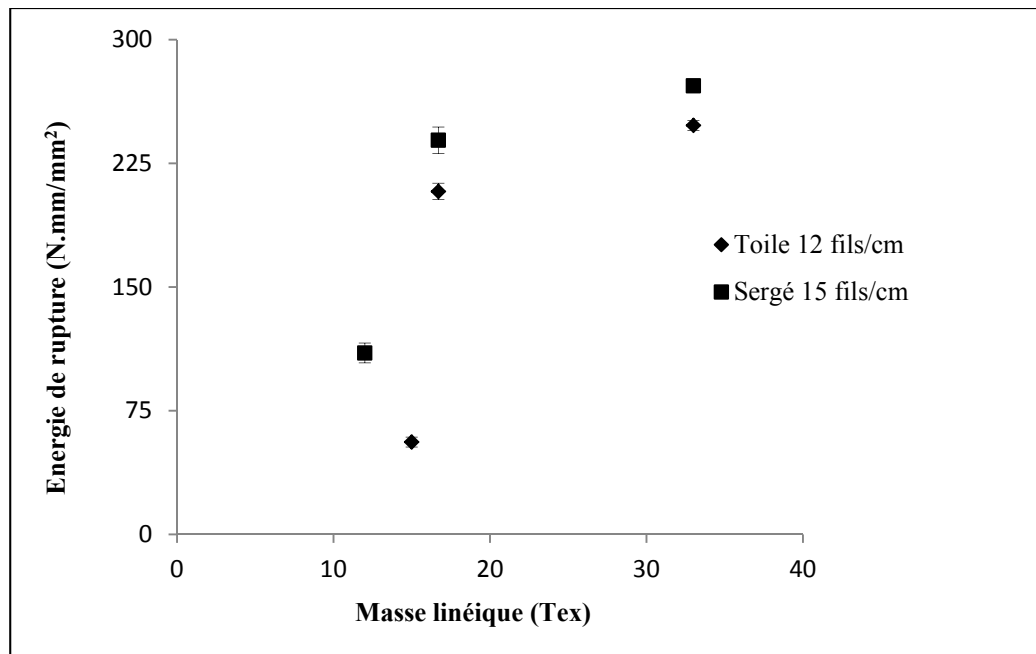


Figure 2.18 Diagrammes de la variation de l'énergie de rupture en fonction de la masse linéique des fils de trame, issus d'essais de déchirure pantalon des armures toile et sergé

2.6.3 Effet de l'armure

L'étude de l'effet du type de l'armure sur l'énergie de rupture G_C peut être réalisée à l'aide des résultats illustrés dans la Figure 2.15. À faible densité des fils de trame (10 fils/cm), l'énergie de rupture de l'armure de sergé est plus faible que celle de l'armure toile. Pour les tissus possédant une densité des fils de 12 fils/cm, les deux armures possèdent une énergie de rupture de valeur très proche. Et à 15 fils/cm, la tendance s'inverse et l'énergie de rupture de l'armure de sergé devient légèrement plus grande que celle de l'armure toile. Ce comportement est très différent de ce qui a été rapporté par Teixeira et *al.* (Teixeira et al. 1955). Dans leur cas, le tissu sergé était systématique plus résistant en déchirure que le tissu à armure toile. Ils avaient attribué ce résultat à la plus grande mobilité des fils longitudinaux dans l'armure de sergé, qui possède un nombre plus faible de points de croisement des fils. Cependant, leurs tissus avaient des valeurs de densité des fils beaucoup plus élevées que celles des échantillons utilisés dans ce travail. Leurs conclusions sont donc en accord avec les résultats obtenus ici pour les tissus de plus haute densité des fils, c'est-à-dire 15 fils/cm.

Par contre, dans le cas des tissus possédant une densité et une masse linéique des fils suffisamment faibles pour permettre le glissement des fils transversaux, l'armure de sergé montre une énergie de rupture plus faible que celle de l'armure toile. L'explication pour cette inversion peut être trouvée dans le fait que la mobilité des fils affecte les fils longitudinaux et transversaux avec des effets opposés. En effet, une augmentation de la mobilité des fils longitudinaux génère une augmentation de l'énergie de rupture G_C tel que rapporté dans la littérature (Krook and Fox 1945; Teixeira et al. 1955). À l'opposé, une augmentation de la mobilité des fils transversaux provoque une diminution de l'énergie de rupture G_C à cause de l'apparition de glissement des fils transversaux. Avec son faible nombre de points de croisement des fils de chaîne et de trame par motif, l'armure sergé apporte une plus grande mobilité à la structure textile. À haute densité des fils, cela permet une grande mobilité des fils longitudinaux, et donc une plus grande énergie de rupture que l'armure toile. Par contre, si la densité et la masse linéique des fils sont suffisamment faibles pour que le glissement des fils transversaux puisse se produire, la grande mobilité des fils transversaux dans l'armure sergé mène à une résistance à la déchirure du tissu plus faible que l'armure toile.

2.7 Discussion

Dans cette partie, nous allons tenter d'analyser le phénomène de déchirure des tissus obtenu par la configuration pantalon. Les mécanismes de déchirure des tissus ont été mis en évidence par plusieurs auteurs (Krook and Fox 1945; Teixeira et al. 1955; Taylor 1959; Hamkins and Backer 1980; Scelzo et al. 1994a; Witkowska and Frydrych 2008). Ces mécanismes de déchirure ont été décrits dans la section 1.3.2.2 : ils ne font mention que du glissement des fils longitudinaux pendant la propagation de la fissure dans le tissu. Or, un nouveau mécanisme de déchirure a été mis en évidence au cours de ce travail. En effet, nos essais de déchirure pantalon des tissus en polyester montrent l'existence d'un phénomène de glissement des fils transversaux en plus du glissement des fils longitudinaux. Lorsque l'on charge les fils longitudinaux, ils commencent à glisser transversalement pour former la zone *Del*. Ensuite, le chargement appliqué se transfère aux fils transversaux qui sont sollicités en tension et subissent éventuellement un glissement si les conditions sont réunies. En effet, l'occurrence de ce glissement des fils transversaux dépend fortement des caractéristiques du tissu (armure,

densité et masse linéique des fils). Tel que l'illustre la Figure 2.19, il peut contribuer à des degrés variables au processus de déchirure et à la rupture des échantillons. Par exemple, dans la Figure 2.19a, la contribution du glissement des fils transversaux au processus de déchirure est faible, avec seulement quelques fils affectés. L'existence d'un tel phénomène avec une faible contribution à la déchirure a déjà été rapportée par Hamkins et Backer (1980). Par ailleurs, tel qu'illustré dans la Figure 2.19b, les fils transversaux peuvent être soumis à un large glissement avant ultimement de rompre. Finalement, il est possible d'observer dans certains cas une déchirure des échantillons uniquement par le biais du glissement des fils transversaux, c'est-à-dire sans rupture des fils (Figure 2.19c). Il est donc possible d'identifier trois modes de déchirure des échantillons de tissus :

- mode de déchirure I: propagation de la fissure par rupture des fils transversaux;
- mode de déchirure II: propagation de la fissure par glissement/rupture des fils transversaux;
- mode de déchirure III: propagation de la fissure uniquement par glissement des fils transversaux.



Figure 2.19 Mécanismes de déchirure des structures textiles en polyester, issus des essais de déchirure pantalon : a) déchirure par rupture des fils transversaux avec faible glissement des fils transversaux; b) déchirure par glissement/rupture des fils transversaux; c) déchirure par glissement des fils transversaux (sans rupture)

Une autre illustration de ces trois différents modes de déchirure peut être trouvée dans l'allure des courbes force-déplacement obtenues par déchirure des échantillons. Tel que le montre la Figure 2.20, la courbe de déchirure correspondant au tissu de densité linéique de fils de 33 Tex est caractéristique du processus de déchirure standard décrit dans la littérature. Cette courbe présente deux parties. La première partie correspond à la déformation des languettes d'attache et à la formation de la première zone *Del*; la deuxième partie est associée à la phase de propagation de la fissure dans le tissu, qui inclut la rupture successive des fils transversaux. Dans le cas des tissus de densité linéique de fils de 16,7 Tex, un régime additionnel peut être observé entre les deux premiers. Il est dû au glissement partiel des fils transversaux. Ce cas correspond à l'échantillon illustré dans la Figure 2.19b. Finalement, dans le cas du tissu possédant des fils de masse linéique de 15 Tex, le glissement des fils transversaux domine tout au long de la déchirure du tissu. Ce glissement produit l'énergie de rupture la plus faible. Ce dernier type de déchirure a généralement été observé dans le cas des tissus qui possèdent la plus grande mobilité des fils, par exemple avec un faible nombre de points de croisement des fils par motif, une basse densité des fils et une faible masse linéique des fils.

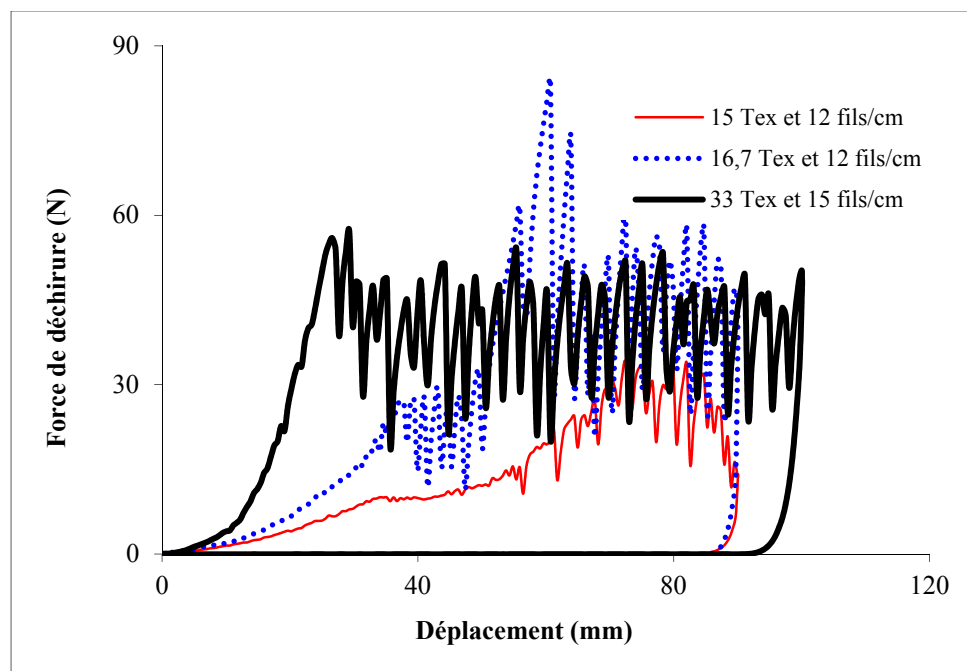


Figure 2.20 Exemple des courbes de déchirure force-déplacement, issues d'essais de déchirure pantalon des tissus d'armure toile

2.8 Conclusion

Dans ce chapitre, un critère de rupture simple et applicable à divers matériaux textiles a été proposé pour calculer l'énergie de rupture des tissus. Ce critère est basé sur la théorie de la mécanique de la rupture et a été validé par des résultats expérimentaux. Cette nouvelle approche permet de relier l'énergie de rupture G_C à la variation du travail de rupture ΔW nécessaire pour faire propager la fissure dans le tissu et à la variation de la surface de rupture ΔA . Ce critère a été vérifié avec succès sur différents matériaux, structures textiles et configurations de déchirure. Les résultats obtenus nous ont permis de considérer cette énergie de rupture G_C comme une propriété intrinsèque du matériau.

Les essais de déchirure en configuration pantalon nous ont aussi offert la possibilité d'identifier les différents mécanismes conduisant à la déchirure des tissus. Ces mécanismes de déchirure sont influencés par la densité et la masse linéique des fils de trame. Une innovation de ce travail est l'identification du mécanisme de glissement des fils transversaux, qui n'a pour l'instant pas été pris en compte par les autres chercheurs dans le domaine. Dans le cas de certains tissus, la déchirure s'amorce par le glissement des fils transversaux et se termine par leur rupture. Elle peut également aussi se produire par glissement seul. Des situations où la déchirure se passe sans glissement des fils transversaux ont également été obtenues. L'apparition du phénomène de glissement des fils transversaux a été reliée aux caractéristiques des tissus qui affectent la mobilité des fils dans la structure. Ce glissement des fils transversaux provoque une diminution de la valeur de l'énergie de rupture.

La sensibilité de ce critère de rupture aux caractéristiques des tissus nous incite à élargir notre étude afin d'exprimer l'énergie de rupture G_C en fonction des paramètres correspondants aux principaux mécanismes de déchirure.

CHAPITRE 3

MÉCANISMES ET MÉCANIQUE DE LA DÉCHIRURE DES TISSUS

3.1 Introduction

La résistance à la déchirure est considérée comme une propriété indispensable pour les matériaux textiles. Cette résistance est habituellement déterminée en appliquant une charge statique à un échantillon pré-fissuré. Pour caractériser cette propriété, dans le chapitre précédent, un critère de calcul de l'énergie de rupture des tissus a été élaboré en se basant sur la théorie de Griffith (1920) et de Rivlin et Thomas (1953).

Dans ce présent chapitre, les mécanismes de déchirure qui ont été présentés dans (Krook and Fox 1945; Teixeira et al. 1955; Taylor 1959; Hamkins and Backer 1980; Scelzo et al. 1994a; Witkowska and Frydrych 2008) seront caractérisés par différents tests mécaniques. En effet, certaines propriétés mécaniques des tissus telles que la déformation, le glissement, l'empilement et la rupture des fils, contribuent au phénomène de déchirure.

Par la suite, nous proposerons un nouveau modèle de calcul de l'énergie de rupture des tissus. L'énergie de rupture G_C sera exprimée en fonction de la force de rupture et de glissement d'un fil et des caractéristiques du tissu. Pour ce faire, des essais de déchirure, de traction, de glissement et d'empilement seront menés. Ces essais expérimentaux permettront de mettre en évidence tous les mécanismes conduisant à la déchirure finale du tissu. Les résultats obtenus offriront la possibilité d'étudier la relation entre les propriétés mécaniques du matériau textile et leur effet sur la déchirure.

3.2 Méthodologie et matériaux

3.2.1 Matériaux

Durant cette étude, des tissus d'armure toile et sergé possédant différentes valeurs de masse linéique et de densité des fils de trame sont utilisés pour développer un modèle d'énergie de rupture G . Les caractéristiques des tissus utilisés sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau 3.1 Caractéristiques des tissus testés

Armure	Fil chaîne (Tex)	Fil trame (Tex)	Densité : Trame x Chaîne (fils/cm)
Polyester			
Toile	17,2	33	10x48
		33	12x48
		33	15x48
		16,7	12x48
		15	12x48
Sergé		33	10x48
		33	12x48
		33	15x48
		16,7	15x48
		12	15x48
Polyester/Coton			
Toile	30	40	13x36
Sergé			19x28
Polyester			
Toile	18	24	18x29

3.2.2 Essais de déchirure pantalon

Les essais de déchirure qui sont menés pour faire ce travail sont des tests de déchirure pantalon (Figure 3.1). Ces essais ont été décrits dans la section 2.2.1.

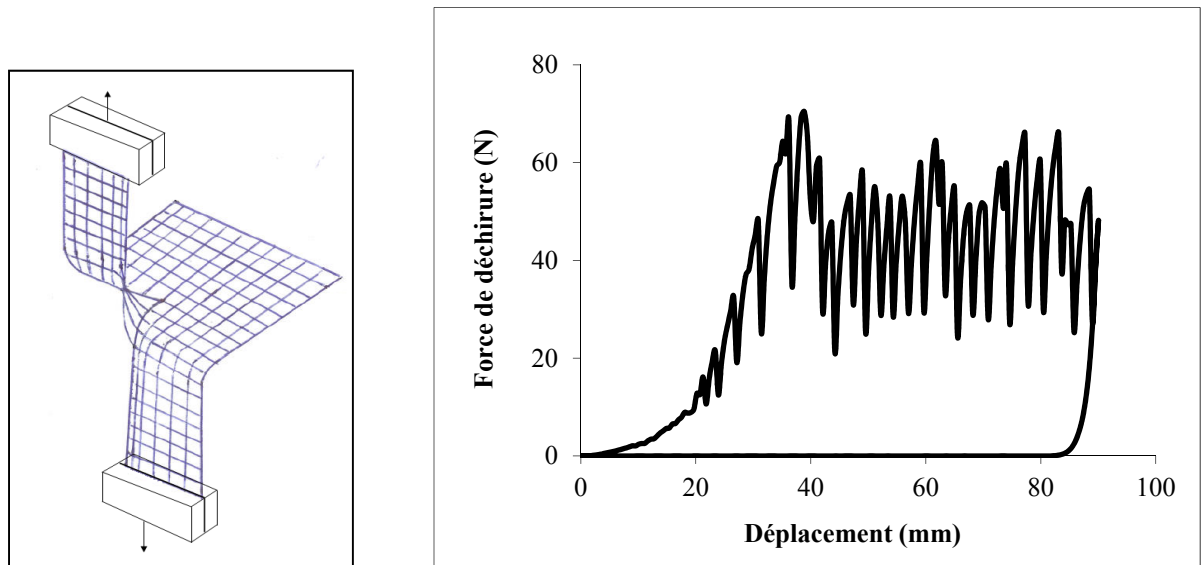


Figure 3.1 Configuration de déchirure pantalon; exemple de l'allure de la force déchirure lors d'un essai de chargement - déchargement

3.2.3 Essais de traction sur des tissus

Les essais de traction ont été menés sur des échantillons de forme rectangulaire de dimension 25x100 mm. Ces tests de traction monotones ont été effectués selon la direction des fils de trame sur la machine de traction MTS-Alliance à une vitesse de 300 mm/min. Lors de chaque test, la courbe force-déplacement a été enregistrée (Figure 3.2). La courbe de traction présente quatre parties. La première partie de la courbe correspond au transfert d'ondulation entre les fils de chaîne et les fils de trame. Elle permet de caractériser la résistance à l'ondulation des fils (Grosberg and Kedia 1966). La deuxième partie de la courbe apparaît linéaire; les fils de trame ne sont plus ondulés. Ici, la résistance à l'extension peut être déterminée. Cette résistance caractérise la rigidité du tissu (Grosberg and Kedia 1966). Clow et Taylor (1963) ont montré qu'entre 0 et 10% de la déformation, il y a une bonne linéarité entre la force de traction et le déplacement. Le module d'élasticité E_F des tissus a été calculé dans cette partie.

Dans la troisième partie, les fils de trame (fils longitudinaux) sont très tendus, ils glissent transversalement pour s'empiler sous l'effet de la charge appliquée (Realf 1994). Le diamètre de ces fils longitudinaux diminue et, en contrepartie, la flexion des fils transversaux augmente. À la fin de cette zone, l'empilement et la consolidation des fils longitudinaux (fils qui soutiennent la charge), la contraction (ondulation) des fils transversaux et l'écrasement des fils aux croisements peuvent être observés tels que décrits dans (Seo et al. 1993). La dernière partie correspond à la rupture totale de l'échantillon. La force F_{FB} et la déformation ϵ_{FB} à la rupture y sont déterminées.

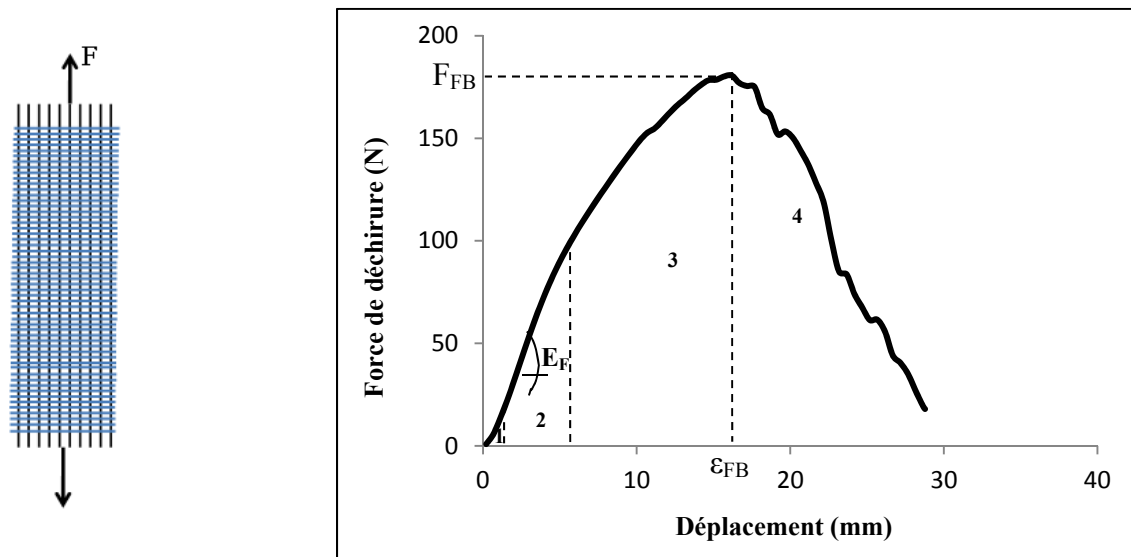


Figure 3.2 Essai de traction monotone; exemple de la courbe force-déplacement, issue d'un essai de traction réalisé sur des tissus selon la direction des fils de trame

3.2.4 Essais de traction sur un fil de trame

Des essais de traction monotones ont été réalisés sur les fils de trame. De même, ces essais ont été effectués sur la machine de traction MTS-Alliance à une vitesse de 300 mm/min. Les fils ont une longueur de 100 mm. La Figure 3.3 illustre un exemple de la courbe force-déplacement correspondant à un essai de traction d'un fil. Cette courbe présente quatre zones. Le module d'Young du fil E_Y est calculé dans la partie linéaire. Cette partie survient après une phase initiale de suppression de l'ondulation du fil. La troisième partie est une zone étendue

de comportement non linéaire dans laquelle le diamètre du fil diminue. La dernière partie présente des pics qui correspondent à la rupture des filaments. Dans cette partie, le comportement à la rupture est déterminé. Des glissements des fibres après la rupture sont mis en évidence par la présence de pics supplémentaires (Realff et al. 1991).

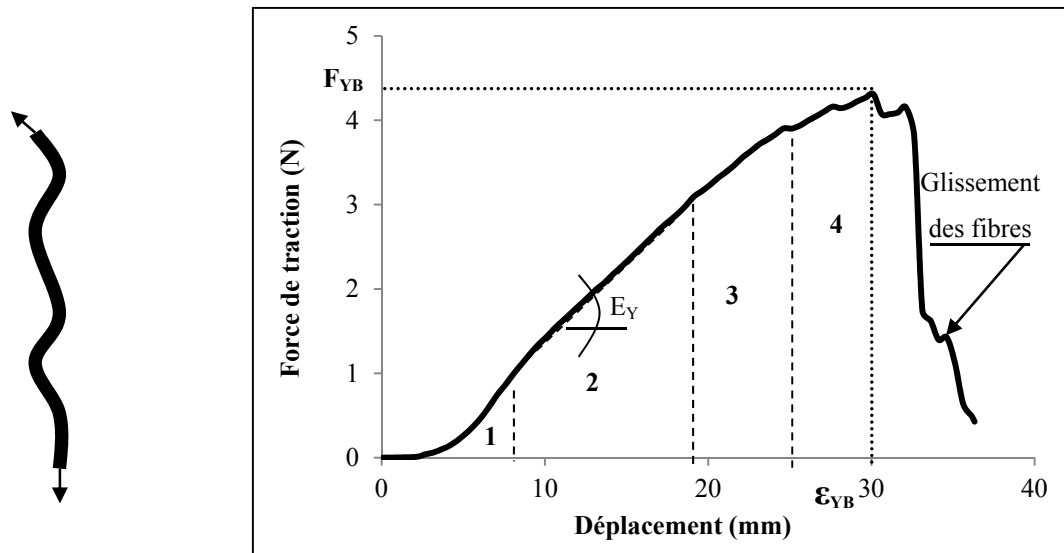


Figure 3.3 Essai de traction monotone; exemple de la courbe force-déplacement, issue d'un essai de traction effectué sur un fil de trame

3.2.5 Essais de glissement d'un fil

Le glissement des fils est un comportement important pour faire propager une fissure dans un tissu (Realff 1992). Ce comportement est lié à la friction des fils et aux caractéristiques du tissu. Les essais de glissement d'un fil de trame dans une structure textile pré-chargée sont basés sur les travaux de Scelzo et *al.* (1994a). Les échantillons testés ont une dimension de 50x25 mm. Chaque échantillon contient en son centre un fil de trame à extraire de longueur totale de 50 mm. Les pré-charges appliquées ont des valeurs comparables aux forces minimales supportées par les languettes d'attaches pendant un test de déchirure. Selon les cas, celles-ci sont situées entre 5 et 20 N. Ces tests ont été effectués sur une machine de traction Instron à une vitesse de 130 mm/min. L'essai consiste à fixer le fil à extraire du tissu dans la mâchoire mobile de la machine afin de l'arracher totalement du tissu (Figure 4.4). La courbe de glissement force-déplacement obtenue (voir Figure 3.4) est similaire aux résultats

rapportés dans (Scelzo et al. 1994a; Kirkwood et al. 2004). Elle comporte trois phases. Le début de la courbe est associé à la suppression de l'ondulation du fil à extraire. La seconde est caractérisée par un comportement linéaire. Le module de glissement utilisé par (Scelzo et al. 1994a; Dolez et al. 2011) dans leur modèle était obtenu par la pente de cette droite. Dès que la force de glissement atteint une valeur maximale F_S , le fil commence à glisser dans le tissu. Ce glissement à travers la structure du tissu provoque l'apparition de plusieurs pics successifs (voir Figure 3.4). Chaque pic correspond au passage du fil à travers un point d'entrecroisement des fils de chaîne et de trame. Cette force F_S est utilisée ici pour caractériser la résistance au glissement des fils à travers les échantillons de tissu.

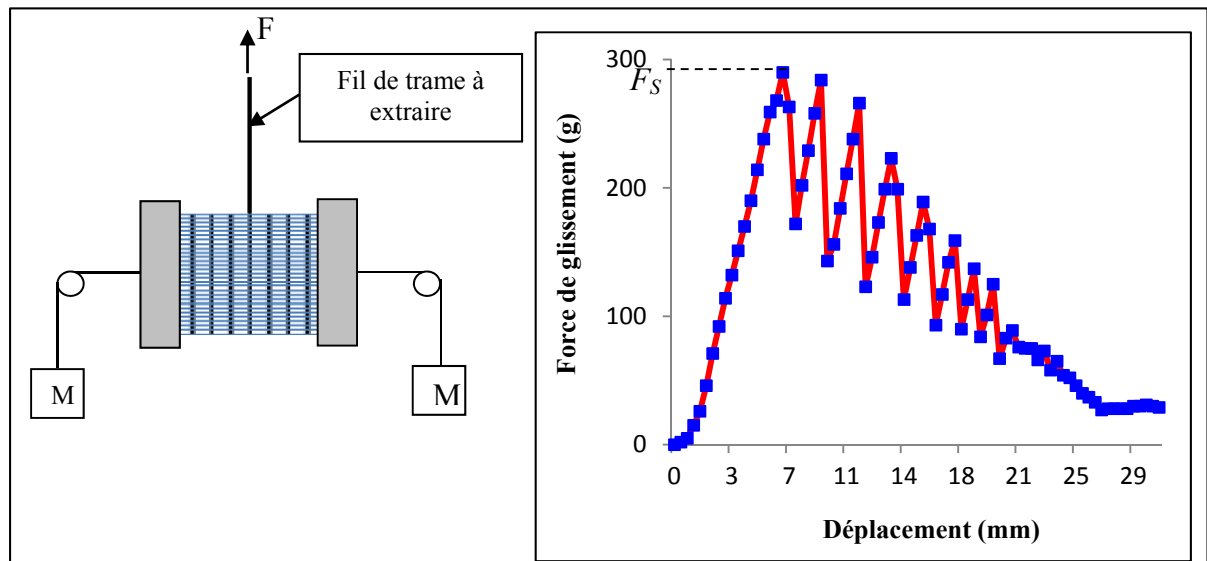


Figure 3.4 Essai de glissement d'un fil de trame dans une structure textile; exemple de la courbe de glissement force-déplacement

3.2.6 Essais d'empilement des fils

Pendant le processus de déchirure des tissus, l'empilement des fils transversaux avant la rupture a été considéré comme un des mécanismes responsables de la propagation de la fissure dans le matériau. D'après Teixeira et al. (1955), les fils empilés dans la zone *Del* supportent une large part de la force de déchirure. En conséquence, ce mécanisme a été pris en considération dans la modélisation de l'énergie critique de déchirure G . Pour ce faire, des essais de la simulation de l'empilement des fils au moment de la déchirure ont été réalisés.

Ces essais sont basés sur le travail de Scelzo et *al.* (1994a). Un crochet en acier a été utilisé pour provoquer l'empilement des fils. Les échantillons testés ont une dimension de 50x50 mm. Tous les tests ont été réalisés sur la machine de traction MTS-alliance à une vitesse de 100 mm/min. L'essai d'empilement des fils consiste à fixer l'échantillon dans la mâchoire fixe de la machine et le crochet de son bout supérieur dans la mâchoire mobile. L'autre extrémité du crochet est incorporée dans le tissu (voir Figure 3.5). Dès que le crochet commence à se déplacer vers le haut, les fils transversaux (fils de trame) se déforment puis glissent transversalement jusqu'à ce qu'ils atteignent un empilement maximal. Pour les tissus de basse densité des fils et de faible masse linéique des fils, ce glissement des fils avant leur empilement peut être relativement important, ce qui engendre une diminution de la force d'empilement. Après l'atteinte du premier maximum de la force, qui correspond à l'empilement maximal, le crochet ne peut continuer à se déplacer qu'en provoquant la rupture des fils. Des maxima secondaires sont observés avec le déplacement de la zone d'empilement à chaque rupture de fil. Tout ce processus est mis en évidence par la Figure 3.5. La force d'empilement F_J est donnée par la valeur du premier pic de la courbe.

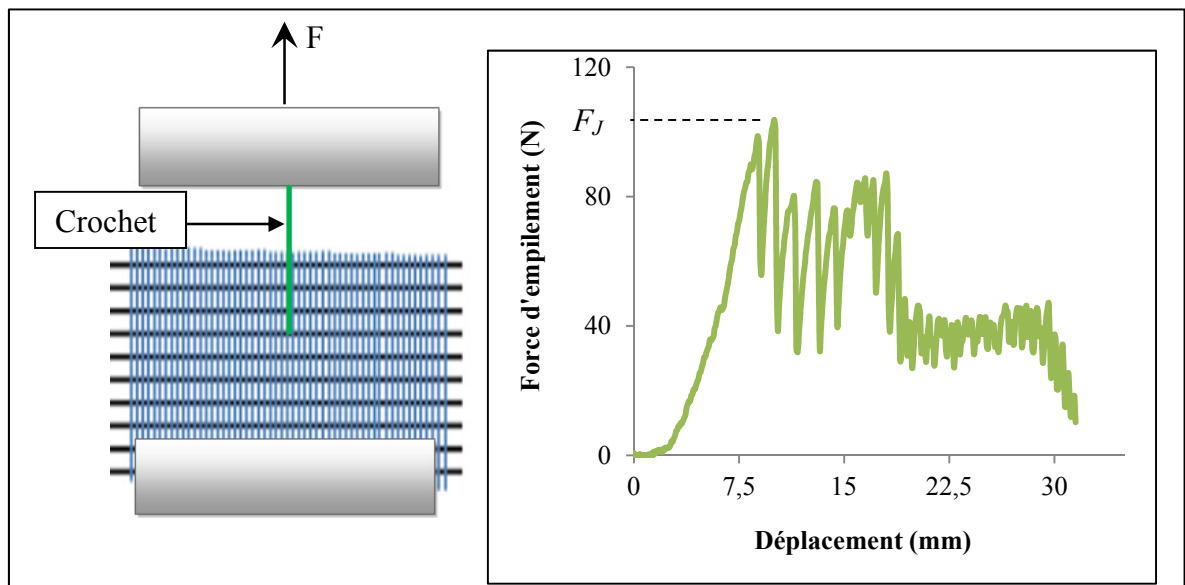


Figure 3.5 Essai d'empilement des fils de trame dans une structure textile;
exemple de la courbe d'empilement force-déplacement

3.3 Étude de l'influence des caractéristiques du tissu sur leurs propriétés mécaniques

La déchirure des tissus fait partie des sujets les plus complexes à étudier (matériaux orthotropes, mécanismes mis en jeu, etc.). Ainsi, des tests mécaniques ont été réalisés sur différents tissus afin de comprendre la contribution de chaque propriété mécanique des tissus à la propagation de la fissure. D'une part, cette approche sera utile pour étudier l'influence des caractéristiques des tissus sur les différentes propriétés mécaniques du matériau; d'autre part, elle permet de déterminer la relation entre l'énergie de rupture et ces propriétés mécaniques. Les résultats obtenus, couplés à une étude analytique, offrent la possibilité d'élaborer un modèle de calcul de l'énergie de rupture.

3.3.1 Essai de déchirure

Les Figures 3.6 et 3.7 illustrent l'évolution de l'énergie de rupture G_C en fonction de la masse linéique des fils et de la densité des fils de trame. L'augmentation de ces caractéristiques conduit à une élévation substantielle de la valeur de G_C . Comme cela a été mis en évidence dans le chapitre 2, cet effet est lié au glissement des fils dans le tissu. En effet, la déchirure des tissus de basse densité des fils et de faible masse linéique des fils est obtenue uniquement par glissement des fils transversaux. Cela engendre une énergie de rupture beaucoup plus faible que celle correspondant à une déchirure sans glissement des fils, qui a été observé avec les tissus de haute densité des fils et de grande masse linéique des fils. À titre d'exemple, les tissus fabriqués par des fils de 15 Tex (dans la Figure 3.6) et les tissus contenant des fils de 10 fils/cm (dans la Figure 3.7) présentent la valeur de l'énergie G_C la plus faible. Dans ce cas, la déchirure est totalement produite par glissement des fils transversaux. Par contre, les tissus fabriqués par des fils de 33 Tex (dans la Figure 3.6) et les tissus possédant des fils de 15 fils/cm (dans la Figure 3.7) montrent une énergie de rupture G_C plus élevée. Ici, la déchirure est produite uniquement par rupture des fils transversaux, qui constitue le mécanisme de déchirure le plus connu pour les tissus. Entre ces deux cas extrêmes, la propagation de la fissure dans le tissu se produit par combinaison de glissement et de rupture des fils transversaux. Il est à noter que ces résultats sont en contradiction avec ceux rapportés par (Teixeira et al. 1955), qui avaient observé une diminution de la résistance à la déchirure lors

de l'augmentation de la densité des fils. Cependant, ces auteurs avaient travaillé avec des tissus de haute densité des fils.

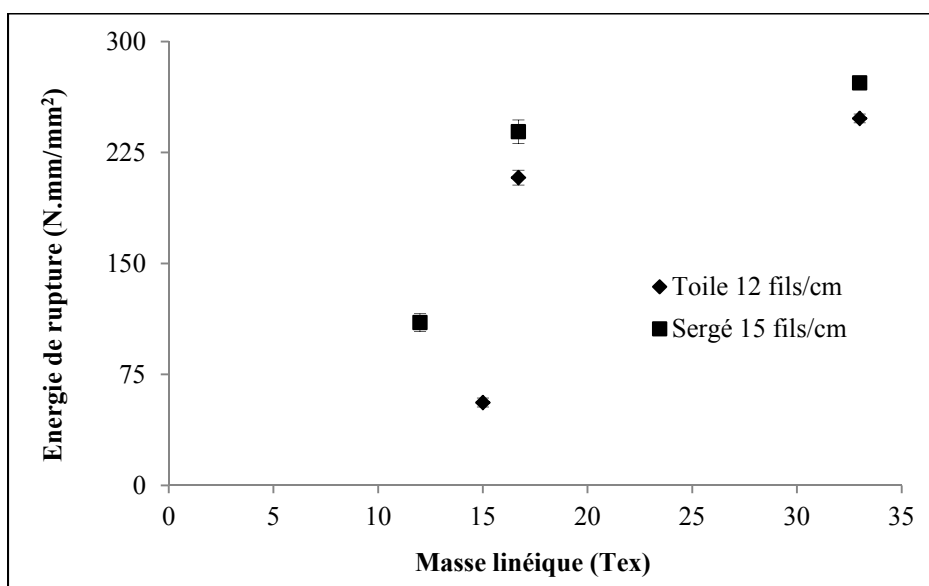


Figure 3.6 Variation de l'énergie de rupture en fonction de la masse linéique des fils transversaux pour des tissus en polyester

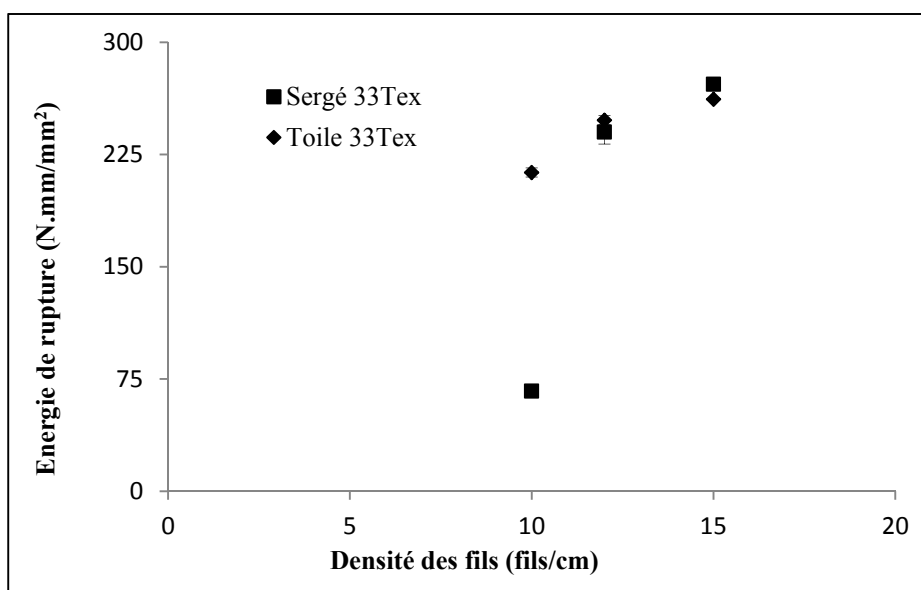


Figure 3.7 Variation de l'énergie de rupture en fonction de la densité des fils transversaux pour des tissus en polyester de 33 Tex

3.3.2 Essais de traction sur les tissus

3.3.2.1 Mécanismes de traction

Les essais de traction sont couramment réalisés pour déterminer les propriétés mécaniques des tissus. Les principales propriétés qu'on peut dégager des courbes obtenues (Figure 3.8) sont la force à la rupture, l'allongement à la rupture et le module initial. Ainsi, la Figure 3.8 met en évidence l'effet de certaines caractéristiques des tissus sur leur comportement en traction. Il est possible de voir que les tissus de faible masse linéique des fils et de basse densité des fils de trame présentent l'allongement à la rupture le plus élevé, tandis que leur module initial et leur force à la rupture sont les plus faibles. Ce résultat est lié à l'effet de la friction et de la cohérence entre les fils qui devient plus important lorsque la densité et la masse linéique des fils augmentent (Salem et al. 1995).

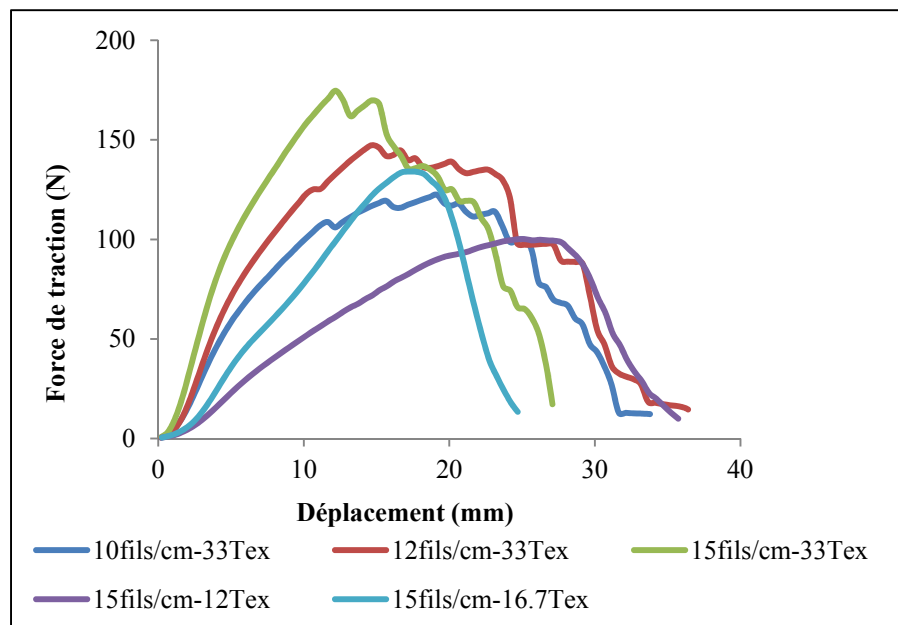


Figure 3.8 Exemple de courbes force-déplacement d'un essai de traction monotone des tissus de différentes densités et masses linéiques des fils

La réponse d'un tissu à une sollicitation en traction met en jeu quatre mécanismes principaux: un processus de transfert d'ondulation, le glissement des fils, l'empilement de ces fils, et

finalement la rupture totale de l'échantillon (Realff 1994). Ces mécanismes seront détaillés dans ce qui suit.

Au début de la sollicitation du tissu en traction, un processus de transfert d'ondulation se produit entre les fils de chaîne et de trame. En effet, les fils longitudinaux se redressent progressivement sous l'effet de faibles charges. Leur ondulation est transférée aux fils transversaux (Figure 3.9) (Van Santrvoort 1994).

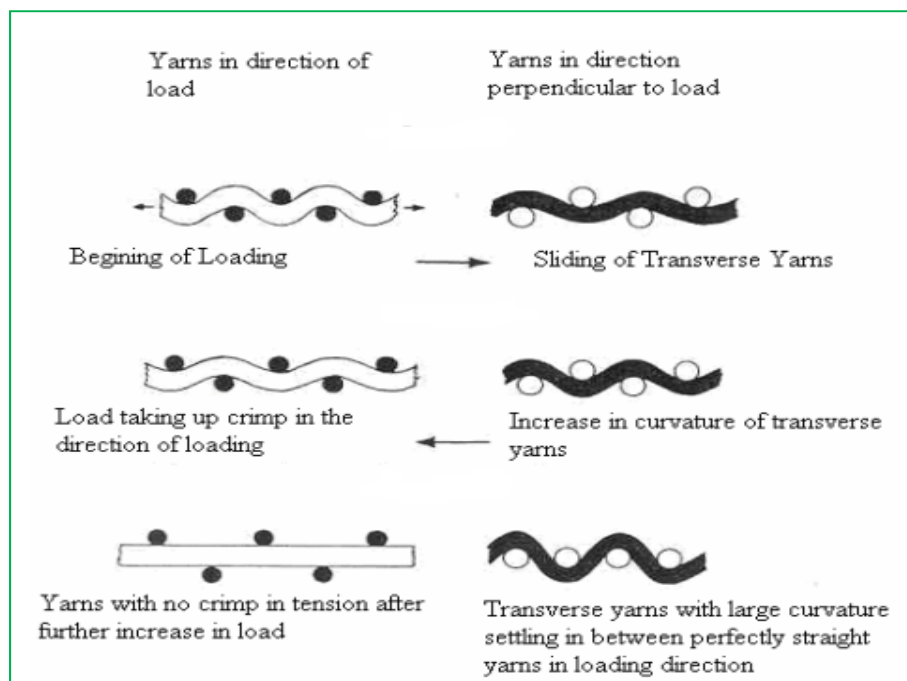


Figure 3.9 Interaction des fils de chaîne et de trame pendant un essai de traction d'un tissu Tirée de Van Santrvoort (1994)

Un processus d'empilement des fils longitudinaux et donc de contraction du tissu est aussi observé avant la rupture totale des tissus. Dans le cas des tissus qui contiennent des fils de 33 Tex et une densité des fils de 15 fils/cm, le phénomène d'empilement des fils est limité. En effet, ces tissus sont caractérisés par une bonne cohésion et un faible espacement entre les fils. Par conséquent, l'empilement des fils nécessite une énergie élevée. Cela peut éventuellement engendrer une augmentation de la rigidité et de la force à la rupture du tissu. Par contre, dans les tissus de faible masse linéique (15 Tex) et densité des fils (< 12 fils/cm), les fils

transversaux possèdent une faible ondulation, qui peut donc augmenter sous l'effet de la sollicitation. Une contraction importante du tissu est donc observée avant la rupture (Figure 3.10). Le phénomène d'empilement des fils longitudinaux est ainsi nettement dominant pendant un essai de traction dans le cas des tissus de masse linéique et de densité des fils réduite.

Pendant un essai de traction des tissus, le dernier mécanisme observé est la rupture des fils. Durant cette phase, un écrasement des points de croisements des fils de chaîne et de trame, une grande flexion des fils transversaux et une rétraction des fils longitudinaux ont été observés. La Figure 3.10 illustre deux faciès de rupture qui ont été obtenus à la suite d'essais de traction. Chaque faciès présente à la fois une zone perturbée (« disruption zone »), où le tissu est fortement déformé en raison de la distorsion de ses fils, et une zone endommagée (Realff 1994). Cette deuxième zone est caractérisée par une rupture des fils sans propagation de la fissure dans le tissu, ou rupture locale (« isolated break ») (Realff 1994).

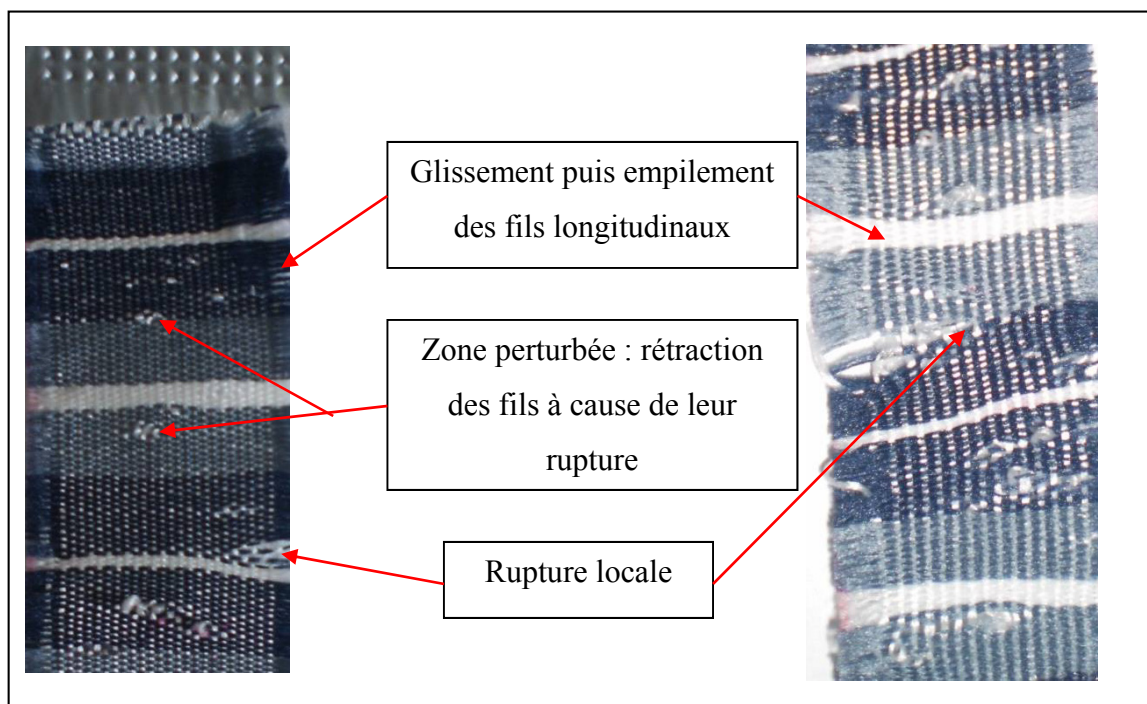


Figure 3.10 Mécanismes de déformation et de rupture des tissus observés lors d'un essai de traction

3.3.2.2 Propriétés mécaniques des tissus

3.3.2.2.1 Module initial

La réponse élastique du tissu est caractérisée par le module initial de la courbe force-allongement qui est obtenue pendant un essai de traction monotone. Ce module mesure la résistance à l'extension des tissus. Il dépend de trois paramètres (Grosberg and Kedia 1966):

- le module de rigidité des fils;
- les conditions extérieures (température, humidité, charge, etc.);
- les caractéristiques du tissu (densité et masse linéique des fils).

L'étude de l'énergie de rupture G_C en fonction du module initial E_F du tissu permet de constater deux différentes situations. La Figure 3.11 montre dans la première partie ($G_C < 110$ N.mm/mm²) que la variation de l'énergie G_C en fonction du module E_F est un nuage de points. Dans cette partie, la mobilité des fils dans le tissu est importante. Ainsi, la rigidité du tissu est faible. Pour ces trois tissus, la propagation de la fissure a été obtenue par le glissement des fils transversaux; aucune rupture des fils n'a eu lieu. Dans ces circonstances, la résistance élastique du matériau ne semble pas contribuer à la déchirure du tissu. Ce résultat se traduit par l'absence de concordance entre la variation de l'énergie G_C et du module E_F .

La deuxième partie ($G_C > 110$ N.mm/mm²) montre une variation linéaire de deux propriétés mécaniques. En effet, l'augmentation de la résistance élastique du tissu s'accompagne d'une élévation de son comportement en déchirure. Cette tendance révèle que la résistance élastique du tissu contribue largement à sa déchirure. Ce résultat peut possiblement se justifier par le fait que ces deux propriétés sont fortement liées à la rigidité des fils. Cela sera détaillé dans les sections suivantes.

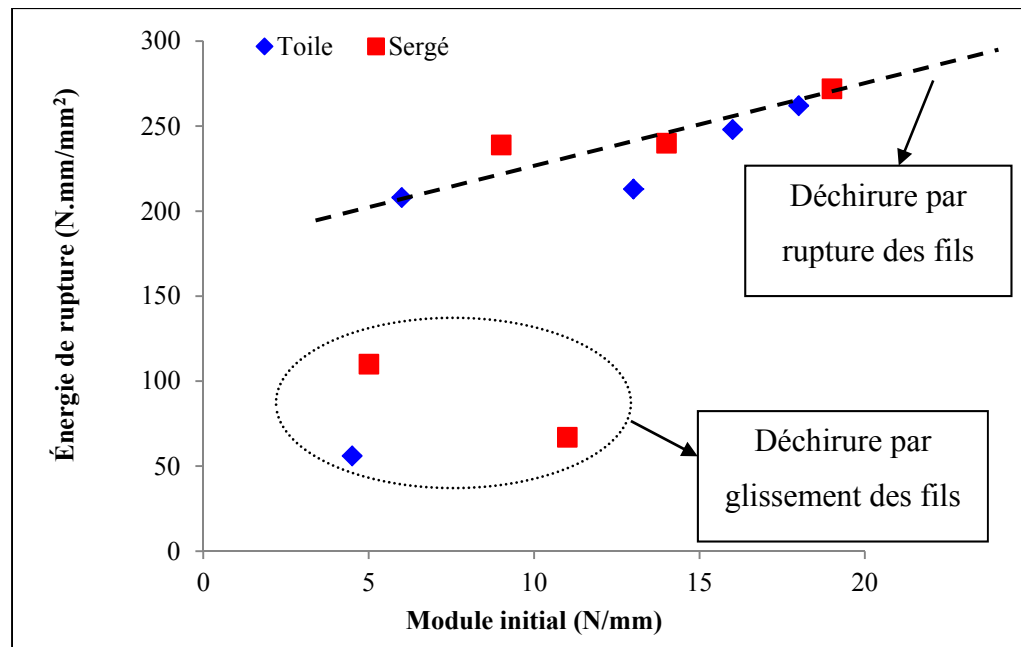


Figure 3.11 Variation de l'énergie de rupture des tissus en fonction de leurs modules initiaux

Généralement, la Figure 3.11 montre que l'énergie de rupture G_C augmente en fonction du module initial E_F des tissus. Cela peut être justifié par les résultats qui ont été présentés par les Figures 3.6 et 3.7 ainsi que les Figures 3.12 et 3.13. Ces figures montrent la même évolution de la variation de l'énergie de rupture et du module initial en fonction de la masse linéique et la densité des fils.

La masse linéique des fils joue un rôle déterminant en ce qui a trait à la rigidité des tissus. Sa variation change d'une manière significative le module initial du tissu. En effet, l'augmentation de la masse linéique des fils conduit à l'augmentation du module E_F (Figure.12) (Salem et al. 1995). Ces observations sont similaires aux travaux réalisés par Dhigra et al. (1981) qui montrent une corrélation linéaire entre la masse linéique des fils et le module initial E_F du tissu. Ce comportement peut probablement être attribué à l'augmentation de la rigidité des fils en fonction de sa masse linéique.

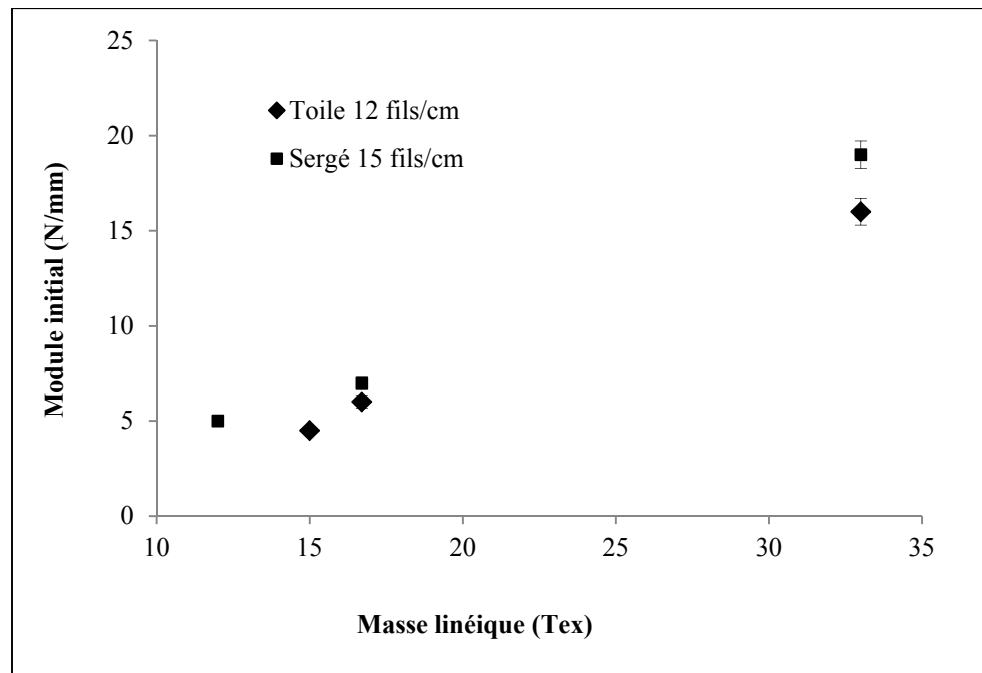


Figure 3.12 Diagramme de la variation du module initial des tissus en fonction de la masse linéique des fils longitudinaux pour une armure toile et sergé en polyester

L'influence de la densité des fils de trames sur le module initial E_F du tissu fait aussi partie de cette section. Ce module E_F augmente en fonction de la densité des fils (Figure 3.13). Ce résultat est similaire à celui qui a été obtenu par Salem et *al.* (1995) et Grosberg et Kedia (1966). Ces derniers montrent que l'augmentation de la densité des fils de 51 à 59 fils/in engendre une élévation du module initial de 0,2 à 0,3 g/cm pour des tissus en coton. Cette tendance du module initial qui se manifeste par une élévation de la rigidité du matériau peut être justifiée par l'augmentation de la cohésion du tissu en fonction de la densité des fils.

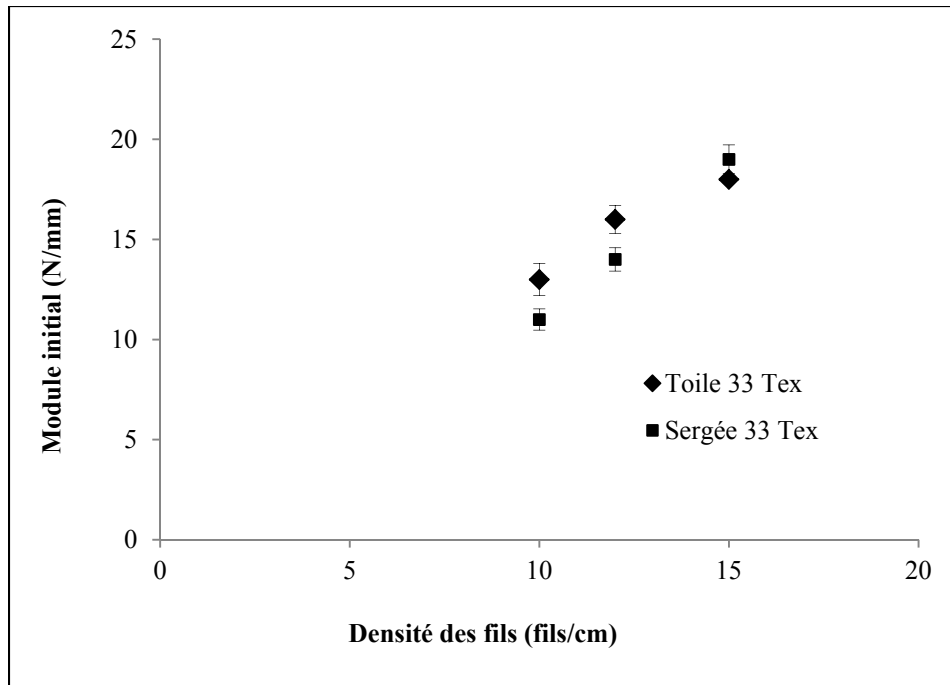


Figure 3.13 Diagramme de la variation du module initial des tissus en fonction de la densité des fils longitudinaux pour une armure toile et sergée de 33 Tex en polyester

D'un autre côté, cette tendance de la variation du module initial des tissus en fonction des caractéristiques des fils peut être expliquée par l'effet de la pression latérale entre les fils qui est devenue importante avec l'augmentation de la masse linéique et de la densité des fils.

3.3.2.2.2 Force à la rupture

Pendant la déchirure des tissus, il semble que l'énergie de rupture G_C soit liée à la force de rupture du tissu. Cela peut être remarqué à la Figure 3.14. Cette relation peut être établie en tenant compte de deux différentes zones. La première zone correspond à la déchirure des tissus par glissement des fils (propagation de la fissure sans rupture des fils). Pour cela, aucun effet du comportement en rupture des tissus sur leur énergie de rupture n'a été observé. La deuxième zone montre une linéarité entre l'énergie G_C et la force F_{FB} . Ce résultat peut se justifier par le fait que la déchirure des tissus se réalise par la rupture des fils. Ainsi, cette augmentation de l'énergie de rupture avec la force à la rupture peut s'expliquer en partie par l'interaction des fils de chaîne et de trame qui sont contrôlés par les caractéristiques des tissus.

En outre, les résultats (voir Figures 3.15 et 3.16) montrent que la variation de la résistance à la rupture F_{FB} et de l'énergie de rupture G_C en fonction de la masse linéique et de la densité des fils a la même tendance.

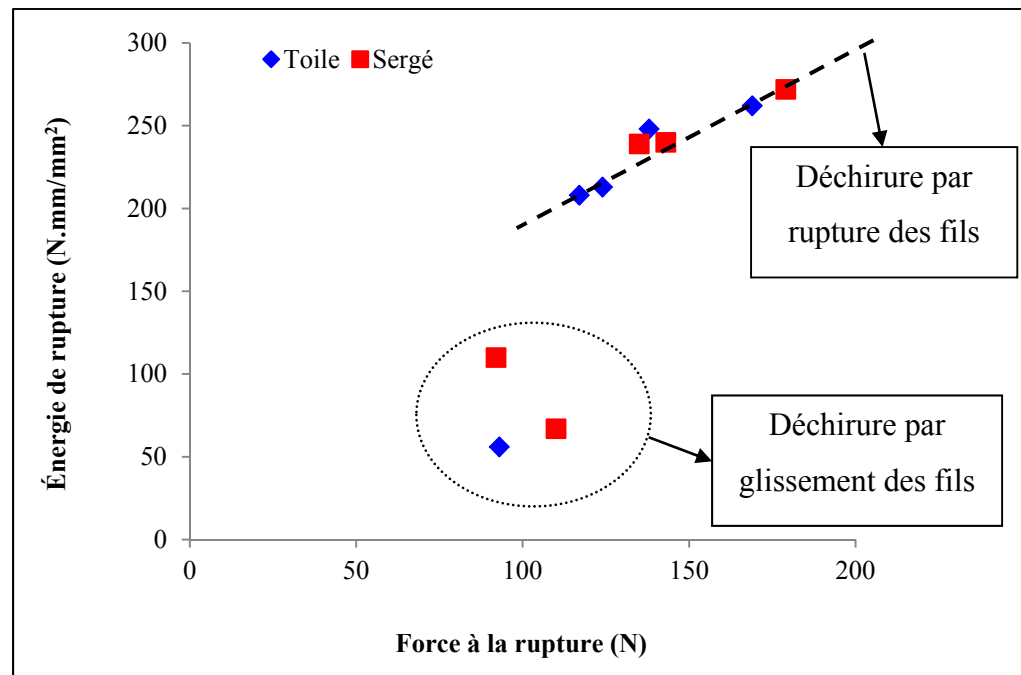


Figure 3.14 Variation de l'énergie de rupture des tissus en fonction de leurs forces à la rupture

L'influence de la masse linéique et de la densité des fils de trame sur la résistance à la rupture des tissus a été présentée par les Figures 3.15 et 3.16. La variation de F_{FB} en fonction des caractéristiques des fils semble identique à celle du module initial du tissu E_F . En effet, l'augmentation de la masse linéique ainsi que la densité des fils (fils qui soutiennent la charge appliquée) fait augmenter la résistance à la rupture du tissu. Cette observation peut être associée à l'augmentation de la rigidité du tissu, à la réduction de la mobilité des fils et à la pression latérale entre les fils de chaîne et de trame. Par le fait, les tissus de grande masse linéique et de haute densité des fils présentent une importante cohésion entre les fils. Cette cohésion favorise alors la rupture des tissus par cassure des fibres et non par leur glissement (Realff et al. 1991; Seo et al. 1993).

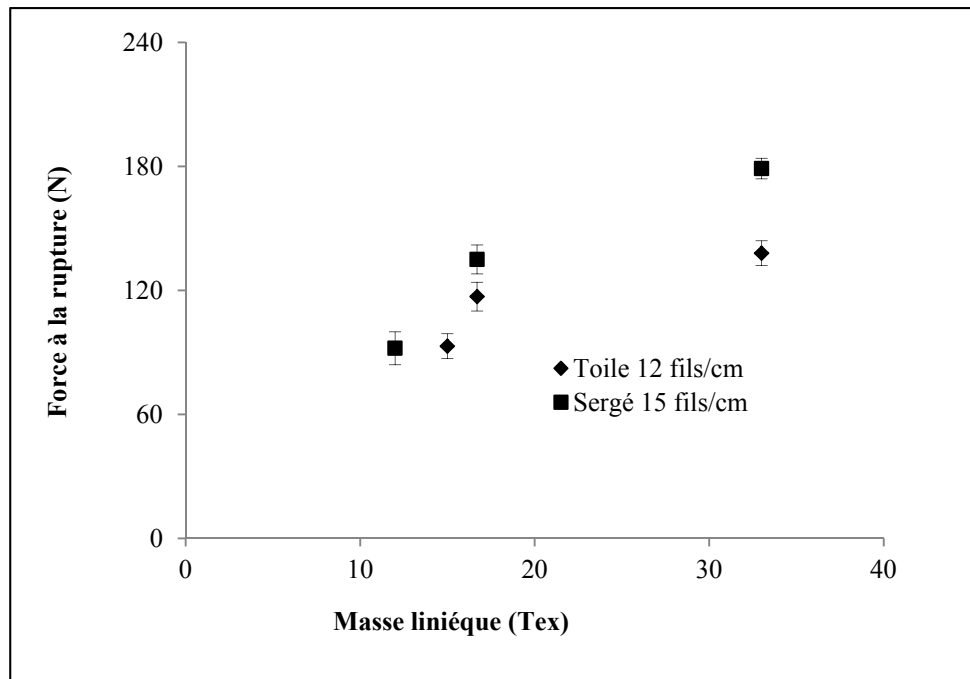


Figure 3.15 Diagramme de la variation de la force de rupture des tissus en fonction de la masse linéique des fils longitudinaux pour une armure toile et sergé en polyester

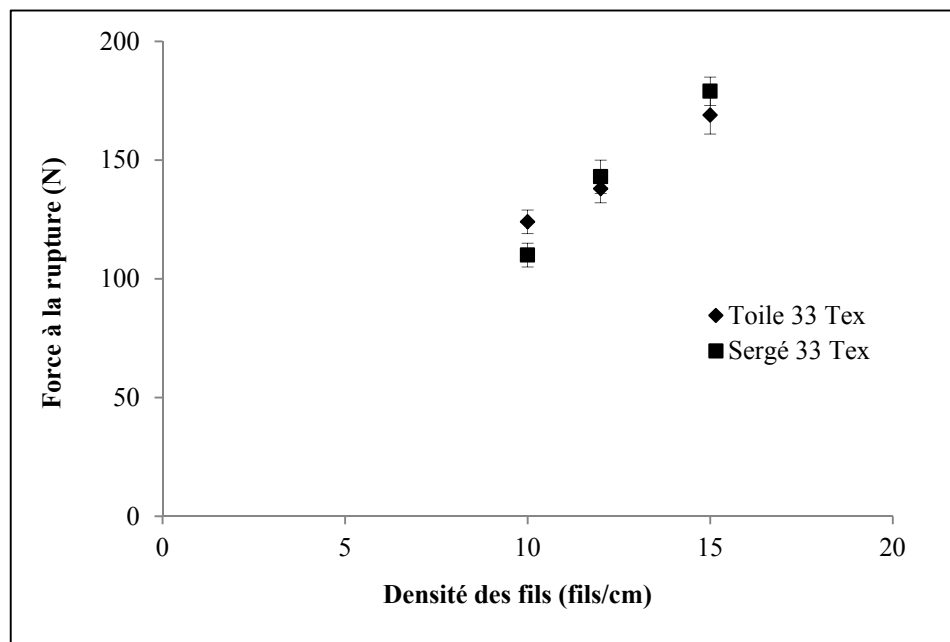


Figure 3.16 Diagramme de la variation de la force de rupture des tissus en fonction de la densité des fils longitudinaux pour une armure toile et sergé de 33 Tex en polyester

3.3.2.2.3 Élongation à la rupture

L'étude de la relation entre l'énergie de rupture G_C et l'élongation à la rupture du tissu ε_{FB} semble aussi importante. La Figure 3.17 montre deux situations différentes. Chaque situation correspond à un processus de déchirure (déchirure par glissement ou déchirure rupture des fils). Dans le premier cas, où l'énergie de rupture est faible ($G_C < 57 \text{ N.mm/mm}^2$), la forme de la courbe ne montre aucune relation entre l'énergie de rupture et l'élongation à la rupture du tissu. Cette partie correspond à la déchirure des tissus par glissement des fils transversaux. Par le fait, pendant la déchirure, le domaine de rupture des fils n'est pas atténué. Il est évident de conclure que l'énergie de rupture des tissus de faible masse linéique et de basse densité des fils est indépendante de l'élongation à la rupture. La deuxième partie de la courbe est suffisamment linéaire. Ici, les tissus sont déchirés par la rupture des fils. La propagation de la fissure dans les tissus semble donc dépendre de la déformation à la rupture du matériau. Ce résultat permet de constater que l'élongation à la rupture ε_{FB} contribue à la déchirure du tissu.

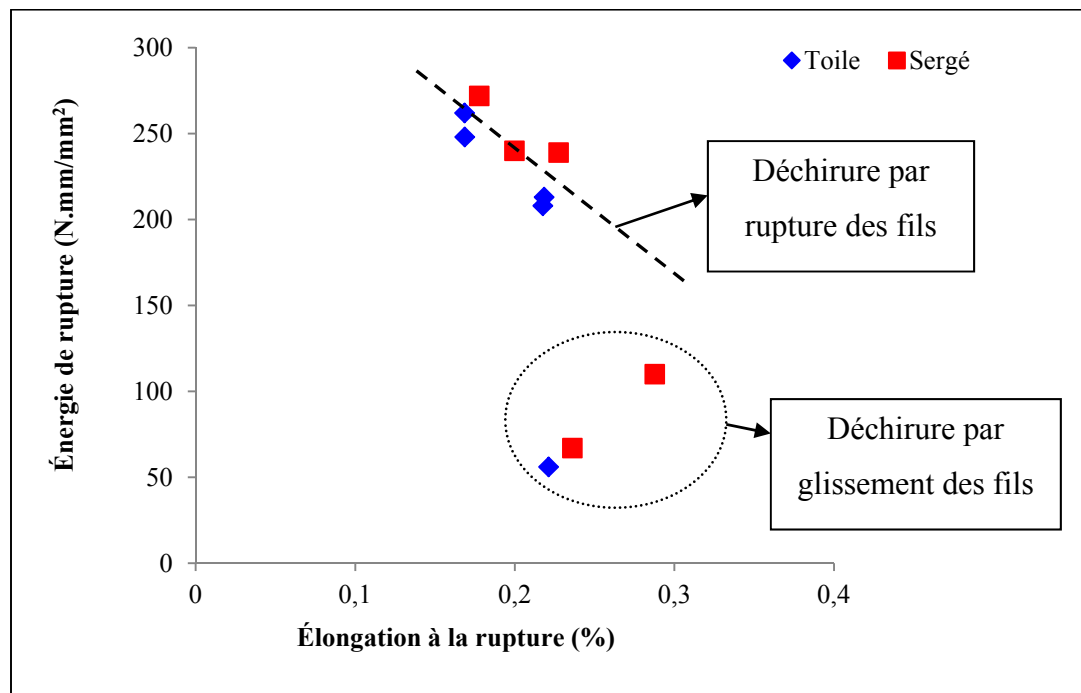


Figure 3.17 Variation de l'énergie de rupture des tissus en fonction de leurs élongations à la rupture

L'évolution de l'élongation à la rupture du tissu en fonction de la masse linéique des fils longitudinaux (les fils qui soutiennent la charge) a été illustrée par la Figure 3.18. Cette figure révèle un comportement similaire à celui qui a été présenté dans (Salem et al. 1995), qui a été obtenu lors des essais de traction des tissus en polyester. En outre, l'effet de la densité des fils de trame sur l'élongation à la rupture revêt la même tendance que celle de la masse linéique (Figure 3.19). On voit également que l'augmentation du nombre des fils rend le matériau moins déformable (Boyce et al. 1991). Ce comportement a été attribué à la pression latérale et à la cohésion entre les fils qui sont devenues importantes pour les tissus les plus denses et qui possèdent des fils de grande masse linéique. Cela engendre une réduction de la mobilité des fils dans le tissu. Celle-ci a pour effet de produire un processus d'empilement plus court. Les fils longitudinaux s'empilent alors rapidement afin d'atteindre leur point de rupture finale.

Ainsi, ces résultats peuvent s'expliquer par le fait que dans les tissus de haute densité des fils, le processus d'inter-change d'ondulation entre les fils de chaîne et les fils de trame (extension des fils longitudinaux et contraction des fils transversaux) est devenu plus court. La capacité de contraction des fils transversaux (fils de chaîne dans notre cas) est devenue faible à cause de la diminution de l'espacement entre les fils (importante ondulation originaire des fils). Ainsi, le tissu se trouve rapidement au point de rupture. Pour confirmer cette explication qui attribue la variation de ε_{FB} à la mobilité des fils dans le tissu, nous avons examiné les résultats de la Figure 3.19. Ceux-ci montrent que l'élongation à la rupture de l'armure de sergé, qui présente plus de mobilité des fils entre eux, est supérieure à celle de l'armure toile.

Cependant, Realff (1994) a montré que l'augmentation de la densité des fils de chaîne fait augmenter l'élongation à la rupture des tissus, qui sont sollicités selon la direction de ces fils. Ces auteurs ont attribué cette tendance à l'ondulation originaire du tissu. Ils indiquent que cette ondulation influe beaucoup sur le processus d'inter-change pendant les tests de traction. Il apparaît que cette contradiction de résultats peut éventuellement être associée à la direction de sollicitation des tissus. Nos tissus sont testés selon les fils de trame, alors que ceux de Realff (1994) sont sollicités selon les fils de chaîne.

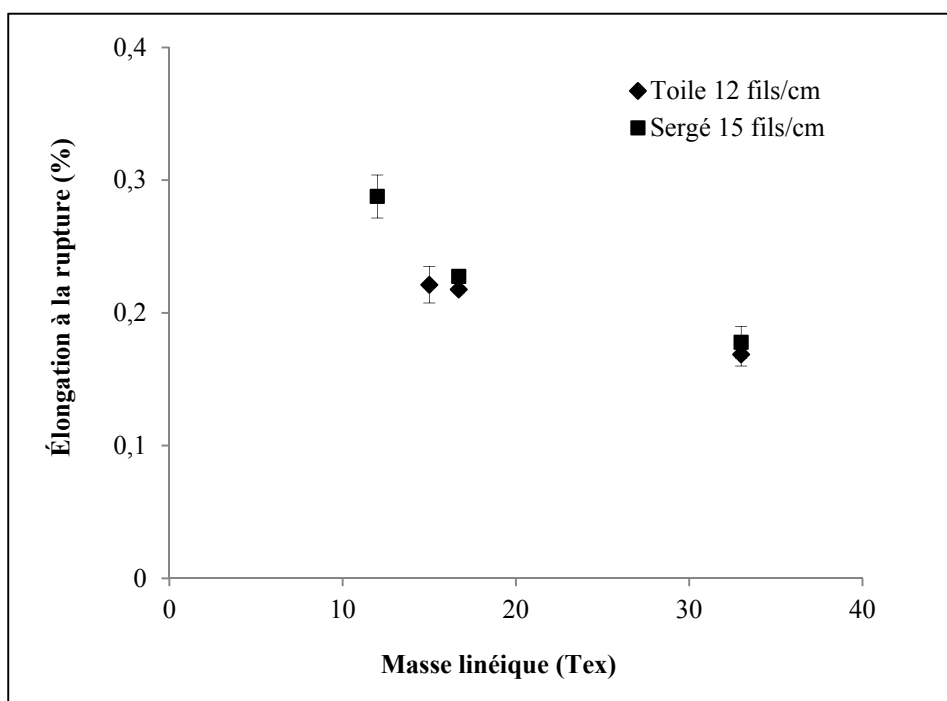


Figure 3.18 Diagramme de la variation de la déformation à la rupture des tissus en fonction de la masse linéique des fils longitudinaux pour une armure toile et sergé en polyester

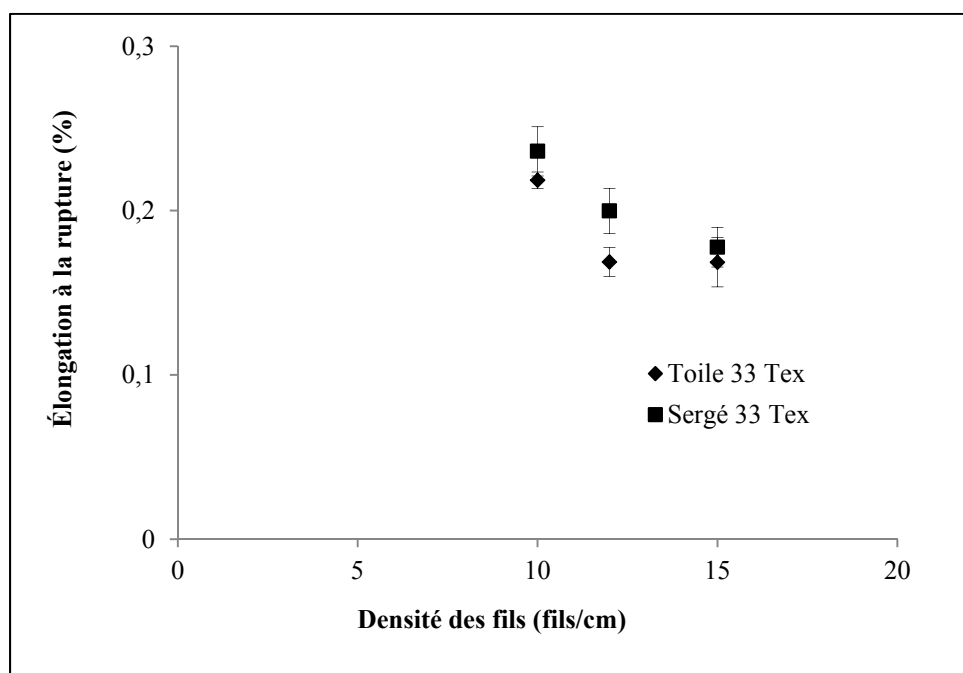


Figure 3.19 Diagramme de la variation de la déformation à la rupture des tissus en fonction de la densité des fils longitudinaux pour une armure toile et sergé de 33 Tex en polyester

Il est maintenant bien connu que l'énergie de rupture G_C obtenue par rupture des fils est en relation avec le comportement en traction du tissu. En revanche, dans le cas de déchirure par glissement des fils, aucune relation n'a été observée. Ces résultats permettent de dire que l'essai de traction du tissu ne peut simuler le processus de déchirure. Dans ce qui suit, une étude du comportement en traction des fils sera présentée.

3.3.3 Essais de traction sur les fils

Les courbes force-allongement qui ont été obtenues par les essais de traction des fils de trame ont été illustrées par la Figure 3.20. L'examen de cette figure permet de constater que les propriétés en traction des fils varient selon la variation de leur masse linéique. D'après ces courbes, les propriétés mécaniques des fils (qui semblent indispensables à la déchirure des tissus), notamment le module d'Young (Scelzo et al. 1994a), la résistance à la rupture (Taylor 1959) et l'élongation à la rupture (Seo 1989) ont été déterminées.

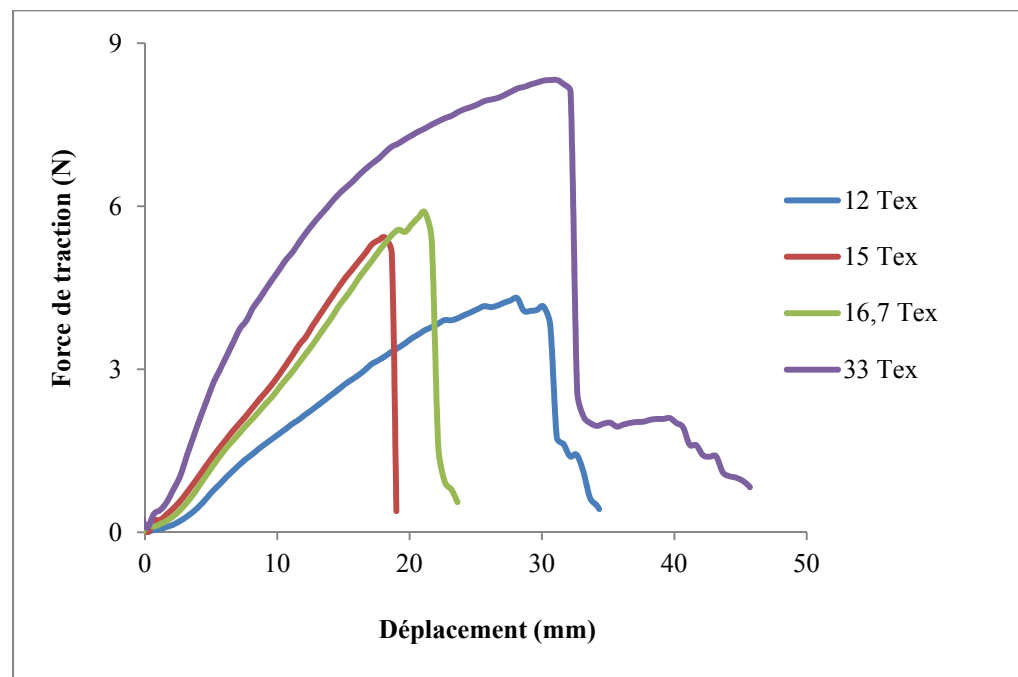


Figure 3.20 Exemple de courbes force-déplacement, issues des essais de traction monotones menés sur des fils de différentes masses linéiques

3.3.3.1 Résistance à la rupture

Les essais de traction, qui ont été menés sur des fils de trame, offre la possibilité d'étudier l'influence de la masse linéique sur la résistance à la rupture des fils. En effet, l'augmentation de la masse linéique des fils s'accompagne par une croissance de leur résistance à la rupture (Figure 3.21). Cela peut s'expliquer par l'augmentation de diamètre des fils qui est devenue plus grand avec la croissance du nombre ou du diamètre des fibres. Cette augmentation assure la cohésion des fibres dans le fil. Une telle cohésion entre les fibres favorise la rupture par cassure des fibres et non par leur glissement (Realf et al. 1991).

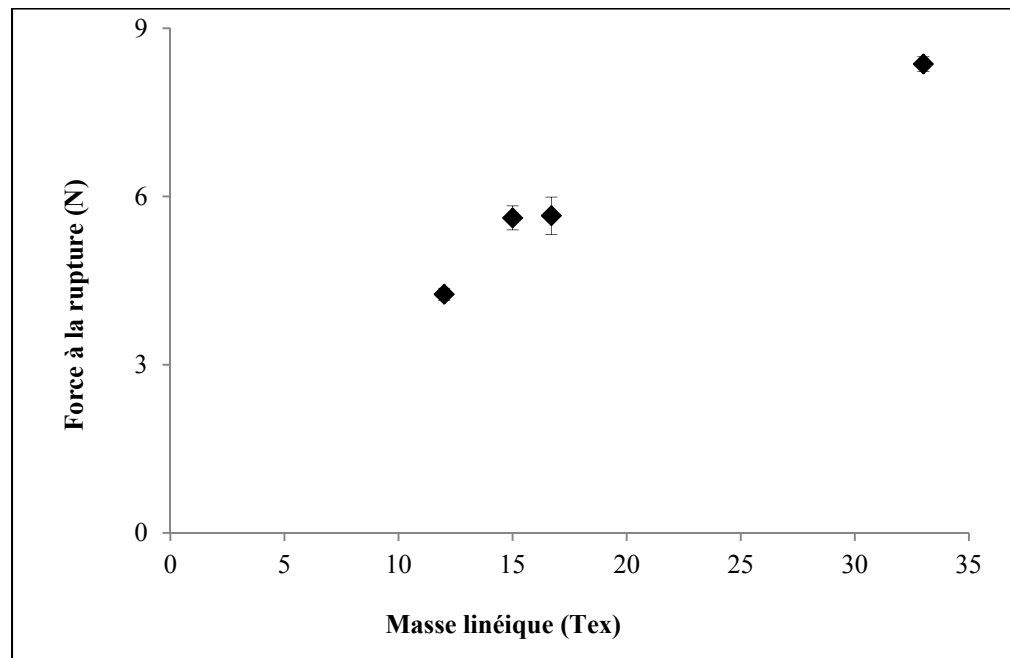


Figure 3.21 Variation de la force à la rupture des fils de trame en fonction de leurs masses linéiques

La Figure 3.22 présente l'influence de la masse linéique sur le module d'Young des fils. L'évolution de cette courbe est similaire avec celle qui a été présentée par Salem et *al.* (1995). D'après ces auteurs, l'augmentation du nombre des filaments dans un fil augmente son module d'Young ainsi que celui du tissu.

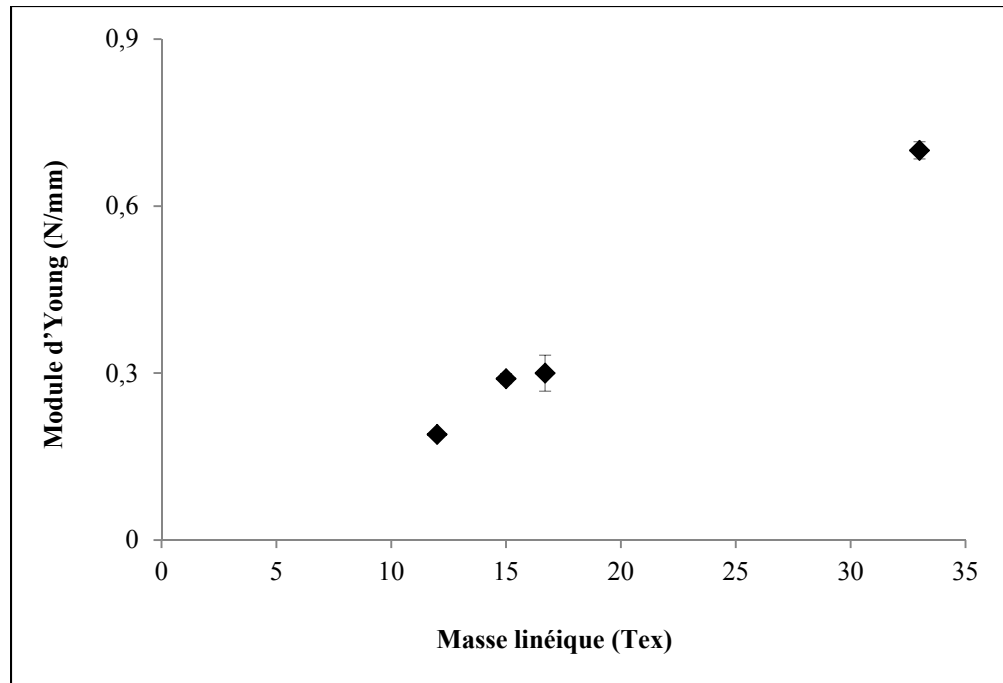


Figure 3.22 Variation du module d'Young des fils de trame en fonction de leurs masses linéiques

Le résultat en terme de l'élongation à la rupture est présenté sur la Figure 3.23. Ce comportement diminue puis augmente avec la masse linéique des fils. Cette tendance est similaire à celle qui a été trouvée par Das *et al.* (2009) pour des fils en polyester. Mais, Salem *et al.* (1995) et Debnath et Sengupta (2009) ont indiqué que l'élongation des fils diminue avec l'augmentation du nombre de filaments. Selon Debnath et Sengupta (2009), la réduction de l'élongation à la rupture est causée par la cohésion des fibres entre eux qui est devenue importante avec l'augmentation de la masse linéique. Celle-ci engendre une diminution du glissement des fibres pendant la rupture. Aussi Debnath et Sengupta (2009) ont-ils montré, dans d'autre cas, que cette élongation augmente en fonction de la masse linéique des fils. Ces auteurs ont expliqué cette tendance par le comportement à la rupture des fibres.

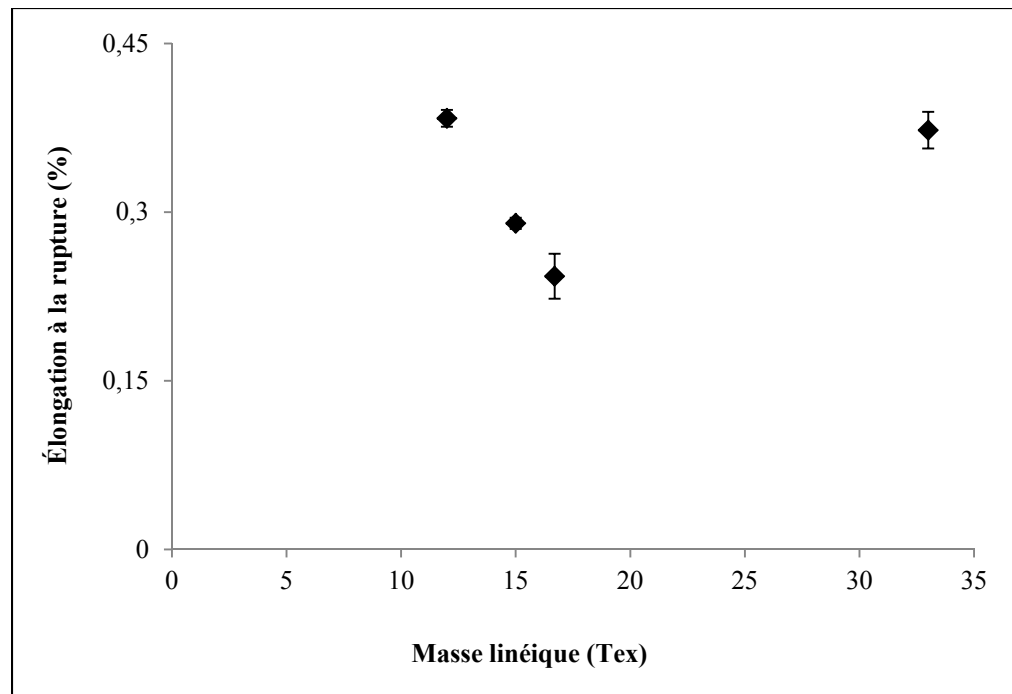


Figure 3.23 Variation de l'élongation à la rupture des fils de trame en fonction de leurs masses linéiques

3.3.3.2 Résistance au glissement

Le glissement des fils dans le tissu est un mécanisme indispensable à la propagation de la fissure dans le tissu. La majorité des études concernant la déchirure des tissus prend en compte ce mécanisme pour caractériser le comportement en déchirure des tissus (Teixeira et al. 1955; Taylor 1959; Scelzo et al. 1994a). Ce glissement des fils a été intégré dans plusieurs modèles empiriques de calcul de la force de déchirure. Ce mécanisme est fortement lié à la friction des fils entre eux. Il dépend aussi des caractéristiques du tissu (Realff 1992).

La Figure 3.24 illustre l'évolution de l'énergie de rupture en fonction de la force de glissement pour des tissus de basse et de haute densité des fils. L'examen de cette figure permet d'observer que l'énergie G_C est fortement liée à la force F_S . Cette relation peut être simulée par une fonction polynomiale qui présente un optimum. Cette courbe visualise deux différentes parties. La première ($F_S < 300$ g) correspond aux tissus de basse densité des fils. Ces tissus montrent une énergie de rupture considérée comme la plus faible. Ce résultat peut

être attribué à la déchirure par glissement des fils. La seconde est attribuée aux tissus de haute densité des fils. La force de glissement pour ces tissus est supérieure à 600 g. dans ce cas, la déchirure se produit par rupture des fils. Les résultats qui ont été obtenus par Teixeira et *al.* (1955) et Scelzo et *al.* (1994a) correspondent à cette catégorie. Le passage de basse densité à la haute densité fait apparaître la déchirure des tissus par glissement/rupture, ou même par rupture. Pour ce mode de déchirure, la force de glissement est entre 300 et 600 g. À cet intervalle, l'énergie de rupture est maximale.

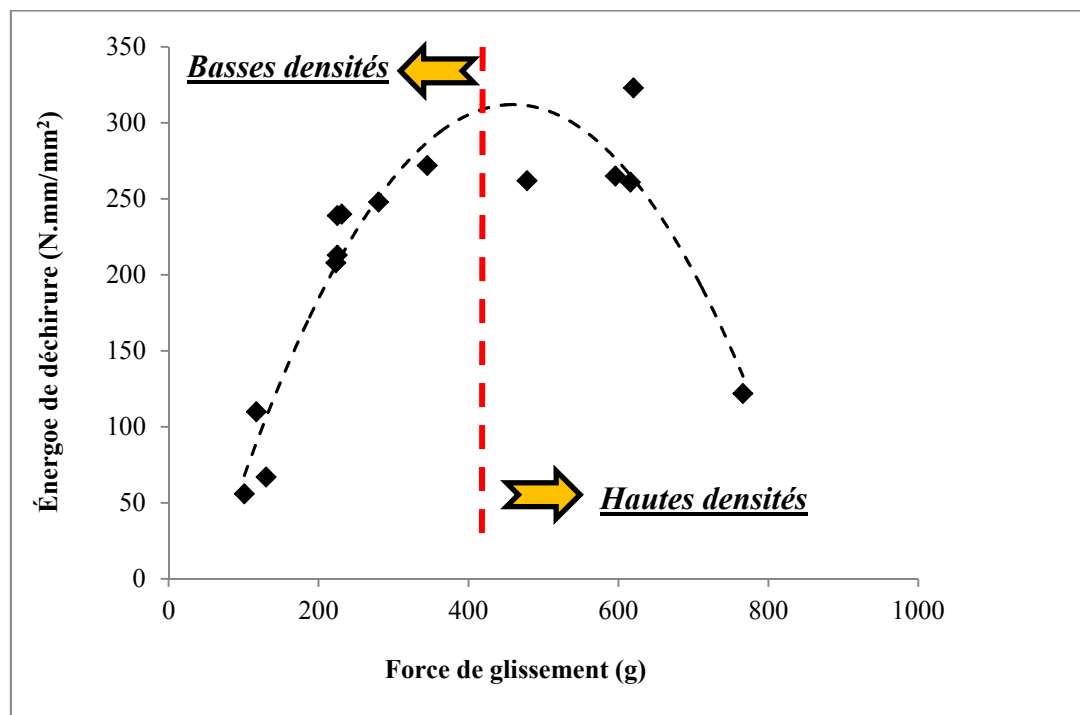


Figure 3.24 Variation de l'énergie de rupture des tissus en fonction de leurs forces de glissement des fils

Pour le tissu, les essais de glissement des fils offrent la possibilité d'étudier la variation de la force de glissement F_S en fonction des caractéristiques du tissu. La Figure 3.25 permet de comprendre que la résistance au glissement des fils dépend fortement des caractéristiques du tissu, notamment la masse linéique des fils. Ces résultats sont en accord avec ceux qui ont été présentés dans (Kirkwood et al. 2004). L'allure des courbes de cette figure précise que le mécanisme de glissement d'un fil est le même dans différents tissus. Cependant, la vitesse de

glissement varie d'un tissu à un autre. Le glissement des fils dans les tissus de grande masse linéique (33 Tex) se fait alors rapidement, tandis que les tissus de masse linéique inférieure à 16,7 Tex montrent un glissement des fils stationnaire. Cette observation peut refléter l'effet de la masse linéique sur la force de glissement des fils. Ainsi, il est intéressant de signaler que la forme des pics change en fonction de la masse linéique des fils. Cela semble dû à la pression locale qui se trouve aux points de croisement des fils.

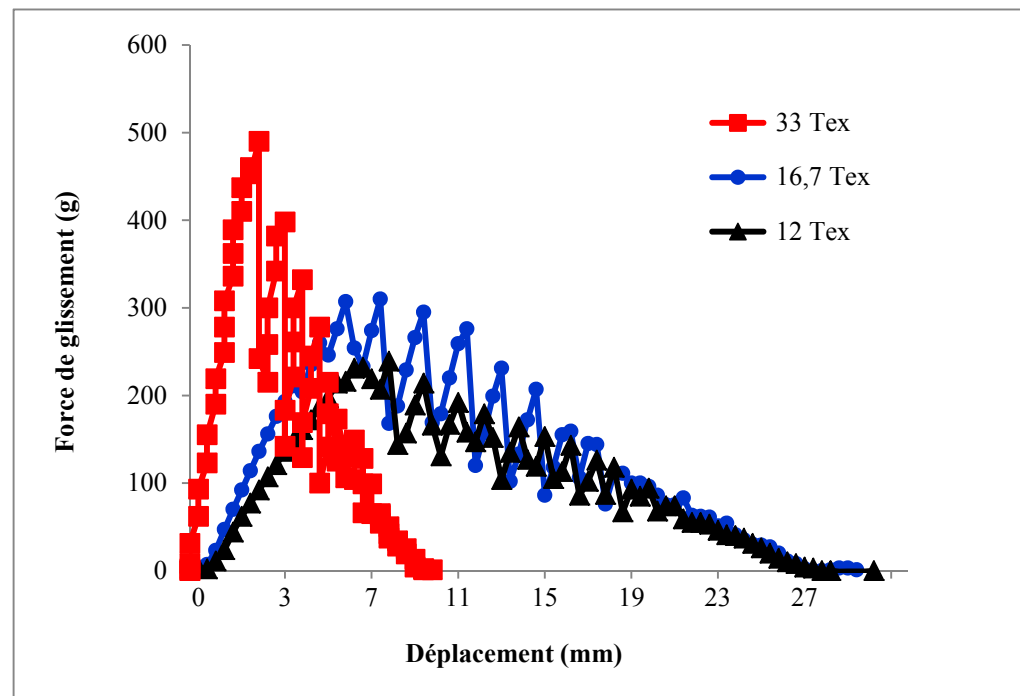


Figure 3.25 Exemple de courbes force-déplacement, issues des essais de glissement d'un fil dans des tissus de différentes masses linéiques

De plus, les résultats de tests de glissement d'un fil menés sur différents tissus d'armure toile et sergé offrent la possibilité de constater que la masse linéique a un effet significatif sur la force de glissement (Figures 3.26). En effet, l'augmentation de la masse linéique de 12 Tex à 33 Tex engendre une élévation de la résistance au glissement des fils dans le tissu. D'après Realff (1992), l'augmentation de la masse linéique des fils conduit à une croissance de la pression latérale entre les fils de chaîne et de trame. Cela engendre une force de friction élevée qui empêche les fils de se mobiliser facilement entre eux. Par conséquent, la force de

glissement augmente avec la masse linéique des fils (Figures 3.26). Cette tendance est observée pour l'armure toile et l'armure de sergé.

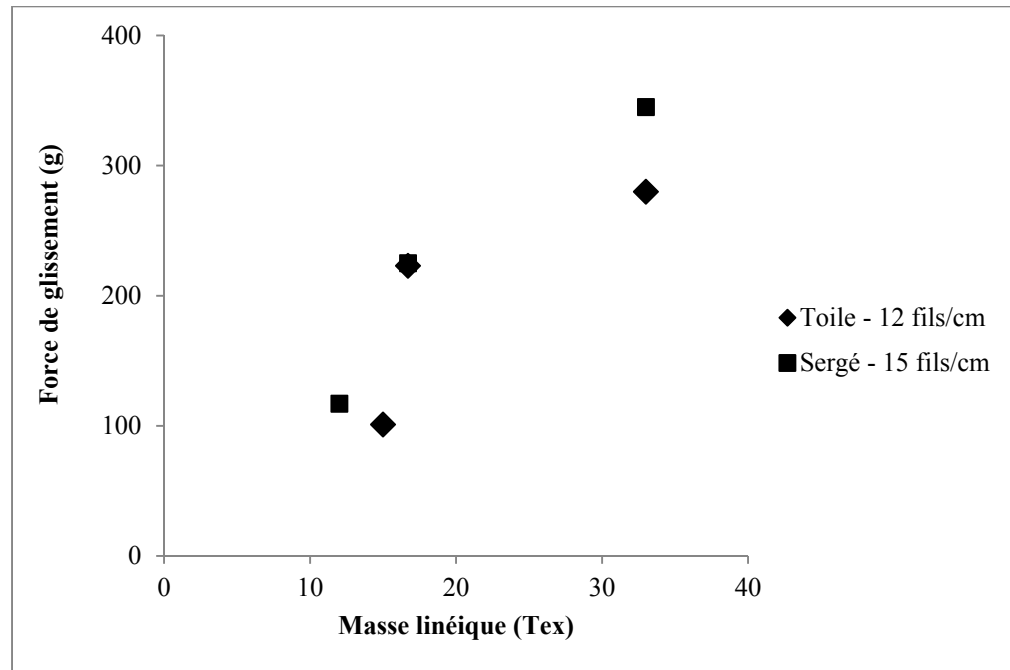


Figure 3.26 Diagramme de la variation de la force de glissement d'un fil en fonction de la masse linéique des fils pour une armure toile et une armure sergé en polyester

L'influence de la densité des fils de trame sur la force de glissement des fils est également mise en évidence par la Figure 3.27. En effet, l'augmentation du nombre de fils dans le tissu donne une force de glissement F_s élevée. De même, l'effet de la densité des fils sur leur glissement peut être attribué à la pression latérale entre les fils. Cet effet de la densité a été expliqué à la suite des résultats obtenus par Boyce et *al.* (Boyce et al. 1991). Ces auteurs ont montré dans leur modèle de traction des tissus que la croissance de la densité des fils dans le tissu augmente la pression latérale entre les fils de chaîne et de trame. Par conséquent, la force de friction des fils croît. Ainsi, la résistance au glissement est devenue importante.

L'effet de l'armure sur la force de glissement des fils est plus significatif dans le cas des tissus de faible densité des fils (10 fils/cm). De fait, l'armure toile qui est caractérisée par une faible mobilité des fils (contient plus de points de croisement des fils par motif) possède une

résistance au glissement des fils plus élevée comparativement à celle de l'armure de sergé (Figures 3.27). Ce résultat peut s'expliquer par l'effet de la pression locale dans les points de croisement des fils.

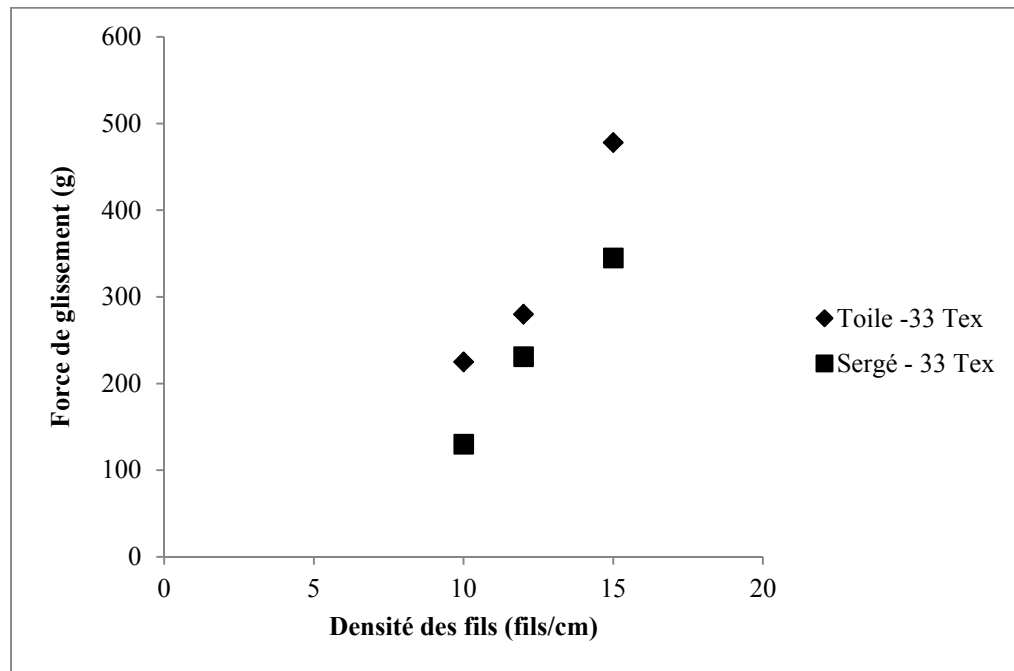


Figure 3.27 Diagramme de la variation de la force de glissement d'un fil en fonction de la densité des fils pour une armure toile et une armure de sergé en polyester

3.3.3.3 Essai d'empilement

Pendant un essai de déchirure pantalon, l'empilement des fils transversaux se produit juste avant leur rupture. Ce mécanisme a lieu après le glissement des fils longitudinaux et l'extension des fils transversaux (Teixeira et al. 1955). Ces auteurs ont montré que les fils empilés soutiennent une grande part de la force de déchirure. Ainsi, l'étude de la relation entre l'empilement des fils et l'énergie de rupture des tissus a fait l'objet de cette section. L'évolution de la force d'empilement en fonction de certaines caractéristiques des tissus a été menée afin de montrer que ce mécanisme se produit suivant le type de la structure des tissus.

Les résultats obtenus par les essais d'empilement des fils sont illustrés par la Figure 3.28. D'après ces résultats, il apparaît que l'empilement des fils est un phénomène très important pour la propagation de la fissure dans le tissu. La variation de l'énergie G_C en fonction de la force F_J permet de déduire que ce phénomène d'empilement des fils contribue à la résistance du tissu contre la déchirure. Ainsi, l'étude de l'influence des caractéristiques du tissu sur la variation de la force d'empilement des fils semble fondamentale.

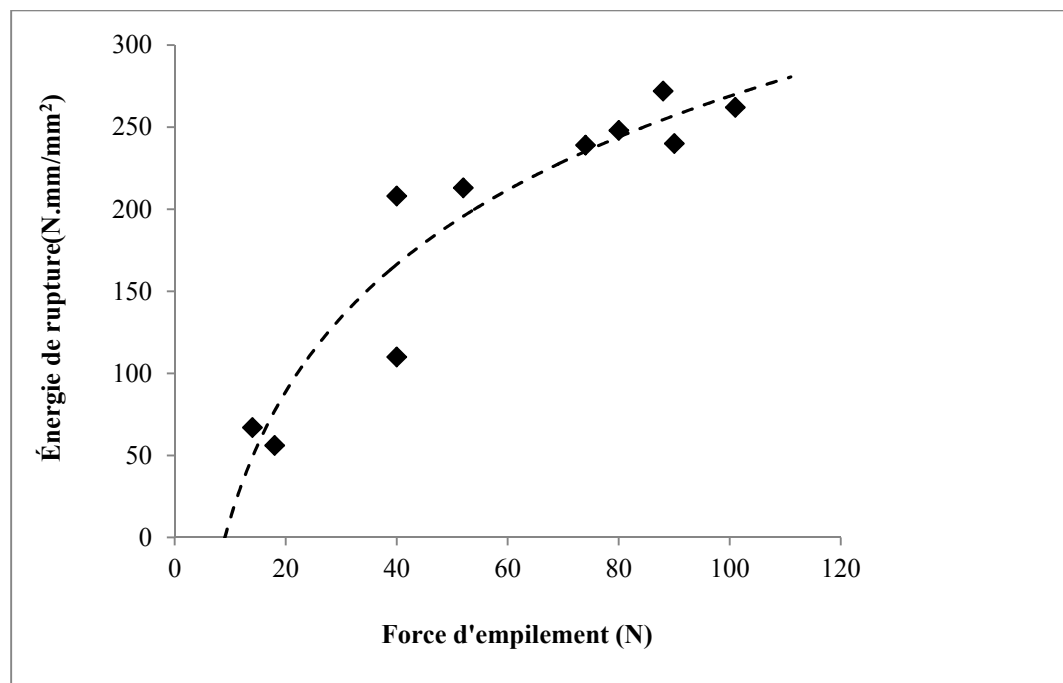


Figure 3.28 Diagramme de la variation de l'énergie de rupture des tissus en fonction de leurs forces d'empilement des fils

La Figure 3.29 illustre des exemples de la force d'empilement pour différents tissus. L'effet de la masse linéique entre autres sur le module d'empilement apparaît important. L'augmentation de la masse linéique fait modifier de façon significative le phénomène d'empilement des fils. L'allure de la variation de la force d'empilement change d'un tissu à un autre. En effet, la résistance à l'empilement des fils dans les tissus de faible masse linéique et de basse densité des fils de trame est très faible. Ce phénomène est observé après le glissement transversal des fils (Figure 3.30), tandis que cette résistance pour les tissus de grande masse linéique et de haute densité des fils est très marquante. Cet empilement est

obtenu sans glissement transversal des fils. Dans ce qui suit, une étude de l'influence de la masse linéique ainsi que la densité des fils de trame sur la force d'empilement sera présentée.

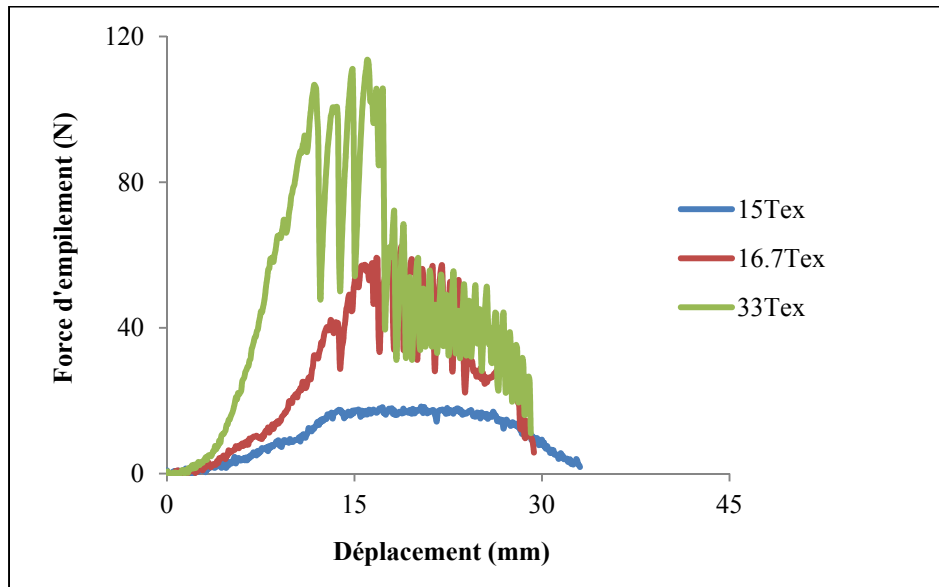


Figure 3.29 Courbes force-déplacement issues des essais d'empilement des fils dans des tissus de différentes masses linéiques

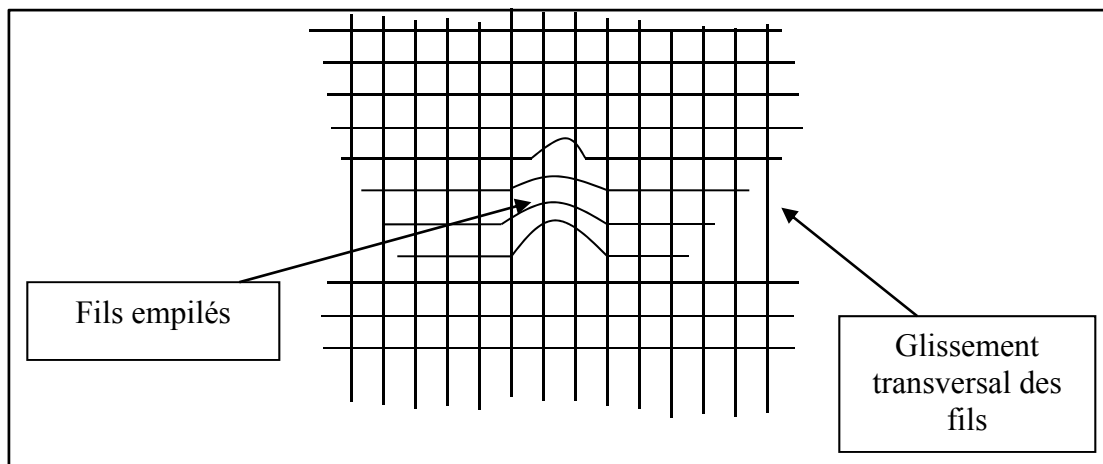


Figure 3.30 Mécanismes observés pendant un test d'empilement des fils

Les résultats illustrés par les Figures 3.31 et 3.32 montrent que l'influence de la masse linéique des fils, de la densité des fils et du type de l'armure a un effet significatif sur la force d'empilement des fils. De fait, la force d'empilement F_J augmente avec ces trois

caractéristiques du tissu. Ces résultats peuvent être reliés à l'effet de la friction, de la cohésion et de la rigidité des fils. L'effet de ces derniers sur l'empilement des fils est plus important pour les tissus de grande masse linéique (33 Tex) et de haute densité des fils (15 fils/cm). Ces résultats permettent de constater que l'empilement des fils est fortement dépendant des caractéristiques des tissus.

Ainsi, l'armure toile montre une force d'empilement supérieure à celle de l'armure de sergé (Figures 3.32). Cela peut s'expliquer par le glissement des fils qui est plus faible dans l'armure toile. Effectivement, ces résultats offrent la possibilité de constater que la mobilité des fils entre eux favorise leur empilement.

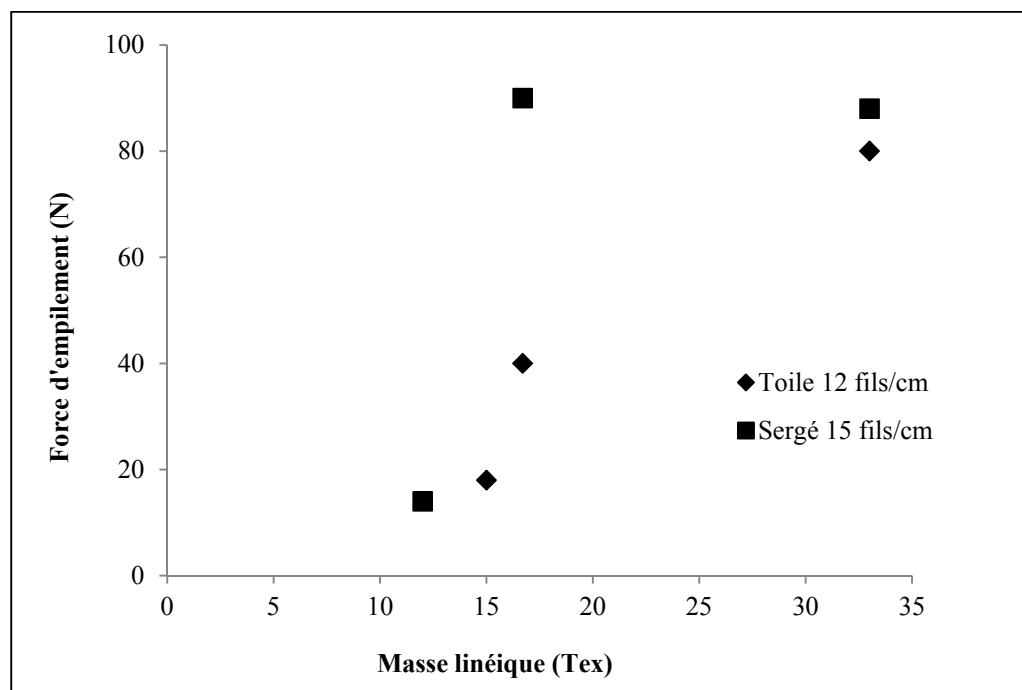


Figure 3.31 Diagramme de la variation de la force d'empilement des fils en fonction de la masse linéique des fils pour une armure toile et une armure de sergé en polyester

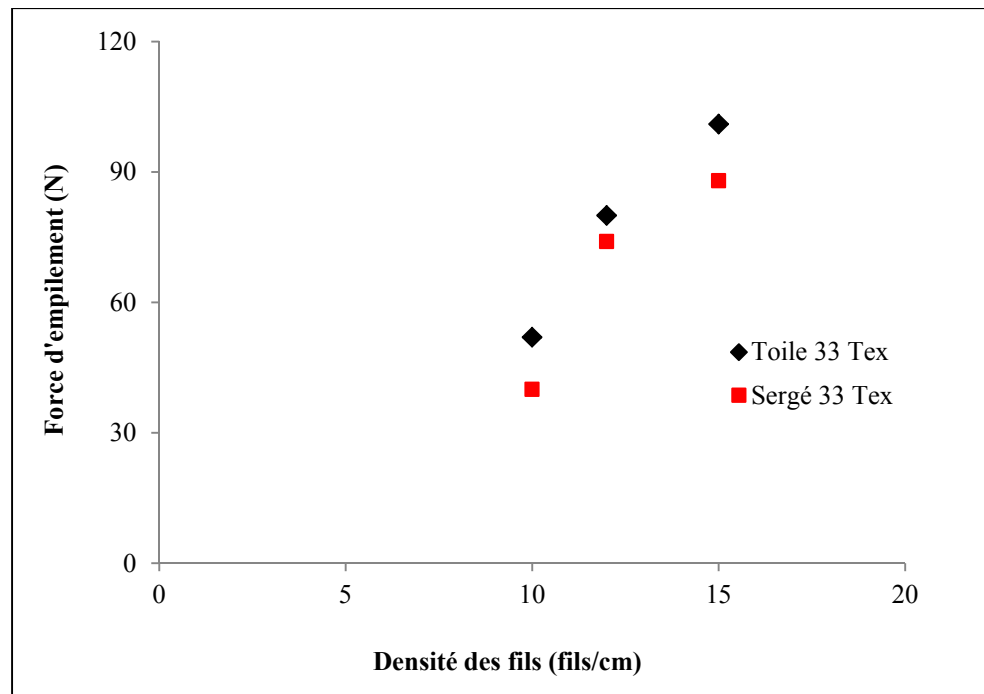


Figure 3.32 Diagramme de la variation de la force d'empilement des fils en fonction de la densité des fils pour une armure toile et une armure de sergé de 33 Tex en polyester

3.4 Synergie entre les différents mécanismes de déchirure des tissus

La déchirure d'un tissu par la configuration pantalon est le résultat de l'accumulation de divers mécanismes élémentaires :

- déformation des tissus;
- glissement des fils;
- empilement des fils;
- rupture des fils.

De façon générale, un mécanisme de déchirure n'est pas isolé. En effet, lors de la propagation de la fissure dans le tissu divers mécanismes coexistent. Ces mécanismes se développent selon les caractéristiques du tissu.

Les résultats présentés au préalable montrent que ces mécanismes sont fortement liés à l'armure, à la densité et à la masse linéique des fils. Ainsi, le mécanisme de glissement des

fil joue un rôle primordial à la propagation de la fissure. La majorité des mécanismes de déchirure dépend de la mobilité des fils. L'étude de la synergie entre ces divers mécanismes confirme l'effet marquant du glissement des fils.

3.4.1 Effet du glissement des fils sur les propriétés en traction des tissus

Teixeira et *al.* (1955), Taylor (1959) et Scelzo et *al.* (1994a) ont montré dans leurs études que le glissement des fils dans le tissu est considéré comme un mécanisme principal en ce qui a trait à la propagation de la fissure dans le tissu. De plus, il apparaît que ce mécanisme influe beaucoup les propriétés mécaniques en traction. L'évolution des propriétés en traction des tissus est illustrée par les figures ci-dessous. D'une manière générale, l'augmentation de la résistance au glissement des fils entraîne une croissance du module initial du tissu. Lors d'un essai de traction du tissu de grande mobilité des fils, après l'étirement des fils longitudinaux, il semble apparaître un glissement des fils important, puis la résistance à l'extension du tissu est alors observée. Cela engendre une augmentation lente de la force de traction en fonction du déplacement. Cette apparition du glissement des fils produit un faible module initial du tissu. Dans le cas contraire, les tissus se caractérisent par une bonne cohésion des fils et par une importante résistance au glissement des fils. Ici, on assiste à une propagation brusque de la fissure qui s'accompagne d'une variation rapide de la force en fonction du déplacement (Figure 3.33). Cette observation se manifeste par une bonne rigidité du tissu. Ainsi, la valeur du module initial obtenue est importante.

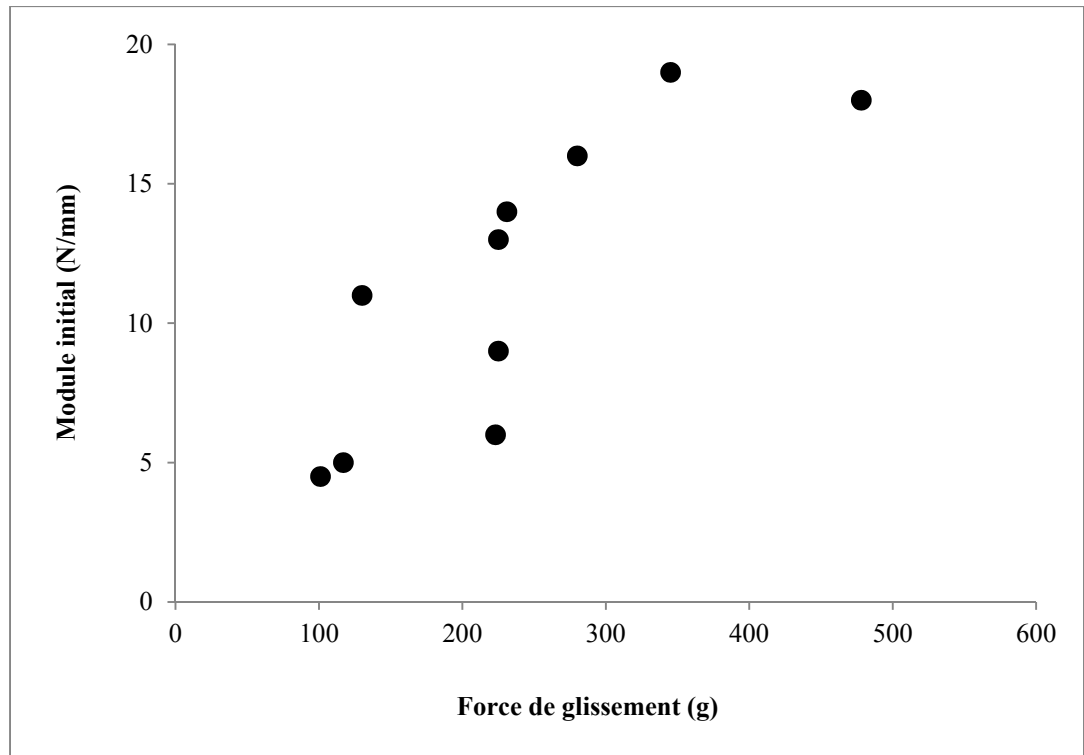


Figure 3.33 Variation du module initial en fonction de la force de glissement pour des tissus en polyester

La Figure 3.34 montre une augmentation significative de la résistance à la rupture des tissus en fonction de la force de glissement des fils. Ce résultat indique une forte dépendance entre les deux propriétés. Cette augmentation peut possiblement être attribuée en partie à une rigidification du tissu obtenue par une solide cohésion des fils entre eux. La réduction du glissement des fils cause une grande énergie qui mène le tissu au point de rupture. Il est à noter que les caractéristiques des tissus qui contrôlent la mobilité des fils dans le tissu sont le principal facteur influant la résistance en traction du tissu.

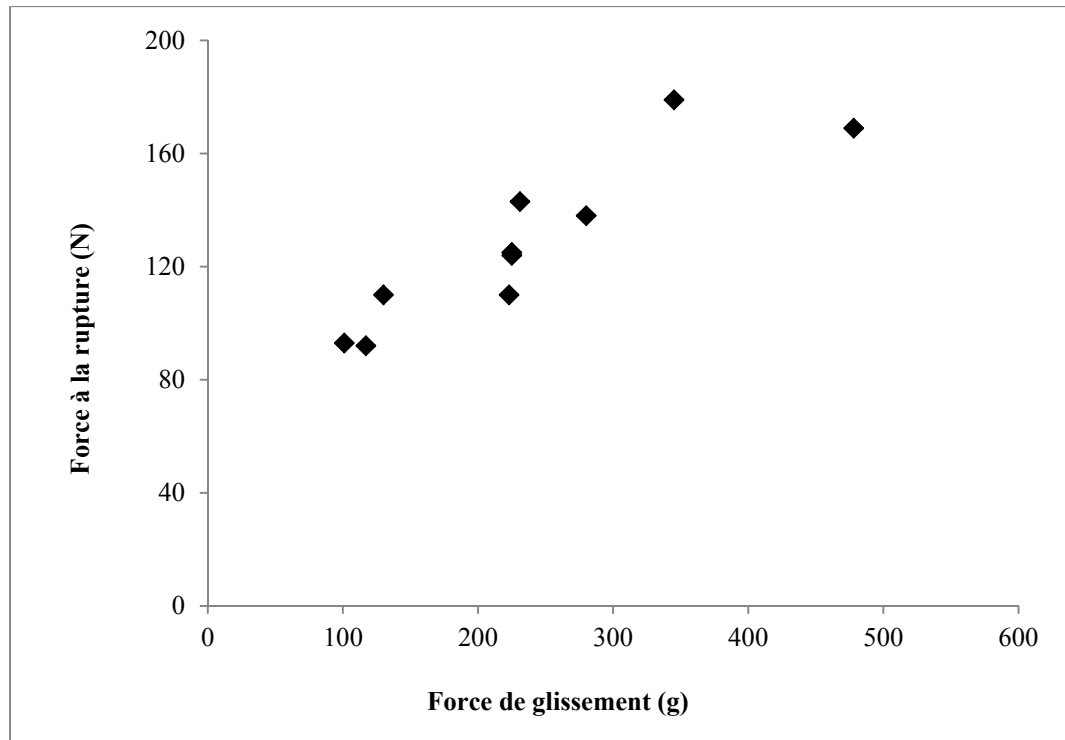


Figure 3.34 Variation de la force à la rupture en fonction de la force de glissement pour des tissus en polyester

En ce qui concerne la déformation à la rupture du tissu, leur évolution en fonction de la force de glissement semble intéressante. La Figure 3.35 montre une réduction de la déformation à la rupture par l'augmentation de la résistance au glissement des fils. La mobilité des fils a alors un effet marquant sur la déformation du tissu; cela peut être expliqué par le processus « inter-change » d'ondulation qui a été décrit au préalable. Pendant les essais de traction des tissus de faible résistance au glissement, les fils de chaîne et de trame ont la capacité de changer leurs ondulations entre eux. Ce processus donne au tissu une importante déformation à la rupture. Cet « inter-change » d'ondulation se manifeste d'une manière significative uniquement avec les tissus de grande mobilité des fils.

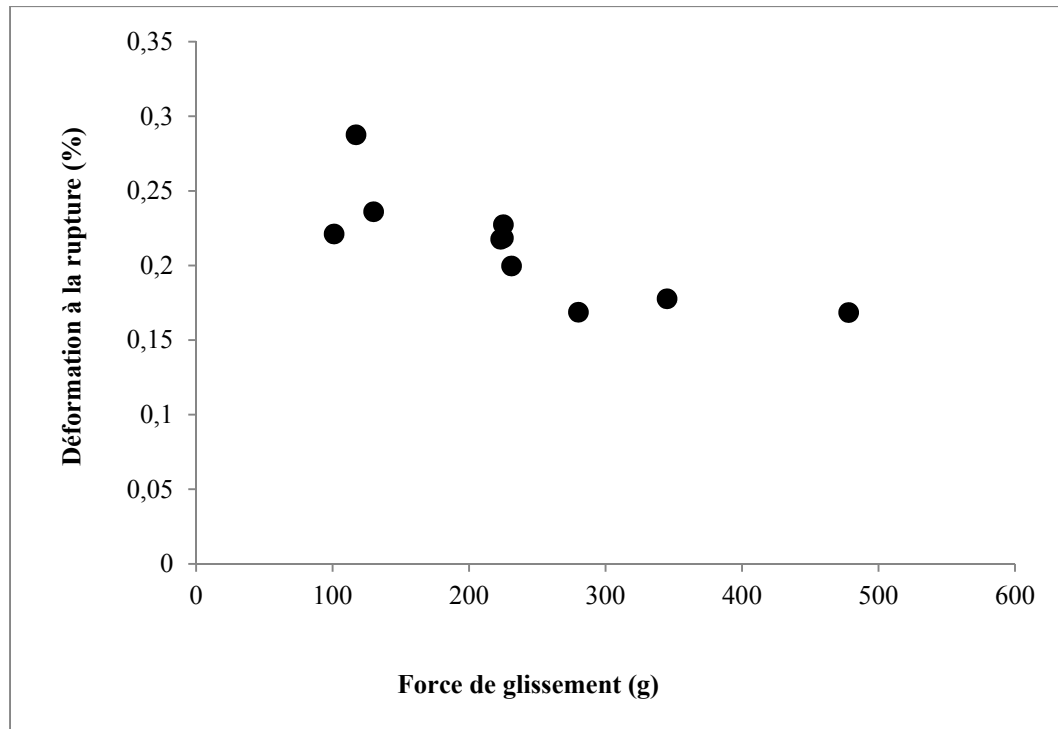


Figure 3.35 Variation de la déformation à la rupture en fonction de la force de glissement pour des tissus en polyester

3.4.2 Relation entre la force de glissement et la force d'empilement des fils

L'évolution de la résistance à l'empilement des fils en fonction de la résistance au glissement des fils est illustrée à la Figure 3.36. Cette figure montre une forte relation entre ces deux propriétés mécaniques du tissu. Le glissement et l'empilement des fils sont deux mécanismes qui coexistent lors d'un essai de traction et de déchirure des tissus. L'empilement des fils a lieu à la suite du glissement des fils. Ainsi, pendant les tests d'empilement des fils, leur glissement a été observé. Il apparaît important de noter que le mécanisme d'empilement des fils est fortement contrôlé par le mécanisme de glissement. L'apparition du glissement pendant un essai d'empilement des fils fait réduire la résistance à l'empilement du tissu. De plus, pour réaliser ce travail, les tissus utilisés, qui ont une basse densité des fils, montrent que la variation de la force de glissement ainsi que la variation de la force d'empilement en fonction des caractéristiques du tissu sont similaires. Les deux propriétés augmentent en fonction de la densité et la masse linéique des fils (Figure 3.26, 3.27, 3.31 et 3.32).

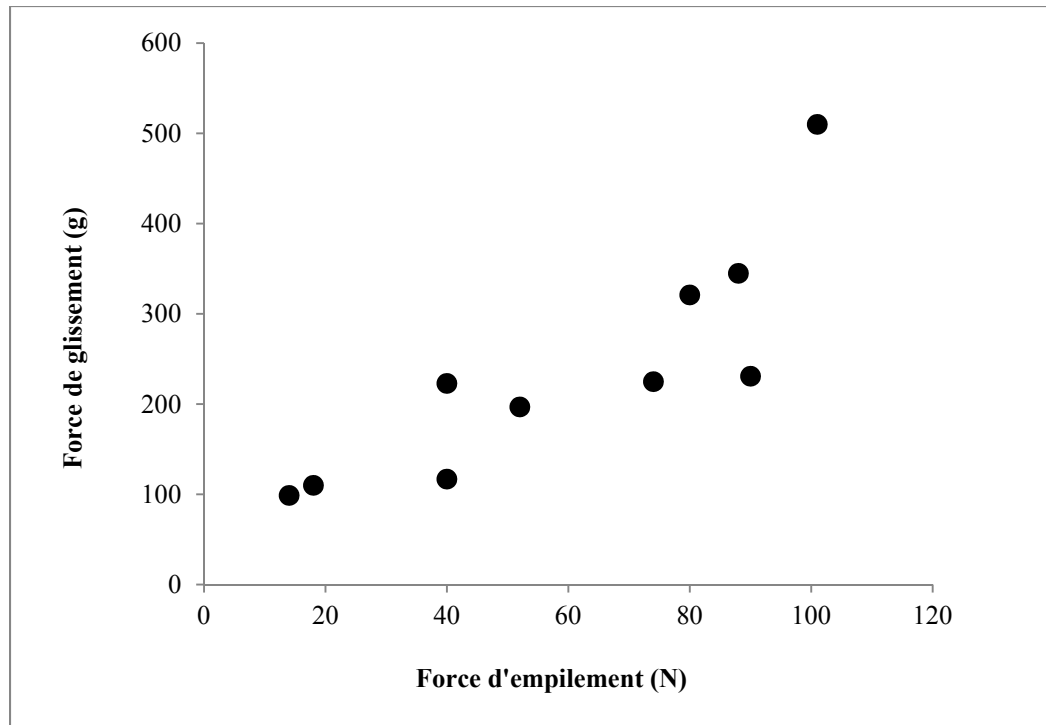


Figure 3.36 Variation de la force de glissement en fonction de la force d'empilement pour des tissus en polyester

3.4.3 Effet de l'empilement des fils sur la résistance à la rupture des tissus

Pendant l'essai de traction, la courbe obtenue (Figure 3.37) est caractérisée, dans sa troisième partie, par l'empilement des fils longitudinaux. Cette partie de la courbe peut se rapprocher d'une droite linéaire. L'examen de ces droites offre la possibilité de constater que leur pente (qui simule bien la résistance à l'empilement des fils) augmente avec la croissance de la masse linéique et la densité des fils de trame. Cette réflexion fait bien ressortir l'influence directe de l'empilement des fils sur la force à la rupture. Ainsi, le résultat illustré à la Figure 3.37 évolue de cette manière. Notons qu'une résistance à l'empilement des fils élevée produit une importante force à la rupture du tissu.

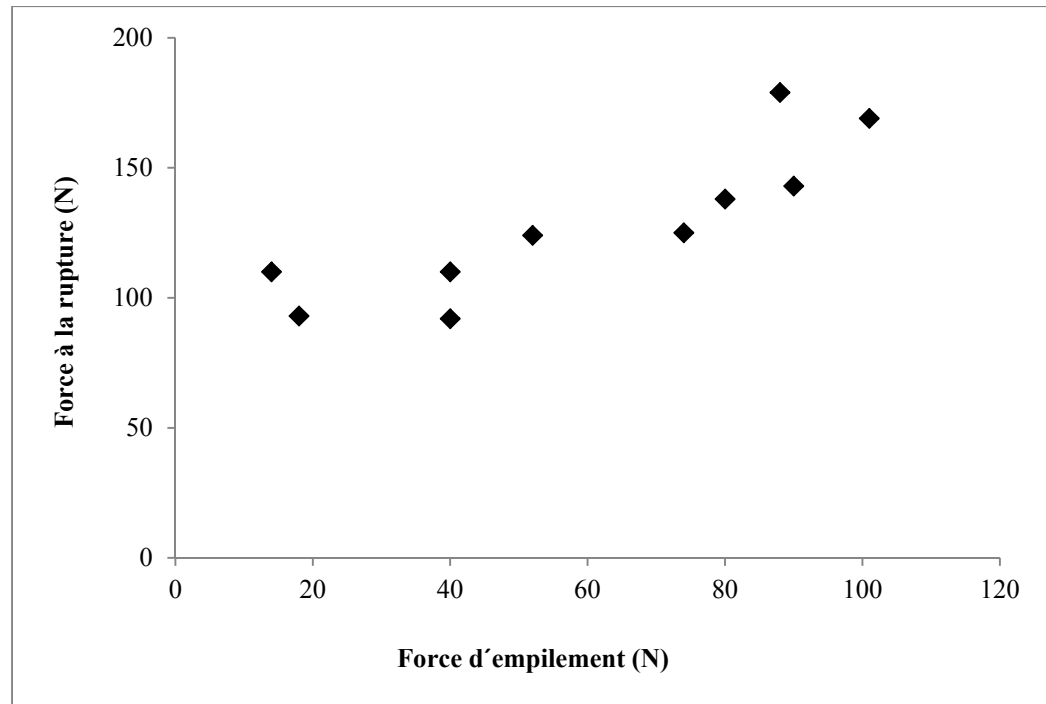


Figure 3.37 Variation de la force à la rupture en fonction de la force d'empilement pour des tissus en polyester

3.5 Modélisation de l'énergie critique de déchirure des tissus

L'objectif principal de cette présente partie est de déterminer un modèle simple qui peut servir à calculer l'énergie de rupture des matériaux textiles. Le développement de ce modèle est fondé sur les travaux de Taylor (1959). Selon cet auteur, la force de déchirure peut s'exprimer uniquement à partir de la force de glissement et de la force à la rupture d'un fil, sans oublier les caractéristiques du tissu (densité des fils, nombre de croisement des fils et l'espacement entre les fils).

Cette partie est consacrée au développement d'une formule de calcul de l'énergie de rupture des tissus. De fait, une modélisation analytique a été élaborée. Le modèle obtenu est couplé avec les résultats expérimentaux afin de mettre en évidence l'influence des mécanismes de la propagation de la fissure sur le comportement en déchirure des tissus.

3.5.1 Formulation du modèle

3.5.1.1 Travail de déchirure

Le phénomène de déchirure des textiles est un dissipateur d'énergie. La zone *Del* contient des processus de dissipation dus aux différents mécanismes dissipatifs : tension des fils, glissement des fils et empilement des fils. Dès que l'énergie dissipée ∂W est supérieure à l'énergie nécessaire pour créer une nouvelle surface de rupture, la fissure se propage dans le tissu.

L'énergie de rupture des tissus est acquise en partie par le calcul du travail de déchirure (Triki et al. 2011). Ainsi, ce travail est obtenu par l'intégration de la force de déchirure. La formule de calcul de la force de déchirure $F_{déch}$ qui a été proposée par Taylor (1955) est la suivante :

$$F_{déch} = F_{YB} \left(Snt \frac{F_{YB}}{F_S} + 2 \right) \quad (3.1)$$

Où F_S est la force de glissement, F_{YB} est la force à la rupture, n est le nombre de points de croisement des fils, S est l'espacement entre les fils et t est la densité des fils.

Selon Triki et al. (2011), le travail $W_{déch}$ est donné par l'expression suivante :

$$W_{déch} = \int F_{déch} . dl \quad (3.2)$$

En combinant les équations 3.1 et 3.2 et en les redéfinissant, nous obtenons l'équation suivante :

$$W_{déch} = \int \left(nSt \frac{F_{YB}}{F_S} + 2 \right) F_{YB} dl \quad (3.3)$$

Le travail de déchirure $W_{déch}$ dépend de la longueur déchirée c . Alors l'équation 3.3 peut être écrite de cette manière :

$$W_{déch} = \int \left(nSt \frac{F_{YB}}{F_S} + 2 \right) F_{YB} \frac{dl}{dc} dc \quad (3.4)$$

La Figure 3.38 montre que le rapport $\frac{dl}{dc} = cst = R$. Où R est un paramètre caractéristique du matériau (R se définit par $\frac{\text{déplacement}}{\text{longueur}}$). Rivlin et Thomas (1953) ont montré que dans le cas de la déchirure des élastomères $R = 2\lambda$. Où λ est l'allongement du matériau.

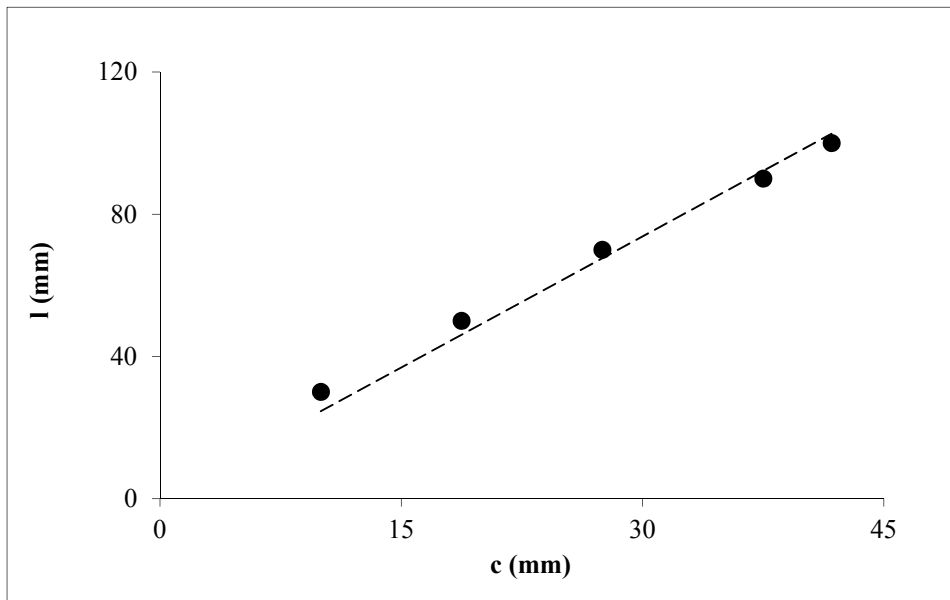


Figure 3.38 Variation du déplacement l en fonction de la longueur de déchirure c

En tenant compte de cette caractéristique du matériau, nous obtenons, après une intégration, l'équation 3.5:

$$W_{déch} = R \left(nst \frac{F_{YB}}{F_S} + 2 \right) F_{YB} [Ac + B] \quad (3.5)$$

Où A et B sont deux constantes à déterminer.

3.5.1.2 Énergie de rupture

À partir du critère du calcul du taux de restitution d'énergie pour les tissus (Triki et al. 2011), G est écrit comme suit :

$$G = \frac{1}{e} \left(\frac{\partial W_{déch}}{\partial c} \right) \quad (3.6)$$

Après substitution de l'expression obtenue pour $W_{déch}$ (Éq. n°3.5) et dérivation, on obtient :

$$G = \frac{A}{e} R \left(nSt \frac{F_{YB}}{F_S} + 2 \right) F_{YB} \quad (3.7)$$

Dans ce qui suit, la constante A sera déterminée afin d'avoir l'expression finale du taux de restitution d'énergie G .

3.5.1.3 Conditions aux limites

Pour déterminer la constante A , nous allons tout d'abord déterminer les conditions aux limites. Ces conditions sont définies sur les bords de la zone *Del* (Figure 3.39). Pour le processus de déchirure, la valeur du travail nécessaire afin de faire propager une fissure dans le tissu doit passer d'une configuration initiale, où la longueur propagée est nulle ($c = 0$), à une autre, où $c = h$.

Où :

l_{\blacktriangledown} : Longueur de la zone *Del*

h : Hauteur de la zone *Del*

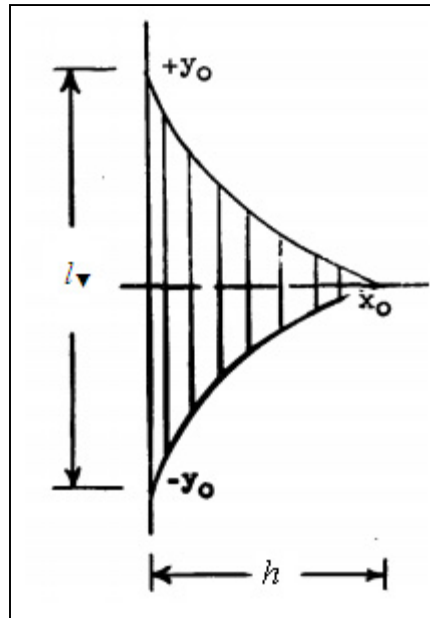


Figure 3.39 Modélisation de la zone *Del* (Teixeira et al. 1955)

a. Formation de la zone *Del*: $c = 0$

La zone *Del* est obtenue à la suite des glissements des fils entre eux. Cette phase, durant laquelle l'énergie dissipée est essentiellement générée par le glissement des fils, correspond à une longueur de déchirure égale zéro ($c = 0$) :

$$W_{déch}(c = 0) = l_s F_{S_{Totale}} \quad (3.8)$$

Où l_s et $F_{S_{Totale}}$ sont respectivement la longueur et la force totale de glissement des fils dans la zone *Del*.

Dans le but de comprendre ce processus, une analyse bien détaillée concernant le glissement des fils, qui se produit dans la zone *Del*, doit être réalisée.

D'un autre côté, des tests de glissement des fils de chaîne et de trame ont été menés sur différents tissus ont permis de montrer que les valeurs de la force de glissement obtenues, selon les deux directions, sont très proches (Figure 3.40). Ce résultat peut probablement s'expliquer par l'effet marquant de la pression locale des points de croisement des fils sur leur

glissement. Cette pression est la même selon la direction des fils de chaîne et la direction des fils de trame. En outre, il apparaît que le glissement des fils dans le sommet de la zone *Del* est quasiment nul.

Cette analyse permet de proposer la formule suivante pour calculer la force totale de glissement des fils $F_{S_{Totale}}$:

$$F_{S_{Totale}} = NStF_S \quad (3.9)$$

Où N est le nombre d'espacement des fils, S est l'espacement entre les fils, t est la densité des fils, F_S est la force de glissement et NSt est le nombre de fils glissés.

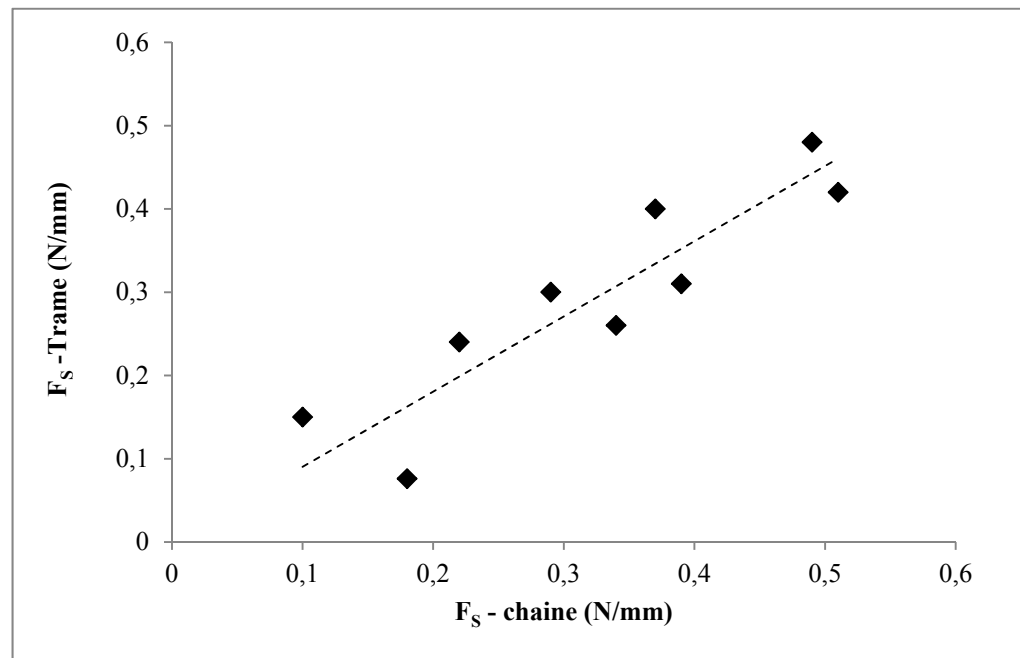


Figure 3.40 Force de glissement des fils de trame versus force de glissement des fils de chaîne

La longueur totale de glissement des fils l_S au moment de la formation de la zone de déchirure est égale à la somme des longueurs de fils l_{v_i} qui se trouvent dans la zone *Del*. À la suite des hypothèses que nous avons présentées dans le paragraphe précédent, nous proposons l'expression suivante pour calculer cette distance de glissement:

$$l_S = \sum_{i=1}^{N-3} l_{\nabla_i} \quad (3.10)$$

La simplification de l'équation 3.10 peut être écrite comme suit:

$$\sum_{i=1}^{N-3} l_{\nabla_i} = \frac{(N-3)}{2} (l_{\nabla} + l_{\nabla_{N-3}}) \quad (3.11)$$

Selon la géométrie de la zone *Del*, nous pouvons écrire : $l_{\nabla_i} \gg \gg l_{\nabla_{N-3}}$

L'expression finale du calcul de la longueur totale de glissement est donc la suivante :

$$l_S = \sum_{i=1}^{N-3} l_{\nabla_i} = \frac{(N-3)}{2} l_{\nabla} \quad (3.12)$$

Selon Teixeira et *al.* (1955), la longueur de la zone *Del* peut être écrite en fonction de sa hauteur:

$$l_{\nabla} = 2h = 2NS \quad (3.13)$$

Comme $h = NS$, nous pouvons donc écrire la formule de calcul du travail avant l'amorçage de la rupture des fils de la manière suivante :

$$W_{déch}(c=0) = l_S F_{S_{Totale}} = NS[N-3] NS t F_S \quad (3.14)$$

b. Propagation de la fissure : c = h

Dès que $c = h$, la fissure est propagée tout au long de la zone *Del*. La force de déchirure qui a été présentée par Taylor (1959) se trouve être la responsable de la déchirure de cette longueur h . Cela mène à écrire l'équation du travail nécessaire pour propager la fissure dans le tissu de la façon suivante :

$$W(c=h) = W_{déch} = h F_{déch} \quad (3.15)$$

Nous remplaçons $F_{déch}$ par son expression; la formule du travail de déchirure à $c = h$ peut être écrite comme suit:

$$W_{déch}(c = h) = NSF_{YB} \left(Stn \frac{F_{YB}}{F_S} + 2 \right) \quad (3.16)$$

À la suite des simplifications précédentes, le système final obtenu est le suivant :

$$\begin{cases} W_{déch}(c = 0) = NS[N - 3]NSStF_S \\ W_{déch}(c = NS) = NSF_{YB} \left(Stn \frac{F_{YB}}{F_S} + 2 \right) \end{cases} \quad (3.17)$$

Les conditions aux limites sur les bords de la zone *Del* impliquent alors la solution du système précédent:

$$B = \frac{NS[N - 3]NSStF_S}{R \left(nSt \frac{F_{YB}}{F_S} + 2 \right) F_{YB}} \quad (3.18)$$

Donc A est obtenue par :

$$A = \frac{1}{R} - \frac{(N - 3)NSStF_S}{R \left(nSt \frac{F_{YB}}{F_S} + 2 \right) F_{YB}} \quad (3.19)$$

3.5.1.4 Analyse en terme de G : Mécanismes de déchirure

Nous remplaçons A par son expression, l'équation 3.7 devient :

$$G = \frac{1}{e} \left[\left(Stn \frac{F_{YB}}{F_S} + 2 \right) F_{YB} + (3 - N)NSStF_S \right] \quad (3.20)$$

Une relation analytique entre le nombre d'espacement des fils N et le nombre de point croisement des fils n a été développée par Teixeira et *al.* (1955):

$$N = n \frac{F_{YB}}{F_S} \quad (3.21)$$

En utilisant la formule de N , l'équation 3.20 donne une équation de deuxième ordre (3.22). Celle-ci montre que le taux de restitution d'énergie G est relié au rapport entre la force à la rupture et la force de glissement. La variation de G en fonction du F_{YB}/F_S est illustrée à la Figure 3.41. Cette variation est non linéaire. Elle a une allure parabolique. La concordance entre la forme de la courbe expérimentale et l'équation du modèle semble significative. Une telle observation permet d'affirmer que cette expression du calcul du taux de restitution d'énergie de rupture est capable de décrire les différents mécanismes de déchirure qui sont contrôlés par les caractéristiques des tissus.

$$G = \frac{F_S}{e} \left[nSt(1-n) \left(\frac{F_{YB}}{F_S} \right)^2 + (2+3nSt) \frac{F_{YB}}{F_S} \right] \quad (3.22)$$

La figure suivante montre une variation polynomiale du taux de restitution d'énergie de rupture en fonction du rapport F_{YB}/F_S . Ces résultats offrent la possibilité d'analyser la propagation de la fissure en terme de F_{YB}/F_S . À partir de ce graphique, nous constatons que la variation de G est fortement influencée par le rapport entre F_{YB} et F_S . Cela signifie que la force de rupture ainsi que la force de glissement des fils sont les principales propriétés qui peuvent contrôler le taux de restitution d'énergie de rupture des tissus. En effet, quand $F_{YB}/F_S < 1$, c'est-à-dire lorsque la résistance au glissement des fils est élevée, la fissure se propage par rupture des fils. Par ailleurs, si le rapport $F_{YB}/F_S = 1$, la déchirure se fait par glissement/rupture des fils, alors que si $F_{YB}/F_S > 1$, c'est-à-dire lorsque la résistance au glissement des fils est faible, la fissure se propage par glissement des fils.

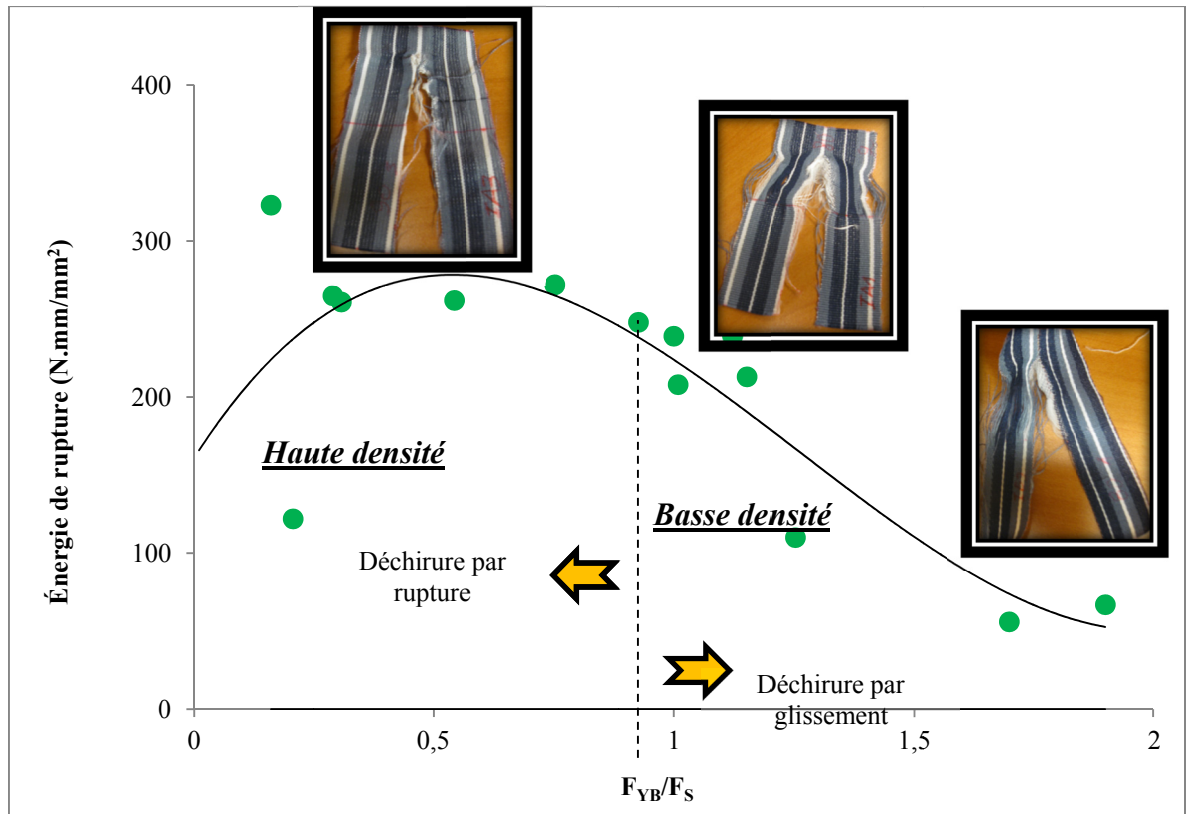


Figure 3.41 Mécanique (énergie) et mécanismes (glissement et rupture des fils) de déchirure des tissus

3.5.1.5 Validation du modèle

Afin de valider le modèle analytique qui a été élaboré, une comparaison entre les résultats théoriques et les résultats expérimentaux a été faite. Pour calculer le taux de restitution d'énergie de rupture G , l'expression finale simplifiée du modèle se présente de la façon suivante :

$$F_{YB} \quad (3.23)$$

Pour calculer le taux de restitution d'énergie de rupture en utilisant le modèle théorique, il faut tout d'abord déterminer les différentes caractéristiques du tissu nécessaire (densité des fils, épaisseur du matériau, etc.) Comme tous les paramètres sont faciles à obtenir sauf

l'espacement entre les fils S , nous proposons l'expression suivante pour déterminer empiriquement la valeur de S :

$$G - \frac{2F_{YB}}{e} = \frac{nSt}{e} \left[(1-n) \frac{F_{YB}^2}{F_S} + 3F_{YB} \right] \quad (3.24)$$

Selon la Figure 3.42, il apparaît que le rapport $\frac{nSt}{e}$ est une caractéristique du matériau, qui peut être déterminée empiriquement. À partir de la pente de la courbe ci-dessous, l'espacement S peut être obtenu.

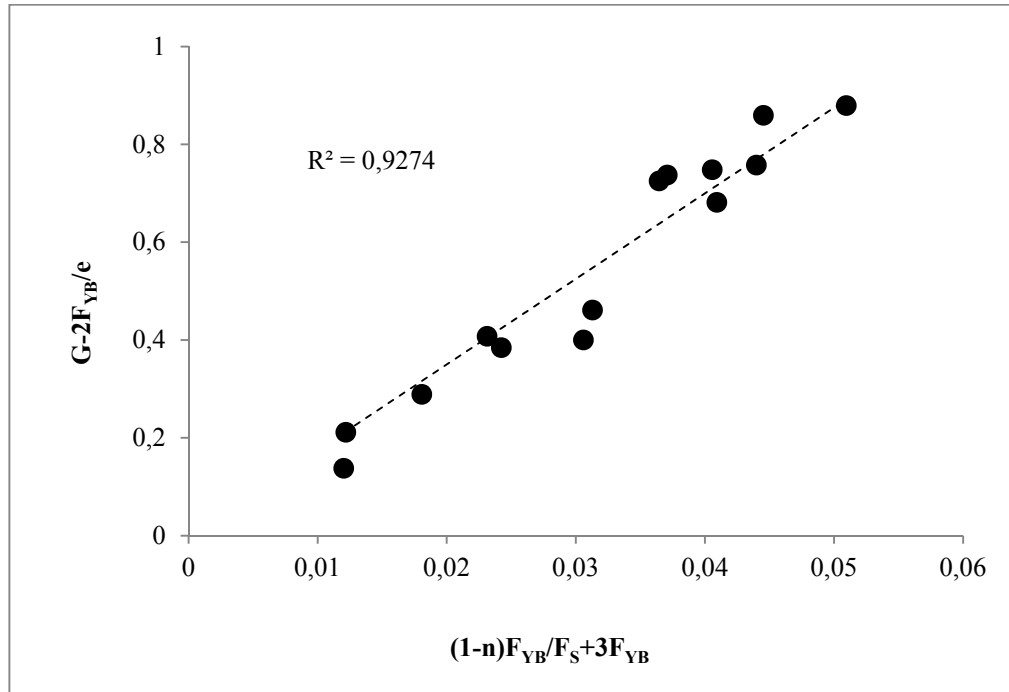


Figure 3.42 Caractéristique du matériau

Ce modèle de calcul du taux de restitution d'énergie de rupture (3.23) a été appliqué sur différents tissus. Les propriétés mécaniques des tissus ainsi que leurs caractéristiques sont présentés par le tableau suivant.

$$G = \frac{nSt(1-n)}{e} \frac{F_{YB}^2}{F_S} + \frac{(2+3nSt)}{e} F_{YB} \quad (3.25)$$

Tableau 3.2 Comportements en déchirure et caractéristiques des tissus

Tissus	G_{exp} (N.mm/mm²)	F_{YB} (N)	F_S (g)	n	e (mm)	t (fils/cm)	G_{th} (N.mm/mm²)
A	56	5,5	101	50	0,41	12	58
B	208	7,2	223	55	0,35	12	195
C	248	8,3	280	60	0,4	12	218
D	213	8,3	225	50	0,39	10	211
E	262	8,3	478	70	0,4	15	296
F	110	4,4	117	55	0,35	15	98
G	239	7,2	225	45	0,35	15	236
H	272	8,3	345	55	0,45	15	277
I	67	8,3	130	45	0,42	10	66
J	240	8,3	231	50	0,4	12	216
K	265	5,51	596	55	0,5	18	256
L	261	6,04	616	55	0,5	30	278
M	323	7,5	620	40	0,2	18	397
N	122	3,3	766	50	0,4	13	173

La Figure 3.43 illustre la variation de l'énergie de rupture obtenue par le modèle analytique en fonction de celle qui a été obtenue expérimentalement. Ces valeurs théoriques sont conformes aux valeurs expérimentales. Cette corrélation laisse supposer que ce modèle théorique est apte à bien décrire le comportement en déchirure des textiles.

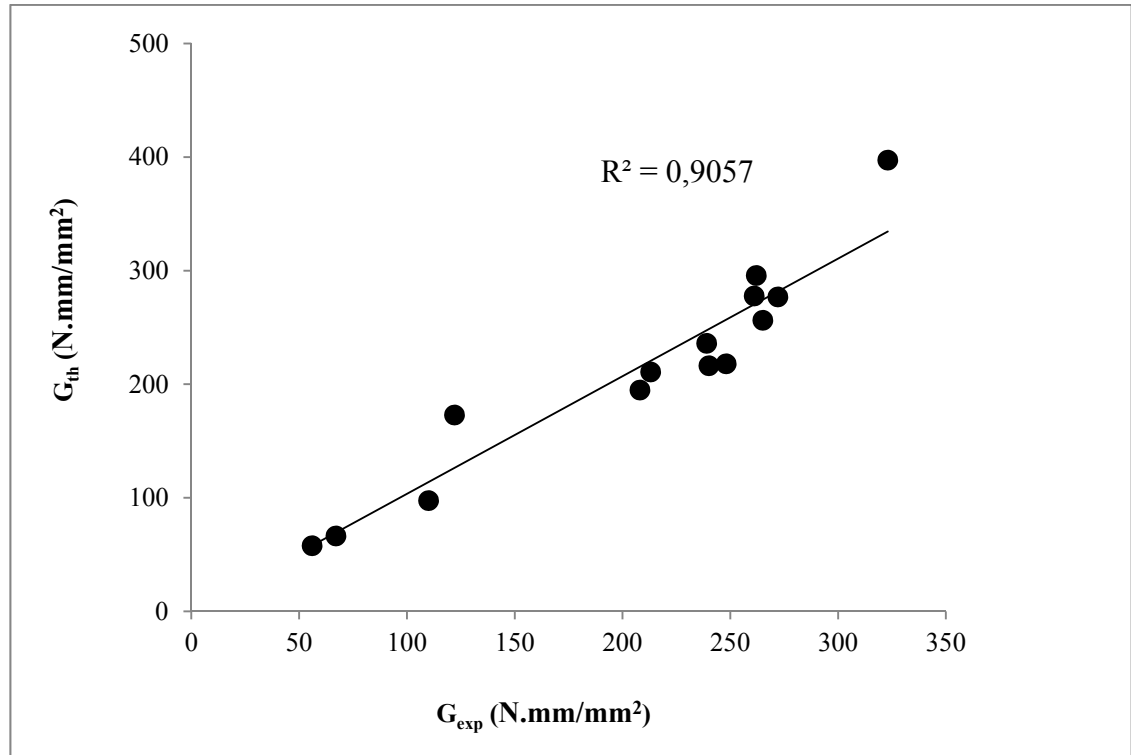


Figure 3.43 Taux de restitution d'énergie de rupture théorique versus taux de restitution d'énergie de rupture expérimental

3.6 Conclusion

Cette étude a mis en évidence l'influence de l'armure, de la masse linéique et de la densité des fils sur les propriétés de déchirure des tissus. De fait, l'évolution de la force de glissement, de la force d'empilement des fils, de la résistance à la rupture du tissu, du module initial du tissu a la même tendance en fonction de ces trois caractéristiques. En effet, ces derniers contrôlent la propagation de la fissure dans le tissu. Selon ces caractéristiques du tissu (armure, masse linéique et densité des fils), deux catégories de la déchirure peuvent être observées : la déchirure par glissement ou la déchirure par rupture des fils.

Pour déterminer les principaux mécanismes de déchirure, la relation entre certaines propriétés en déchirure a été réalisée. L'observation des courbes illustrant cette relation montre que l'effet du mécanisme de glissement des fils est le plus marquant. Ce mécanisme est en relation avec la résistance et la déformation à la rupture du tissu, le module initial du tissu et l'empilement des fils.

La partie modélisation de ce chapitre apporte une contribution supplémentaire à la partie expérimentale. Cette modélisation analytique qui s'est inspirée des travaux de Taylor (1959) permet d'établir une formulation pour calculer le taux de restitution d'énergie de rupture des tissus. Cette étude analytique offre aussi la possibilité d'étudier la déchirure en utilisant le rapport entre la force de glissement et la force à la rupture du fil. Ce modèle fait également intervenir la densité des fils, le nombre de croisement des fils et l'espacement entre les fils du tissu.

CHAPITRE 4

DÉCHIRURE DES TEXTILES ENDUITS

4.1 Introduction

Dans les deux chapitres précédents, nous avons étudié la déchirure des structures textiles. Les mécanismes de déchirure ont été mis en évidence. Un critère de calcul de l'énergie de rupture a été défini. Par la suite, un modèle qui relie l'énergie de rupture avec d'autres propriétés en déchirure du matériau a été déterminé. Cette étude montre que la force de glissement des fils et leur force à la rupture sont les grands responsables de la propagation de la fissure dans les textiles.

Ce chapitre sera consacré à l'étude de la déchirure des textiles enduits. Selon certains auteurs (Abbott et al. 1971a; Abbott et al. 1971b; Dutta 1994), la propagation de la fissure dans les textiles enduits est obtenue par la déchirure du support textile et de la couche d'élastomère ainsi que par l'interaction entre le textile et l'enduit. Afin de bien compléter leurs travaux, il est nécessaire que l'étude de la déchirure de ces matériaux passe par la détermination du comportement en déchirure du support textile et de l'enduit ainsi que du comportement en adhésion du textile avec l'enduit.

Les résultats de la déchirure des textiles ont été présentés dans les chapitres précédents. Dans ce chapitre, l'étude de la déchirure des élastomères et des textiles enduits ainsi que du délaminage du textile et de l'enduit sera réalisée.

Dans la première partie, nous présenterons les différents mécanismes de déchirure des textiles enduits. La seconde portera sur l'identification des mécanismes de la propagation de la fissure et sur la détermination de l'énergie de rupture des élastomères. Ensuite, dans la troisième partie, nous réaliserons des essais de délaminage afin de déterminer la force d'adhésion du textile avec l'enduit pour différents matériaux. Finalement la quatrième partie présentera l'étude du comportement en déchirure des textiles enduits.

4.2 Mécanismes de déchirure

Quel que soit le support textile, tissé ou tricoté, l'analyse de la rupture des textiles enduits montre que la fissure résulte de la déchirure simultanée de l'enduit et du support textile. L'amorçage de la fissure est observé soit dans le support textile, soit dans l'enduit. Cet amorçage est fortement dépendant du comportement en déchirure de chaque couche du matériau.

Pendant un essai de déchirure pantalon, nous observons, dans la zone de déchirure, des incompatibilités de déformation entre les deux couches de matériaux qui donnent naissance à des concentrations de contraintes importantes. La déformation des matériaux au niveau de la zone de déchirure produit une force de cisaillement entraînant le délaminage des deux couches (Figure 4.1). Ce mécanisme de délaminage est suivi par une formation de la zone *Del* dans le support textile. La couche d'enduit continue à se déformer. Enfin, la déchirure de l'enduit et du support textile se produit simultanément avec une vitesse de déchirure différente.

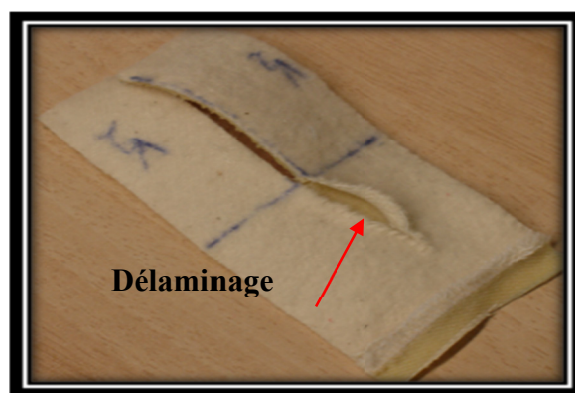
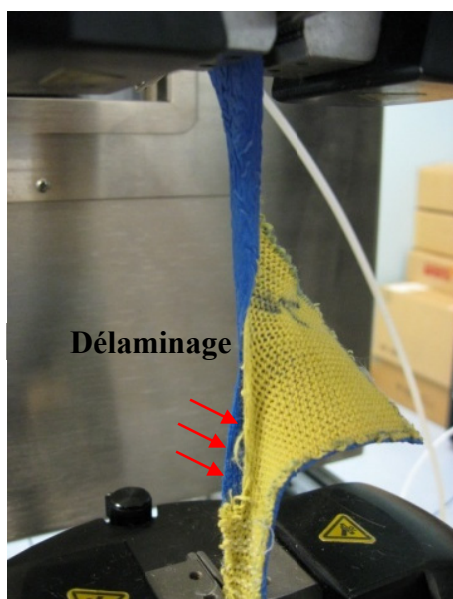


Figure 4.1 Mécanismes de déchirure des textiles enduits, issus d'un test de déchirure pantalon

Le cliché obtenu par le microscope électronique à balayage (MEB) du faciès de déchirure des textiles enduits présente des traces de délaminage du textile enduit (Figure 4.2). Les mécanismes de déchirure de l'enduit sont aussi observés sur les faciès de rupture. Ces mécanismes seront déterminés dans la partie suivante. Cette analyse permet de constater que la déchirure des textiles enduits est obtenue par la contribution du comportement en adhésion du textile avec l'enduit et du comportement en déchirure du support textile et de l'enduit.

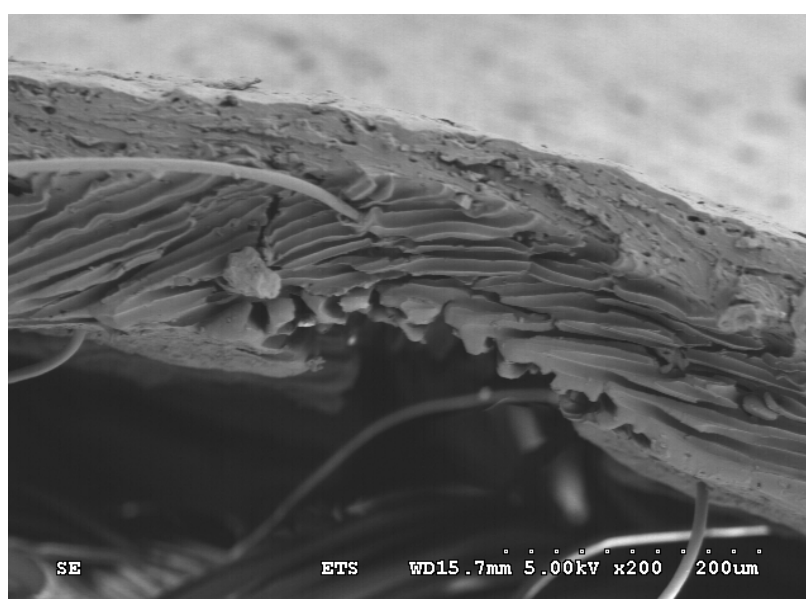


Figure 4.2 Faciès de rupture d'un tissu enduit : traces de délaminage

4.3 Déchirure des élastomères

La compréhension des mécanismes de déchirure des élastomères est une étape indispensable à l'étude de la déchirure des textiles enduits. Jusqu'à présent, uniquement les mécanismes de rupture des élastomères par des essais de traction-compression, de torsion et de fatigue ont été étudiés (Saintier 2001; Kim and Jeong 2005). Cependant, les mécanismes de déchirure de ces matériaux ne sont pas mis en évidence. Uniquement le mode de la propagation de la fissure a été mis en évidence, notamment la propagation en *Stick-Slip* (Greensmith and Thomas 1955). De fait, l'identification des mécanismes mis en jeu jusqu'à la déchirure totale des élastomères a fait l'objet de cette partie.

4.3.1 Matériaux

Les matériaux utilisés pour étudier les mécanismes de déchirure des élastomères sont des néoprènes, des polyacétate de vinyles et des caoutchoucs naturels. Ces matériaux sont renforcés par des inclusions dans le but d'améliorer leurs propriétés mécaniques. L'enduction des textiles utilisés dans le domaine du vêtement de protection est généralement menée par ces trois matériaux.

4.3.2 Essais de déchirures

Le protocole expérimental des essais de déchirure est appliqué selon la norme européenne EN 388 (2003). Les échantillons ont une incision centrale d'une longueur de 50 mm, réalisée à l'aide d'une lame de rasoir. Ces échantillons sont des plaques d'élastomère de différentes épaisseurs, de 50x100 mm, (Figure 4.3). Les essais de déchirure sont effectués par la machine de traction MTS-Alliance à une vitesse de sollicitation de 100 mm/min. Pendant les tests, la courbe de déchirure force-déplacement a été simultanément enregistrée.

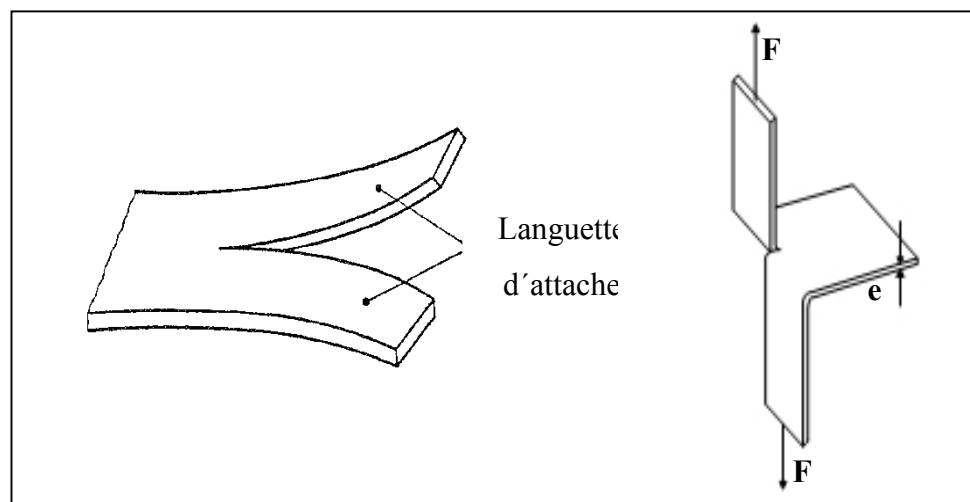


Figure 4.3 Méthode de déchirure pantalon des plaques d'élastomères
Tirée de Tung (2007)

4.3.3 Analyse des faciès de rupture après la déchirure

L'observation du profil de fissure est une étape importante pour l'obtention des renseignements concernant les mécanismes de propagation de la fissure dans le matériau. Une analyse des faciès de rupture des plaques de néoprène, par la spectrométrie à dispersion d'énergie, montre que les inclusions se composent de silice, de kaolins et de carbonate de calcium. Une analyse précise des composants d'agglomérat permet de voir que ces inclusions contiennent aussi des agents de vulcanisation (S, CaO, MgO et ZnO) (Tableau 4.1).

Tableau 4.1 Exemple des compositions chimiques des inclusions rigides pour une plaque en néoprène

Compositions chimiques	O	Mg	Si	Cl	K	Ca	Zn
% en poids	48.76	2.42	2.1	14.21	0.67	28.28	3.55

Les analyses MEB montrent que ces inclusions proviennent des particules élémentaires à l'agrégat. Ces particules sont fortement liées entre elles dans un domaine de quelques nanomètres. La structure secondaire de chaque inclusion est formée par le groupement des agglomérats. Ces différents agglomérats de silice, de kaolins et de carbonate de calcium sont aussi regroupés pour former des inclusions de taille plus importante, de quelques dizaines de micromètres (Figure 4.4). Grâce à leur grande taille, ces inclusions modifient la direction de la propagation de la fissure dans le matériau.

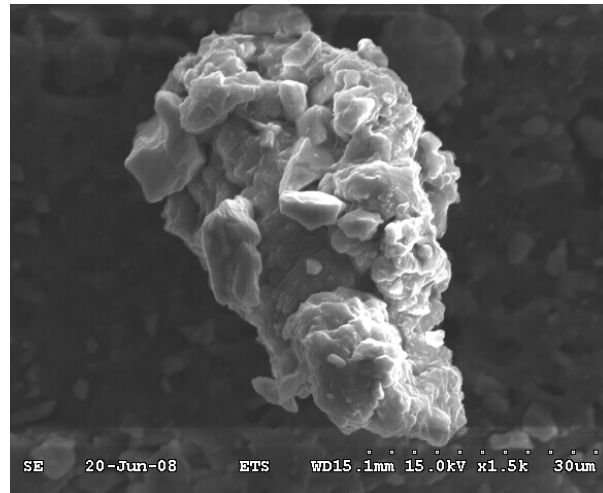


Figure 4.4 Groupe d'agglomérats

L'observation par MEB a permis de mieux identifier les mécanismes de déchirure des élastomères. L'analyse des faciès de rupture offre la proposition de trois différents mécanismes de déchirure du matériau étudié : la cavitation, la décohésion des inclusions et la rupture des inclusions telles qu'elles sont illustrées par la Figure 4.5.

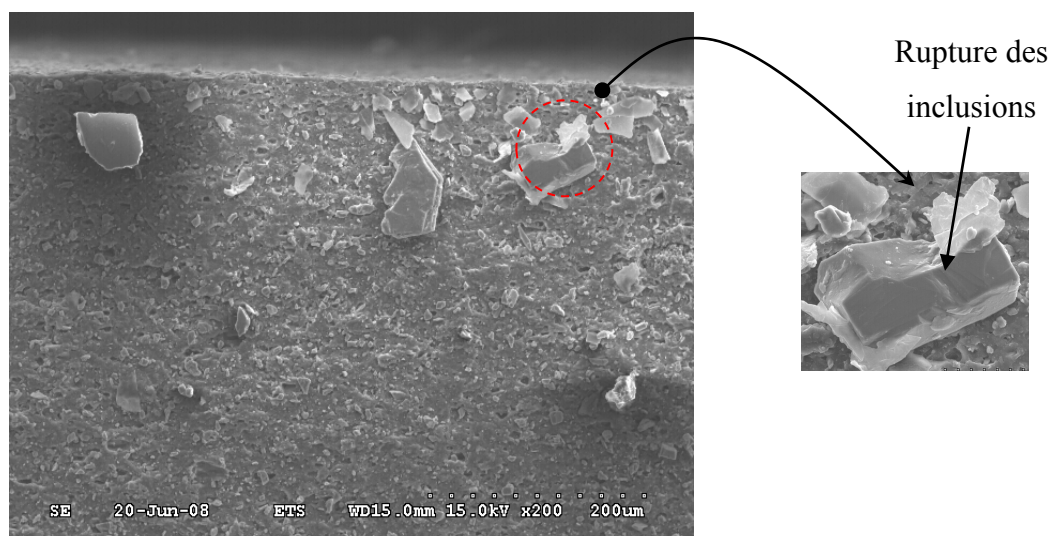


Figure 4.5 Faciès de rupture du matériau après déchirure

Les clichés présentés par la Figure 4.6 montrent un phénomène de cavitation, associé à l'apparition des trous de diamètres différents sur le trajet de la propagation de la fissure. Ce phénomène de cavitation observé en déchirure a déjà aussi été aperçu en traction monotone et en fatigue des caoutchoucs naturels chargés (Saintier 2001). L'analyse des faciès de déchirure montre que la cavitation est apparue soit de manière spontanée dans la matrice (Figure 4.6 a), soit aux pôles des inclusions (Figure 4.6 b).

La cavitation est souvent créée spontanément, par exemple, dans le cas de l'écoulement du fluide sous pression dans des tubes en aciers. Ce phénomène est obtenu sous l'effet d'une action extérieure et par la présence d'un vide au sein du matériau, qui initialement était non poreux. Mais, pendant la déchirure des élastomères chargés, ce phénomène est favorisé par la présence des inclusions rigides (SiO_2 , $CaCO_3$, ...) (Saintier 2001).

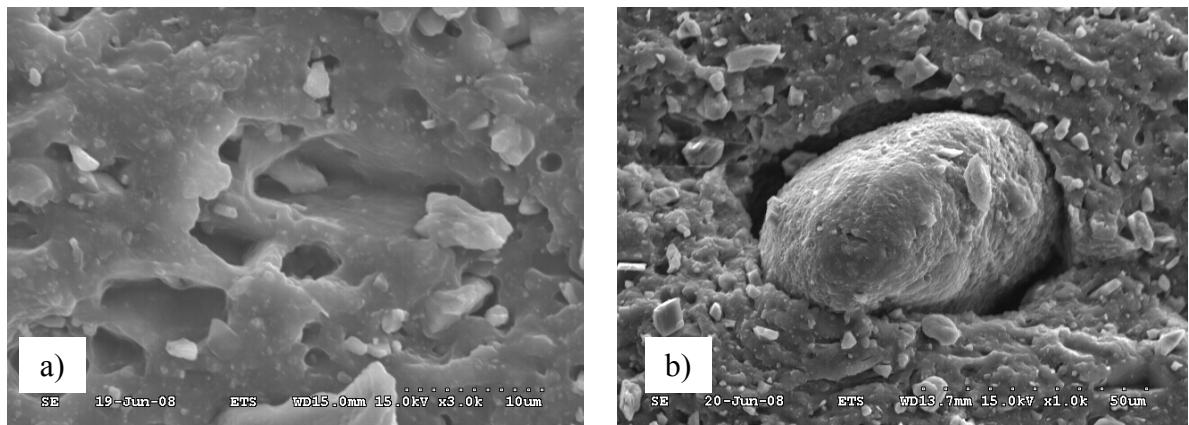


Figure 4.6 Mécanisme de déchirure, a) cavitation spontanée, b) cavitation aux pôles des inclusions

En ce qui concerne la décohésion des inclusions, elles se détachent de la matrice. Ce phénomène se situe au pôle des inclusions (Figure 4.7). Ce mécanisme d'endommagement concerne généralement les groupes d'agglomérats de quelques dizaines de micromètres. Il s'appelle mode de rupture inter-granulaire (Gent and Pulford 1984).

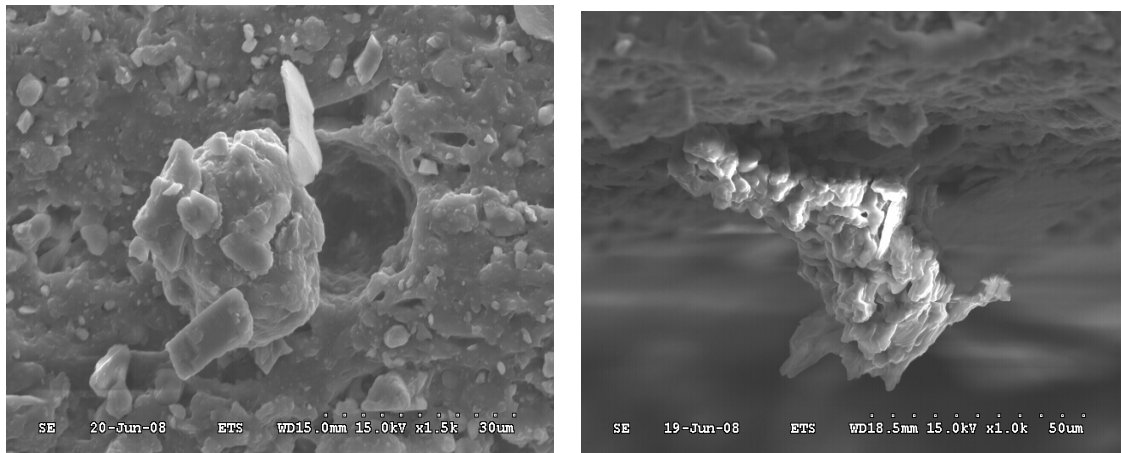


Figure 4.7 Mécanisme de déchirure : décohésion des inclusions

Les clichés illustrés à la Figure 4.8 présentent un exemple de l'état de la surface de la déchirure des échantillons. Des cavités se créent autour des inclusions, qui favorisent sa décohésion. Ce résultat confirme les travaux de Gent et Pulford (1984). Ces derniers ont montré que la décohésion intervient lorsque l'interface matrice-inclusion est faible, mais cette décohésion est toujours précédée du processus de cavitation.

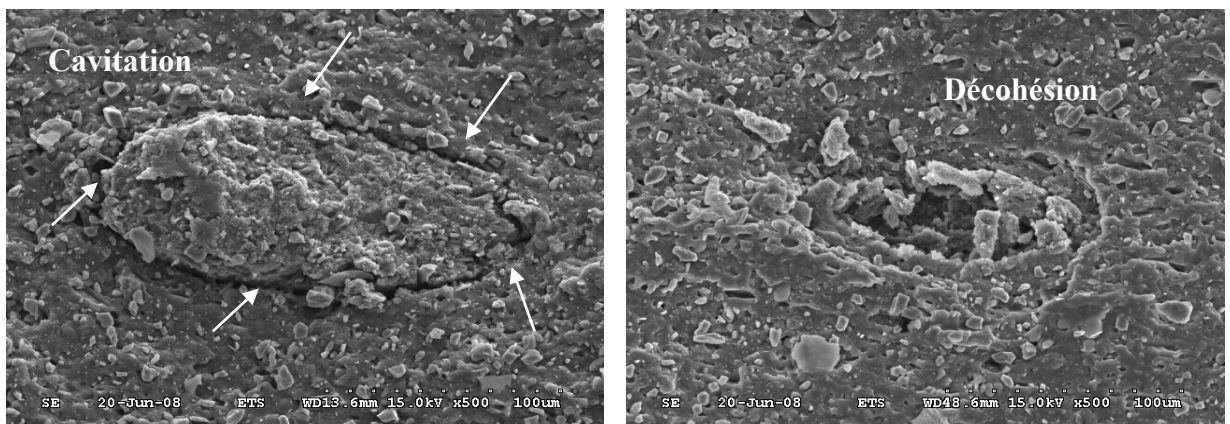


Figure 4.8 Cavitation autour d'un agglomérat qui favorise son décohésion

Un autre mécanisme de déchirure est observé à un grossissement plus grand; c'est la rupture de ces inclusions Figure 4.9 a. La micro-analyse réalisée des deux côtés de la zone de décohésion de l'inclusion révèle la présence de résidus d'inclusion (Figure 4.9 b). Ces résidus

semblent indiquer la rupture d'un agglomérat. Cette rupture est causée généralement par la présence de cavitation (Figure 4.9 c).

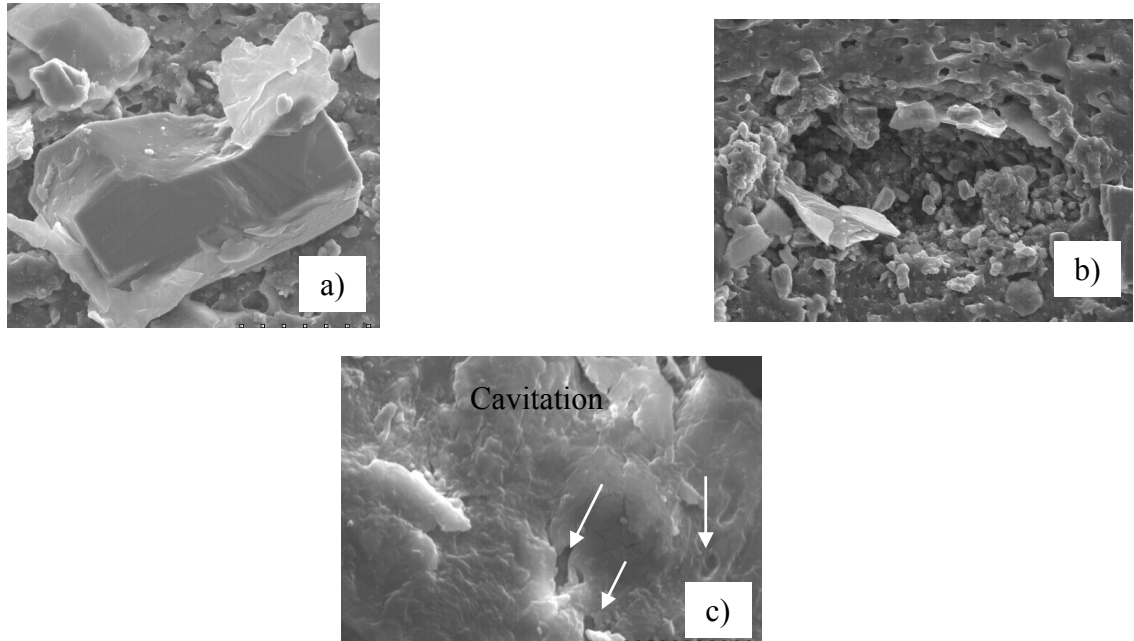


Figure 4.9 Mécanismes de déchirure : a) rupture des inclusions, b) présence de résidus des inclusions, c) rupture des inclusions par cavitation

En résumé, les différents faciès obtenus à la suite la déchirure des plaques d'élastomère (néoprène, polyacétate de vinyle et caoutchouc) révèlent des mécanismes distincts de la propagation de la fissure : cavitation, décohésion des inclusions et rupture des inclusions. Ces mécanismes de déchirure se joignent à ceux du support textile (glissement, empilement et rupture des fils) ainsi qu'au délaminage du textile et de l'enduit pour conduire finalement à la déchirure totale du textile enduit.

4.3.4 Critère de déchirure

Le calcul de l'énergie de rupture des élastomères est basé sur le critère de rupture qui a été développé par Rivlin et Thomas (1959). L'énergie de rupture G_{C_E} est calculée de la façon suivante:

$$G_{C_E} = - \left(\frac{\Delta W_E}{\Delta A_E} \right)_l \quad (4.1)$$

Où la variation du travail de déchirure ΔW_E et la variation de la surface de rupture ΔA_E ont été calculés par les expressions suivantes :

$$-\Delta W_E = W_{E_1} - W_{E_2} \quad (4.2)$$

$$\Delta A_E = A_{E_1} - A_{E_2} \quad (4.3)$$

Le calcul de l'énergie de rupture de l'enduit a été obtenu à la suite des essais de déchirure chargement et déchargement des échantillons de forme pantalon. En effet, ces essais sont réalisés à différents déplacements l_i de la mâchoire mobile de la machine de traction. À chaque valeur du déplacement appliqué, la courbe de déchirure force-déplacement a été enregistrée (Figure 4.10). Par la suite, le travail de déchirure W_{Ei} a été calculé par l'intégration de l'aire sous la courbe force-déplacement. De même, la surface A_{Ei} a été mesurée dans l'état non déformé de l'échantillon.

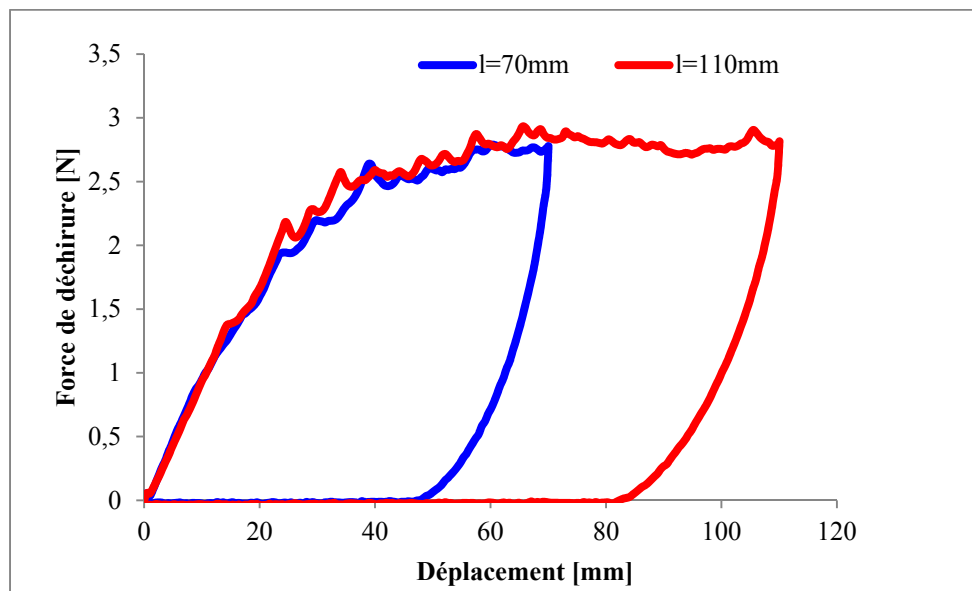


Figure 4.10 Courbes force-déplacement issues des essais de déchirure pantalon des plaques d'élastomères : néoprène, polyacétate de vinyle ou caoutchouc naturel

Par la suite, ces résultats permettent de tracer la courbe de déchirure travail-surface afin de déterminer l'énergie de rupture G_{C_E} à partir de la pente de la droite (Figure 4.11).

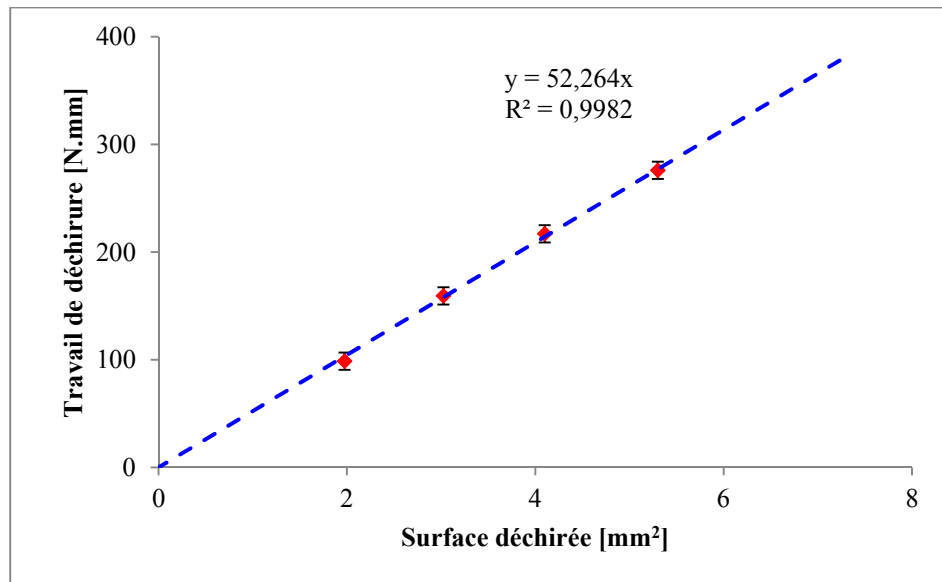


Figure 4.11 Variation du travail de déchirure en fonction de la surface déchirée des plaques d'élastomères : néoprène, polyacétate de vinyle ou caoutchouc naturel

4.4 Délaminage du textile et de l'enduit

4.4.1 Matériaux

Les matériaux testés sont des tissus en polyester laminés par une couche de polyacétate de vinyle, des tricots en kevlar et en coton laminés par une couche de caoutchouc naturel. Le tableau suivant présente ces trois matériaux:

Tableau 4.2 Différents types de matériaux utilisés pour étudier le comportement en délaminage du textile et de l'enduit

Type de matériaux	Support textile	Couche d'enduit
Tissu enduit	30% de tissu en polyester	70% de polyacétate de vinyle
Tricot enduit	27% de tricot en kevlar	73% de caoutchouc naturel
Tricot enduit	23% de tricot en coton	77% de caoutchouc naturel

4.4.2 Méthode de délaminage T-peel

L'étude du comportement en adhésion entre la couche d'enduit et le support textile a été réalisée afin de mieux comprendre la déchirure des textiles enduits. La résistance au délaminage du textile et de l'enduit est caractérisée par la mesure de la force (Dartman and Shishoo 1993). Les échantillons utilisés, de 100 x 50 mm, possèdent un pré-délaminage sur une longueur de 30 mm. L'essai consiste tout d'abord à fixer chaque couche dans une mâchoire de la machine de traction MTS-Alliance. Puis un déplacement a été appliqué à une vitesse de 100 mm/min. Dès que la force atteint une valeur maximale, le phénomène de délaminage du textile et de l'enduit se produit. La séparation de deux couches se fait progressivement jusqu'à un déplacement l_i imposé (Figure 4.12).

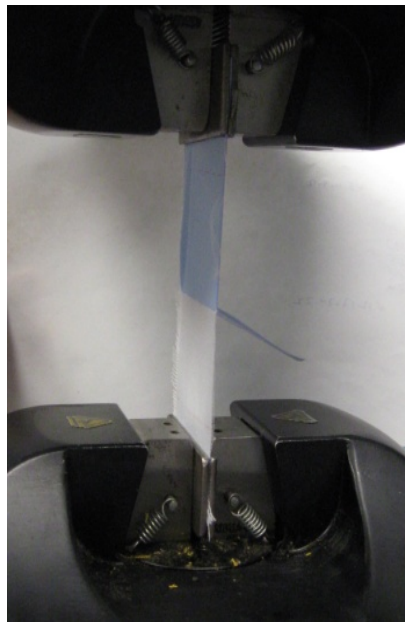


Figure 4.12 Caractérisation du comportement en adhésion du textile avec l'enduit par la méthode T-peel

4.4.3 Étude de l'adhésion du textile avec l'enduit

L'adhésion entre la couche d'enduit et le support textile est un paramètre essentiel pour les textiles enduits. Une bonne adhésion entre les deux couches de matériaux est généralement conditionnée par la pénétration de l'enduit dans la structure textile et par des agents chimiques

(Miller et al. 1987). En outre, ce comportement dépend généralement de la compatibilité entre le substrat et la couche d'enduit, traduite par l'adhésion chimique. Celle-ci est contrôlée par l'interaction entre les fibres et l'enduit, des agents liants et les conditions d'enduction. On trouve aussi l'adhésion mécanique qui est contrôlée par le type de fibres, la densité des fils, le type de l'armure et la torsion des fils.

Le comportement en adhésion du textile avec l'enduit, déterminé par la méthode de délamination T-peel (Miller et al. 1987), montre que la courbe de la force de délamination varie légèrement entre des maximums et des minimums. Cette fluctuation est due à l'effet de la pénétration inhomogène de la couche d'enduit dans le support textile (Figure 4.13).

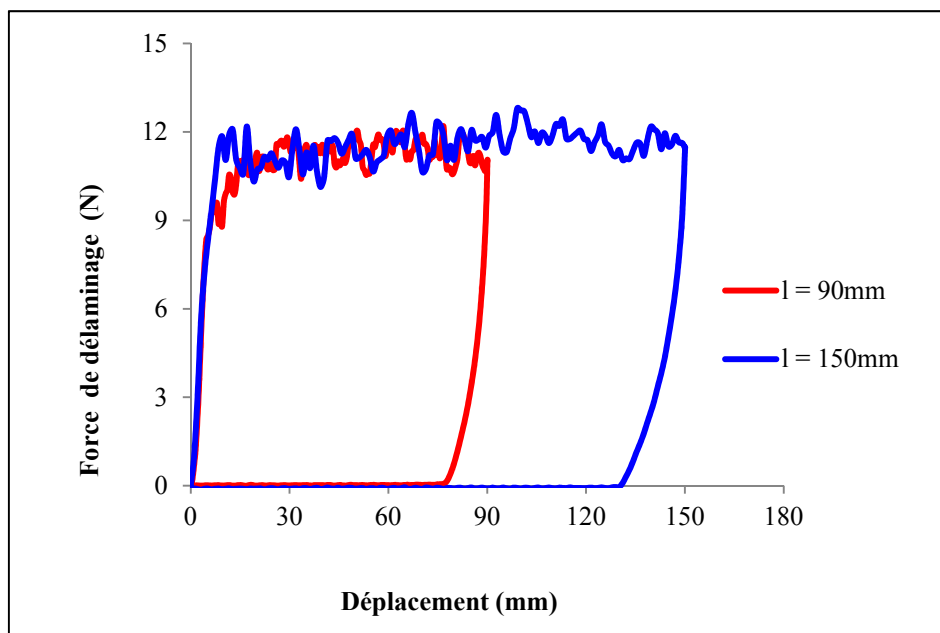


Figure 4.13 Courbes de délamination force-déplacement obtenues à la suite des essais de délamination T-peel

L'adhésion de l'enduit avec le support textile est caractérisée par le calcul de la moyenne de la force maximale obtenue lors d'un essai de délamination du textile et de l'enduit.

Dans le but d'étudier le comportement en adhésion, une étude de l'effet de l'épaisseur de la pénétration de l'enduit dans le support textile sur la variation de la force de délamination a été

réalisée. Pour normaliser cette pénétration, nous proposons de calculer le degré de pénétration ξ qui est égal au rapport établi entre l'épaisseur de pénétration δ et l'épaisseur du support textile e_T :

$$\xi = \frac{\delta}{e_T} \quad (4.4)$$

Dans notre cas, les textiles enduits ont subi une enduction monocouche. La pénétration de l'enduit dans le support textile est alors partielle. Ainsi, la valeur du degré de pénétration est toujours inférieure à l'unité. Les résultats obtenus donnent une idée en ce qui a trait à l'influence du degré de pénétration sur la valeur de la force d'adhésion du textile avec l'enduit. Pour les trois différents textiles enduits choisis, nous avons déterminé la force de délaminage ainsi que le degré de pénétration.

La Figure 4.14 montre l'influence du degré de pénétration sur la force de délaminage des tissus enduits. Une grande pénétration de la couche enduite dans le tissu engendre une augmentation de cette force. La figure ci-dessous indique que le comportement en adhésion obtenu selon la direction des fils de chaîne est supérieur à celui qui correspond à la direction des fils de trame. Cette tendance peut possiblement être expliquée par la direction d'enduction du tissu qui influe d'une manière significative sur l'épaisseur de la pénétration. Selon Abbott *et al.* (1971a), la pénétration de l'enduit est maximale dans la direction de l'enduction. De l'autre côté, ce résultat peut être associé au diamètre des fils de chaîne et de trame qui est en relation avec la masse linéique et la torsion des fils. En effet, l'examen de nos échantillons révèle que le diamètre des fils de chaîne est plus faible que celui des fils de trame. Ainsi, la pénétration semble être favorisée selon cette direction. La force de délaminage du textile et de l'enduit, mesurée selon la direction des fils de chaîne, est donc supérieure à celle qui est obtenue selon la direction des fils de trame.

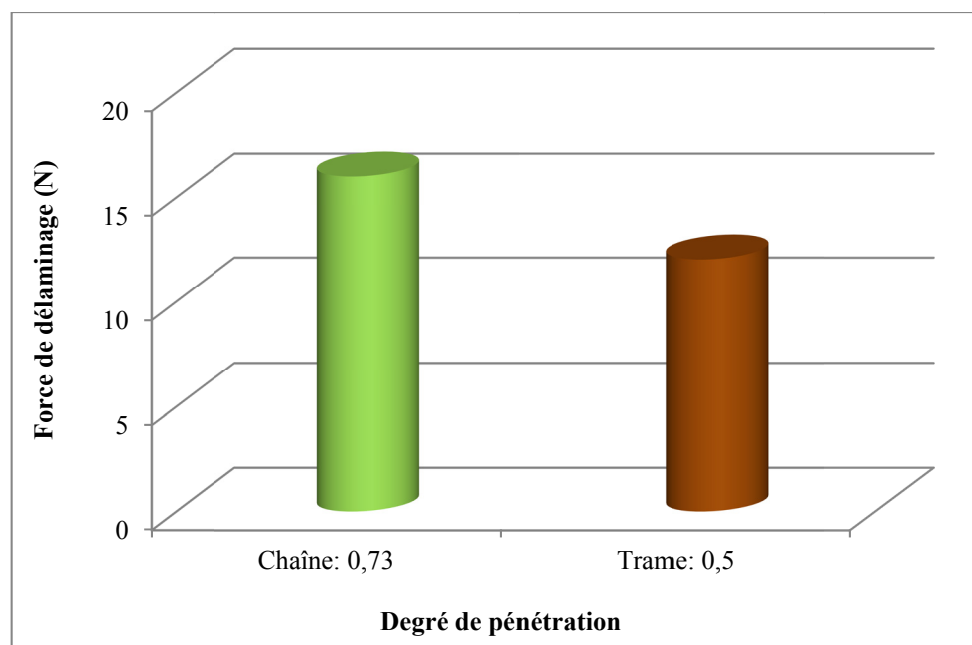


Figure 4.14 Effet du degré de pénétration de l'enduit sur la force de délaminage du tissu en polyester et du polyacétate de vinyle

La même tendance a été vérifiée sur des tricots enduits. Pour ces matériaux, l'enduction des textiles est effectuée par trempage. De fait, il n'existe aucune direction privilégiée de la pénétration de l'enduit dans le support textile. Par ailleurs, l'analyse de résultats révèle que l'épaisseur de pénétration de l'enduit change d'une direction à une autre. L'épaisseur de pénétration qui correspond à la direction colonne est supérieure à celle obtenue selon la direction rangée. L'adhésion entre le textile et l'enduit selon la direction colonne est la meilleure (Figure 4.15 et 4.16). La variation de la force d'adhésion du textile avec l'enduit d'une direction à une autre peut être associée à l'arrangement de mailles dans la structure du support textile.

La direction d'orientation des mailles ou la direction colonne qui est formée par un ensemble de mailles entrelacées (verticalement) les unes au-dessus des autres (et les unes dans les autres) peut favoriser la pénétration de l'enduit. Toutefois, la direction rangée est constituée d'un ensemble de mailles juxtaposées (horizontalement) les unes à côté des autres (Figure 4.17). Selon cette direction, la pénétration est la plus faible. D'après cette disposition de

mailles, il apparaît que la façon d’orienter les mailles a un effet significatif sur la pénétration de la couche d’enduit ainsi que par conséquent, sur la variation de la force de délaminage.

En comparant les résultats illustrés par les deux figures, il apparaît que l’adhésion obtenue dans le cas des textiles issus des fibres naturelles est supérieure à celle des textiles en fibres synthétiques. Ce résultat est en accord avec celui présenté dans la littérature (Dutta 1994). Ce résultat peut s’expliquer par le fait que les fibres synthétiques (en Kevlar, Polyester) possèdent une rugosité plus faible que les fibres naturelles (en Coton).

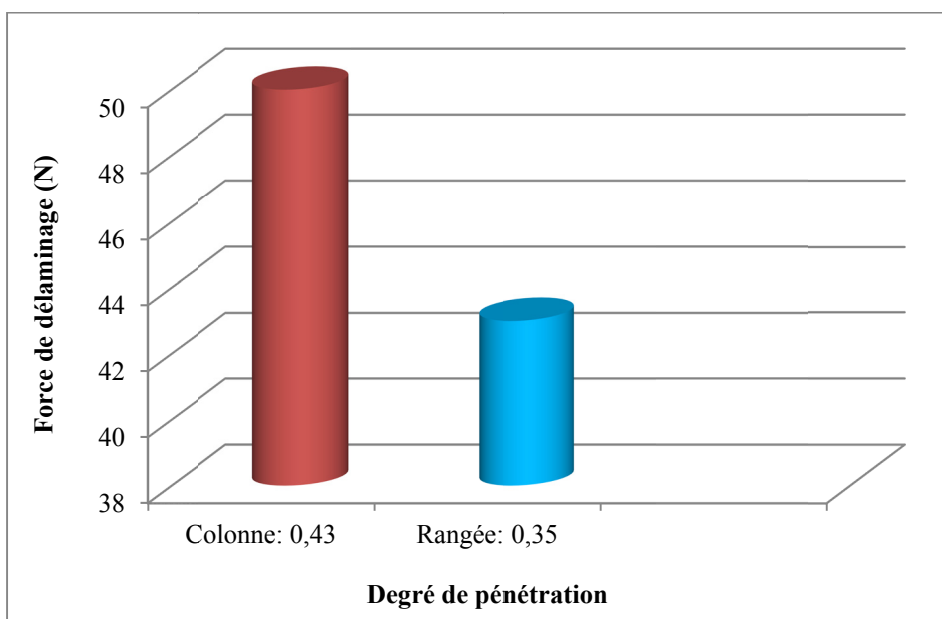


Figure 4.15 Effet du degré de pénétration de l’enduit sur la force de délaminage du tricot en kevlar et d’élastomère en caoutchouc

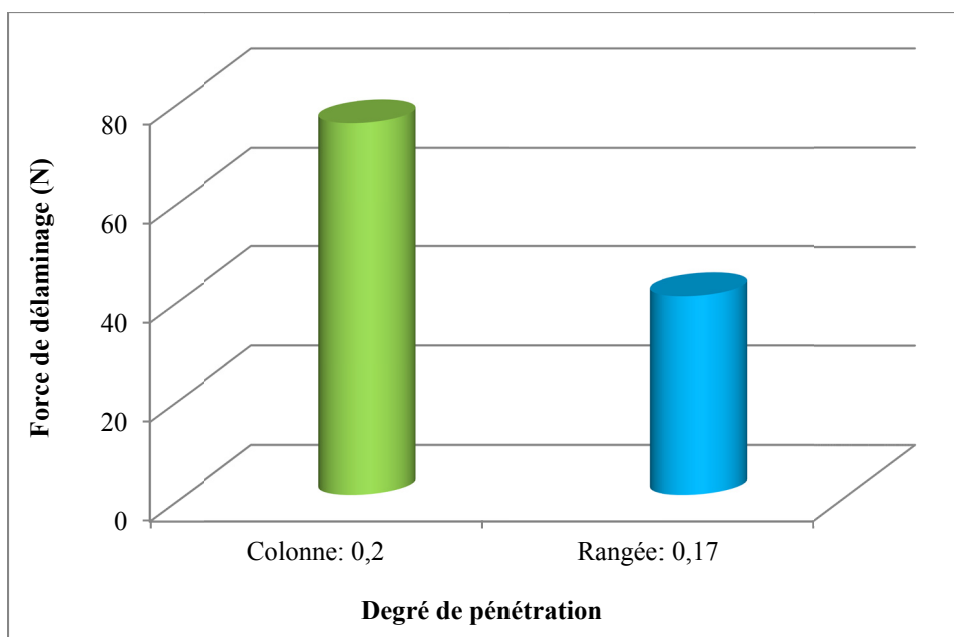


Figure 4.16 Effet du degré de pénétration de l'enduit sur la force de délaminage du tricot en coton et d'élastomère en caoutchouc

4.5 Étude de la déchirure des textiles enduits

L'étude de la déchirure des textiles enduits présente différentes étapes. La prise en considération de tous les mécanismes de déchirure rend notre étude plus crédible.

Ainsi, l'étude de la déchirure impose que tous les mécanismes de la propagation de la fissure doivent être déterminés pour comprendre la propagation de la fissure dans ce type de matériaux. Ces mécanismes ont été présentés dans les paragraphes précédents. Un critère de rupture doit être maintenant établi afin de pouvoir caractériser la résistance à la déchirure.

4.5.1 Matériaux et protocoles expérimentaux

4.5.1.1 Matériaux

L'étude de la déchirure des textiles enduits est menée sur des tissus et des tricots qui ont été laminés par une couche de polyacétate de vinyle (Tableau 4.3).

Tableau 4.3 Différents types de matériaux utilisés pour étudier le comportement en déchirure des textiles-enduits

Type de matériaux	Support textile	Enduit
M1 : Tissu enduit	30% de tissu en polyester	70% de polyacétate de vinyle
M2 : Tricot enduit	26% de tricot en polyester	73% de polyacétate de vinyle
M3 : Tricot enduit	22% de tricot en polyester	78% de polyacétate de vinyle

Dans ce travail, les supports textiles utilisés sont des tissus d'armure toile et des tricots de mailles cueillies possédant une tête, des pieds visibles et des jambes cachées (Figure 4.17-c), bien que d'autres tricots existent avec une tête, des pieds cachés et des jambes visibles (Figure 4.17-b) (Piotin 2005).

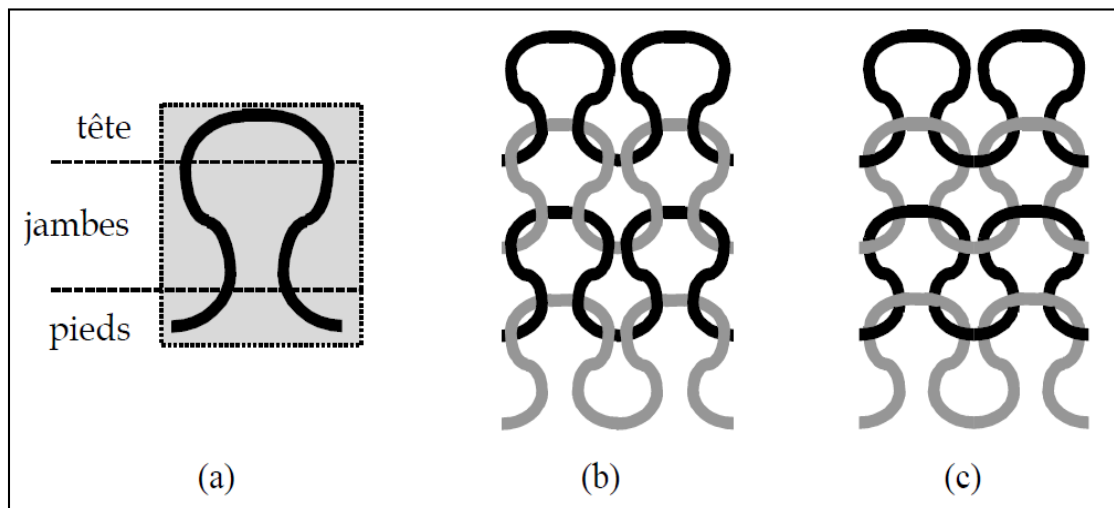


Figure 4.17 Supports textiles tricotés à mailles cueillies
Tirée de Piotin (2005)

Les tricots choisis sont renforcés en doublant la tête de la dernière maille fabriquée (Figure 4.18). Dans ce qui suit, l'effet de cette charge sur le comportement en déchirure sera mis en évidence.

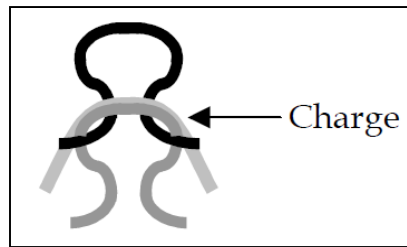


Figure 4.18 Renfort des mailles par un fil de charge
Tirée de Piotin (2005)

4.5.1.2 Méthode de déchirure pantalon

Les tests de déchirure pantalon ont été menés selon la méthode décrite dans la norme EN 388 (2003) relative aux gants de protection (Figure 4.19). Les échantillons, possédant une pré-fissure centrale d'une longueur de 50 mm, ont une dimension de 100 x 50 mm. Les essais de déchirure sont des tests de chargement-déchargement à une vitesse de 100 mm/min et à différents niveaux de déplacements l_i , réalisés sur la machine de traction MTS-Alliance. La courbe de déchirure force-déplacement est enregistrée (Figure 4.20). De plus, la surface de rupture est mesurée.

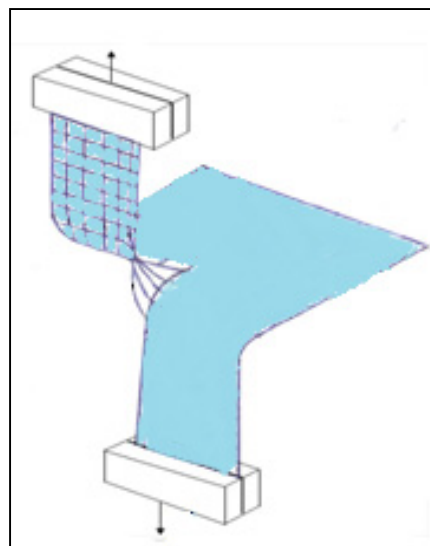


Figure 4.19 Essai de déchirure pantalon d'un tissu enduit

La courbe donnant la variation de la force de déchirure obtenue pour les textiles enduits est similaire à celle qui correspond à la déchirure des textiles. De même, la force de déchirure varie entre un maximum et un minimum (Figure 4.20). Cette variation est aussi due à la propagation de la fissure, qui se produit par la formation de la zone *Del*.

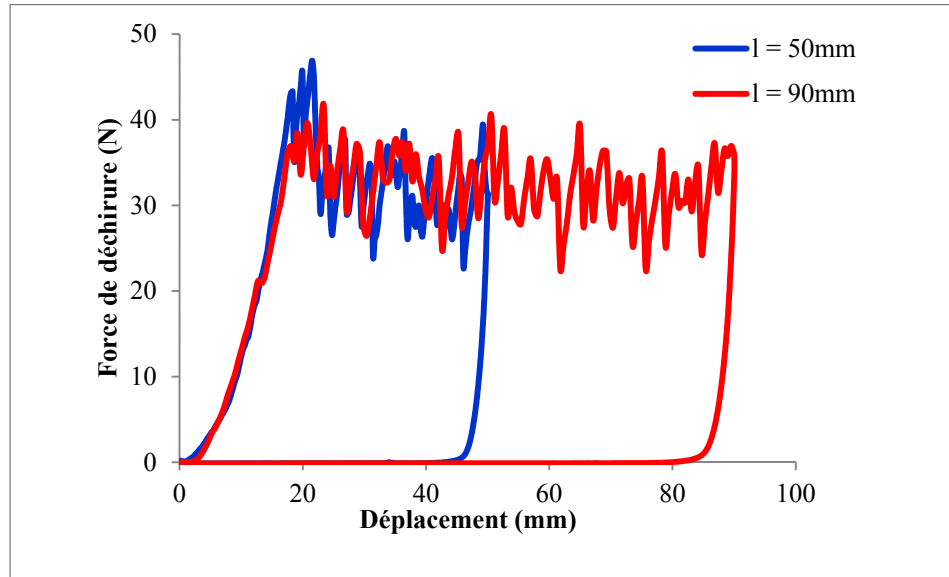


Figure 4.20 Courbe de force de déchirure - déplacement obtenue à partir des essais de déchirure pantalon

4.5.2 Critère de rupture des textiles enduits

Le nouveau critère de calcul de l'énergie de rupture (Équation 4.5), développé et utilisé avec succès par Triki et *al.* (2011) sur des structures textiles, sera vérifié, ici, dans l'étude de la résistance de déchirure des textiles enduits.

$$G_{C_{TE}} = - \left(\frac{\Delta W_{TE}}{\Delta A_{TE}} \right)_l \quad (4.5)$$

Les variations du travail ΔW_{TE} et de la surface ΔA_{TE} ont été calculés par les expressions suivantes :

$$-\Delta W_{TE} = W_{TE_1} - W_{TE_2} \quad (4.6)$$

$$\Delta A_{TE} = A_{TE_1} - A_{TE_2} \quad (4.7)$$

La vérification de ce critère a été faite par la configuration pantalon sur des tissus et des tricots laminés d'une couche de polyacétate de vinyle. En effet, des tests de déchirure charge et décharge à différents déplacements l_i ont été réalisés afin d'obtenir la variation du travail de déchirure ΔW_{TE} et de la surface de rupture ΔA_{TE} .

Comme il a été précisé dans la section 4.3.3, le calcul de l'énergie de rupture de l'enduit (élastomère) utilise le travail total appliqué. Ainsi, contrairement au calcul de l'énergie de rupture des textiles, le travail de déchirure des textiles enduits W_{TE} a été calculé à partir de l'intégration de l'aire totale qui se trouve sous la courbe de déchirure force-déplacement :

$$W_{TE} = \int_0^l F_{déch} dl \quad (4.8)$$

La surface de rupture est obtenue par la mesure de l'épaisseur e_{TE} et de la longueur de la propagation c_{TE} directement sur l'échantillon dans son état non déformé :

$$A_{TE} = c_{TE} \times e_{TE} \quad (4.9)$$

Ce critère de rupture a été validé à partir des trois différents textiles enduits choisis (Tableau 4.3). La Figure 4.21 présente les résultats obtenus. La linéarité entre le travail de déchirure et la surface de rupture est très significative. Cette linéarité nous permet de considérer $G_{c_{TE}}$ comme un critère de rupture pour les textiles enduits.

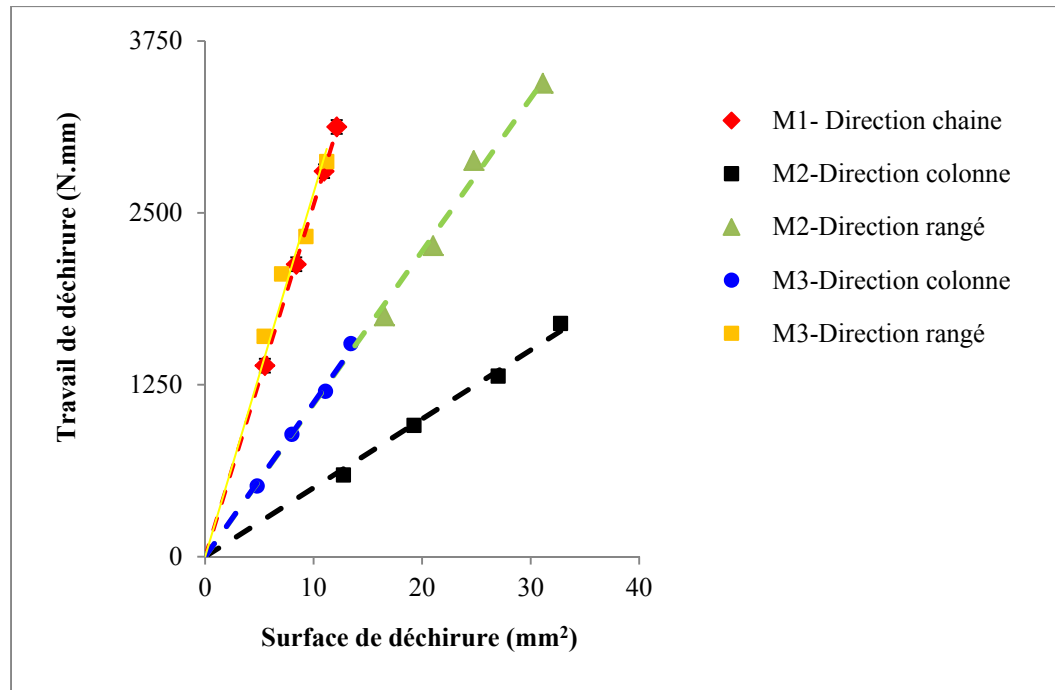


Figure 4.21 Variation du travail de déchirure en fonction de la surface de déchirure pour différents textiles enduits

Par ce critère de calcul de l'énergie de rupture des textiles enduits (Équation 4.5), une étude de l'effet de l'enduit sur le comportement en déchirure sera réalisée. Tout d'abord, une première démarche, pour montrer l'influence de l'enduit sur la déchirure, consiste à déterminer les forces de déchirure des textiles enduits et de leurs supports textiles. Une seconde étape consistera, dans la partie 4.5.4.2, à utiliser l'énergie de rupture pour évaluer la contribution de l'enduit à la résistance à la déchirure des textiles enduits. Cette démarche offre la possibilité de mettre en évidence la différence entre l'utilisation de l'énergie et celle de la force dans la caractérisation de la résistance à la déchirure des textiles enduits.

4.5.3 Effet de l'enduit sur le comportement en déchirure des textiles enduits

4.5.3.1 Force de déchirure

L'étude de la déchirure des textiles enduits est réalisée sur des tissus enduits et des tricotés enduits. Dans cette section, l'allure de l'évolution de la force de déchirure est déterminée pour les deux matériaux. Une différence entre la variation de la force de déchirure des tissus enduits et celle des tricotés enduits est observée. Cette variation peut être attribuée aux comportements en déchirure du support textile. En effet, les tricotés se caractérisent par une grande déformation des fils au moment de la déchirure, alors que les tissus montrent une très faible déformation des fils.

Tissus

Les courbes de la Figure 4.22 illustrent un exemple de l'allure de la force de déchirure des tissus et des tissus enduits, enregistrées pendant des essais de déchirure pantalon qui sont réalisés selon la direction des fils de chaîne (rupture des fils de trame). L'évolution de ces deux courbes semble relativement similaire. Cette variation de la force laisse supposer que la propagation de la fissure dans les tissus enduits est fortement contrôlée par le comportement en déchirure du support textile. En effet, les valeurs de la force de déchirure obtenues pour les deux matériaux sont comparables. Toutefois, ces courbes ne montrent aucune influence de l'enduit sur la déchirure des textiles enduits. Ce résultat remet en question l'utilisation de la force comme un critère de rupture pour les textiles enduits.

Par ailleurs, l'examen de ces courbes révèle que l'enduit influe sur la fluctuation de la force de déchirure. En effet, l'écart entre la valeur minimale et maximale de la force mesurée au cours de la déchirure des tissus est plus important que celui observé chez la force de déchirure des tissus enduits. Néanmoins, la valeur maximale de la force de déchirure pour les deux matériaux est quasi-similaire. Par contre, la valeur minimale observée pour les tissus est inférieure à celle des tissus enduits. Ce résultat peut éventuellement être expliqué par la réduction de la mobilité des fils par l'ajout d'une couche d'élastomère. Étant donné (chapitre 3) que les valeurs minimales de la force de déchirure des tissus sont produites par les mécanismes qui précèdent l'amorçage de la fissure (le glissement, la déformation des fils dans

la structure). Ces valeurs augmentent au cours de la déchirure des textiles enduits. Il apparaît alors que l'ajout d'une couche d'enduit réduit l'impact de ces divers mécanismes de déchirure. L'effet de l'enduit peut être alors pris en compte au moyen du calcul de l'énergie de rupture, qui tient compte des valeurs maximale et minimale de la force.

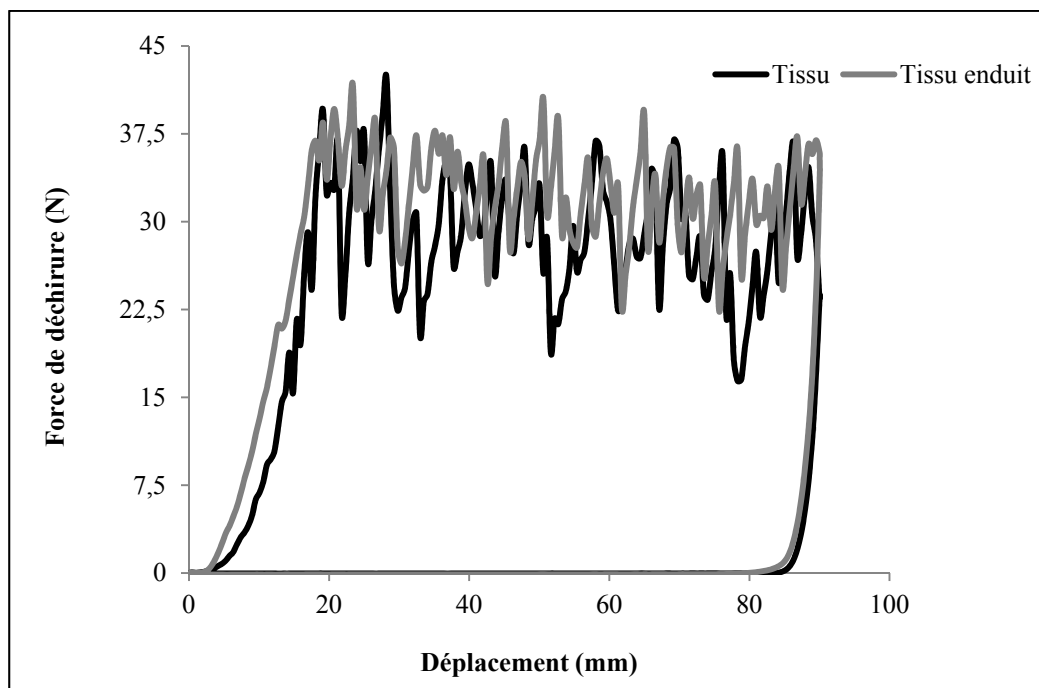


Figure 4.22 Exemple d'allures de la force de déchirure des tissus et des tissus enduits, issues d'un essai de déchirure pantalon

Tricots

Concernant les tricots enduits, l'allure de la force de déchirure selon la direction colonne est illustrée par la Figure 4.23. Il apparaît que la valeur de la force engendrant la déchirure est comparable pour les tricots et les tricots enduits. Ce résultat montre l'effet significatif de ce support textile sur la résistance à la déchirure des tricots enduits. Cependant, les comportements initiaux de ces deux matériaux sont différents. En effet, le tricot laminé par une couche de polyacétate de vinyle se trouve plus rapidement au premier point de déchirure que le tricot non enduit. Cette observation peut s'expliquer par la réduction de la *déformabilité* du matériau à cause de l'ajout d'une couche d'élastomère. Il est intéressant de

noter que la couche de l'enduit ne modifie pas la valeur de la force de déchirure, néanmoins elle engendre une réduction de la déformation et du glissement des fils dans la structure.

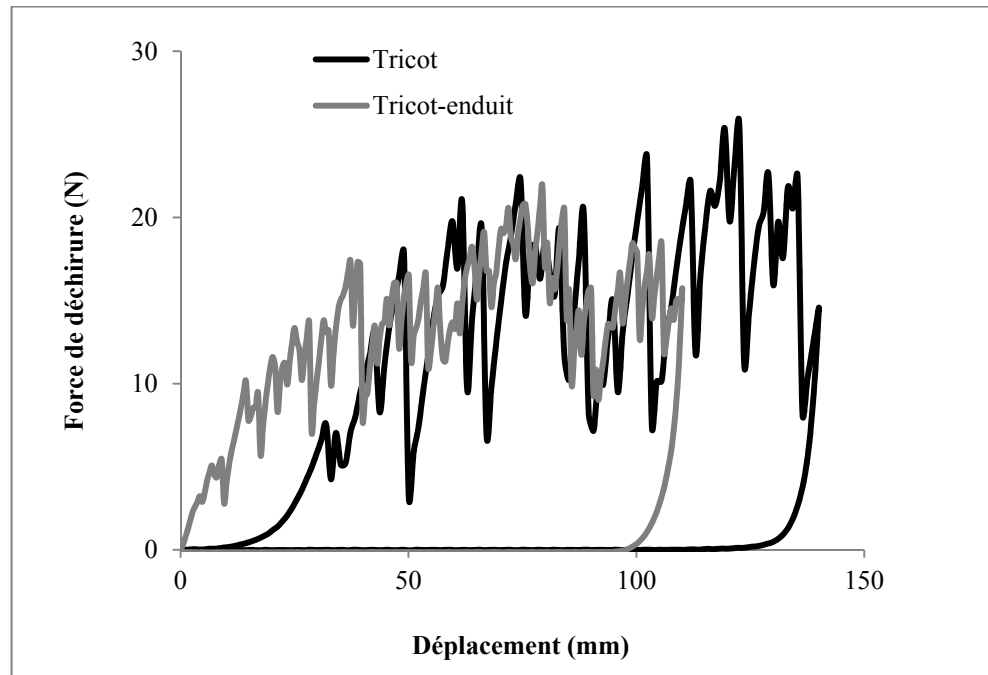


Figure 4.23 Exemple d'allures de la force de déchirure des tricots et des tricots enduits déchirés selon la direction colonne

Nous pouvons constater l'effet de l'enduit sur la variation de la force de déchirure des tricots enduits, obtenue selon la direction rangée (Figure 4.24). Dans ce cas, les fils du renfort textile ont un effet marquant sur la déformation de la structure avant l'initiation de la propagation de la fissure. En effet, une importante extension des languettes d'attaches a été observée au moment de la déchirure des tricots. Au contraire, la déchirure des tricots enduits montre une faible déformation de ses languettes. Ces matériaux atteignent rapidement le point d'initiation de déchirure. Ainsi, la force de déchirure devient supérieure à celle obtenue pour les tricots.

Nous remarquons que les fils de charge qui sont orientés suivant la direction rangée ont un effet significatif sur la déchirure de la structure. La grande différence entre la variation de la force de déchirure obtenue selon la direction colonne et celle obtenue selon la direction rangée peut probablement être attribuée à ces fils. En effet, selon la direction rangée, les fils

de charge se manifestent par l'augmentation de l'extension des languettes d'attaches et en contrepartie par une croissance de la déformation de la zone *Del* selon la direction colonne. Ainsi, la taille de la zone *Del* change d'une direction de déchirure à une autre.

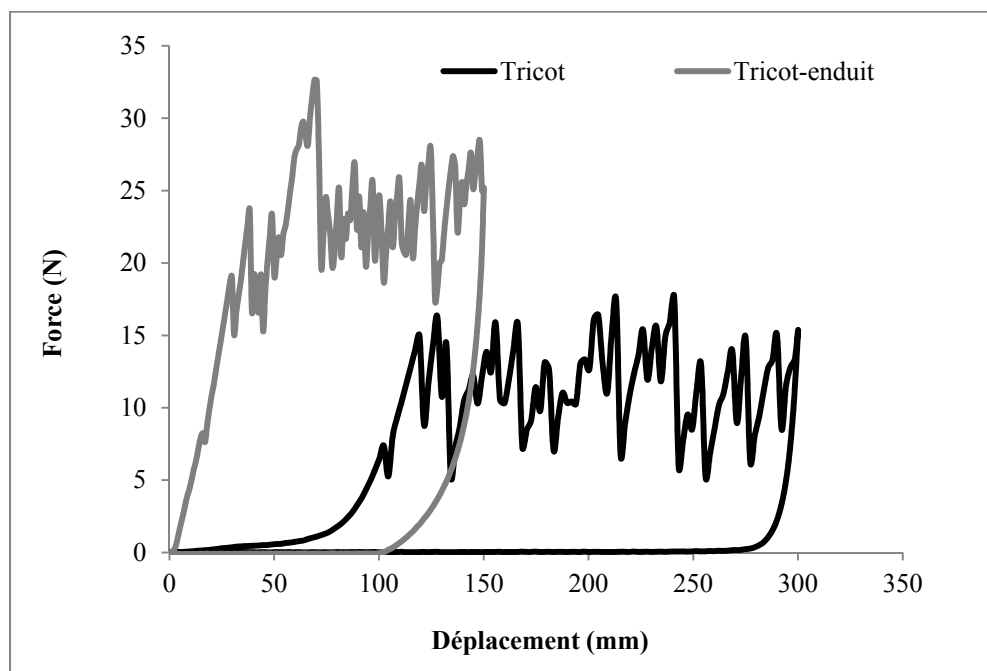


Figure 4.24 Exemple d'allures de la force de déchirure des tricots et des tricots enduits déchirés selon la direction rangée

À noter que cette étude de l'influence de l'enduit sur le comportement en déchirure des textiles enduits montre les limites de l'utilisation de la force pour caractériser leur résistance à la déchirure. À l'exception de la déchirure selon la direction rangée, aucune influence de l'enduit sur la force de déchirure n'a été observée. Nous proposons alors, dans ce qui suit, le calcul de l'énergie pour étudier le comportement en déchirure des textiles enduits.

4.5.3.2 Énergie de rupture

Afin de montrer l'importance du calcul de l'énergie de rupture des textiles enduits, une comparaison a été faite entre la valeur de la force et celle de l'énergie de rupture. En effet, cette étude s'intéresse principalement au calcul de ces deux propriétés pour le support textile,

l'enduit et le textile enduit afin de mettre en évidence l'impact de l'enduit sur le comportement en déchirure. Les figures suivantes représentent les résultats obtenus.

La Figure 4.25 présente le comportement en déchirure du tissu enduit M1 (Tableau 4.3). La moyenne de la valeur maximale de la force de déchirure obtenue pour les tissus et les tissus enduits semble proche. Ce résultat montre que l'enduit n'a aucun effet sur le comportement en déchirure des tissus enduits. En effet, l'utilisation de la force de déchirure pour évaluer la résistance à la déchirure des textiles enduits a été remise en question. Cependant, le calcul qui a été effectué concernant l'énergie de rupture montre que les tissus enduits sont moins résistants à la déchirure que leur support textile. Dans ce cas, la réduction de l'énergie peut être associée à l'effet de l'enduit. En effet, l'enduction des tissus par une couche de polyacétate de vinyle fait réduire le glissement de leurs fils constitutants. Par conséquent, la résistance à la déchirure de la structure diminue. Ce résultat est conforme à celui qui a été présenté au préalable (chapitre 3) et qui montre que la diminution de la mobilité des fils dans la structure textile engendre une réduction de son énergie de rupture.

Cette réduction de l'énergie pourrait être aussi attribuée, en partie, à l'augmentation de l'épaisseur de la structure par l'ajout d'une couche d'enduit au support textile. Par conséquent, pour une même valeur de travail de déchirure appliqué à l'échantillon (Figure 4.22), la nouvelle surface de rupture créée dans le tissu enduit est supérieure à celle qui est créée dans le tissu. Or, cette surface est reliée directement à l'énergie de rupture. Ainsi, l'impact de l'enduit sur le comportement en déchirure est négatif. Cette étude permet donc d'affirmer que la force de déchirure ne peut être utilisée pour évaluer la résistance à la déchirure des textiles enduits.

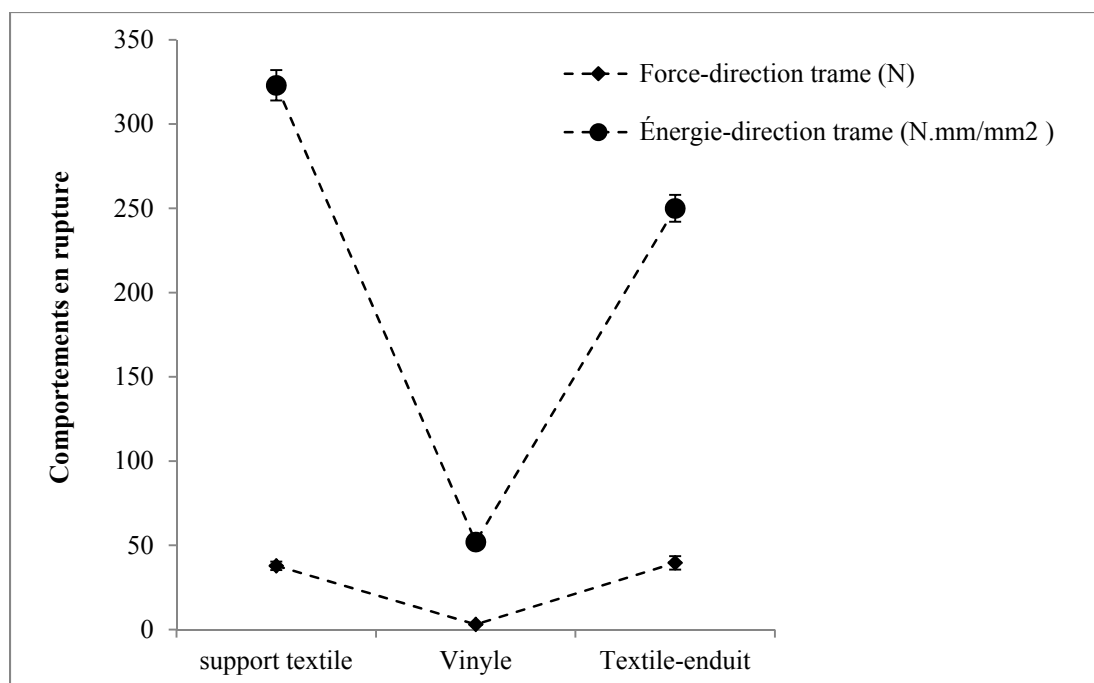


Figure 4.25 Valeurs de la force et de l'énergie de rupture du textile enduit, du support textile et de l'enduit obtenues dans le cas du matériau M1

Les résultats de déchirure des matériaux M2 et M3 (Tableau 4.3) ont montré les mêmes tendances que celles qui ont été obtenues dans le cas du matériau M1 (Figure 4.26 et 4.27). Ces figures montrent un effet négatif de l'enduit sur l'énergie de rupture. En effet, pour les deux directions de déchirure, l'énergie obtenue pour le tricot est supérieure à celle qui correspond au tricot enduit. Ce résultat peut être aussi associé à l'ajout de la couche d'enduit au support textile. Cela peut engendrer, d'une part, une diminution de la mobilité des fils dans la structure et d'autre part, une augmentation de l'épaisseur du matériau. Cette réduction du glissement des fils se traduit par l'augmentation de la longueur (ou de la surface) de déchirure (Scelzo et al. 1994a). De même, cette augmentation de l'épaisseur engendre un accroissement de la surface de rupture.

Il est à noter que, dans certains cas, le travail de déchirure des textiles et celui des textiles enduits sont de même valeur. L'écart entre la surface de rupture de deux matériaux semble le principal paramètre qui engendre la diminution de l'énergie de rupture des textiles enduits.

Nous pouvons alors constater que la couche de polyacétate de vinyle a un effet négatif sur la résistance à la déchirure des textiles enduits.

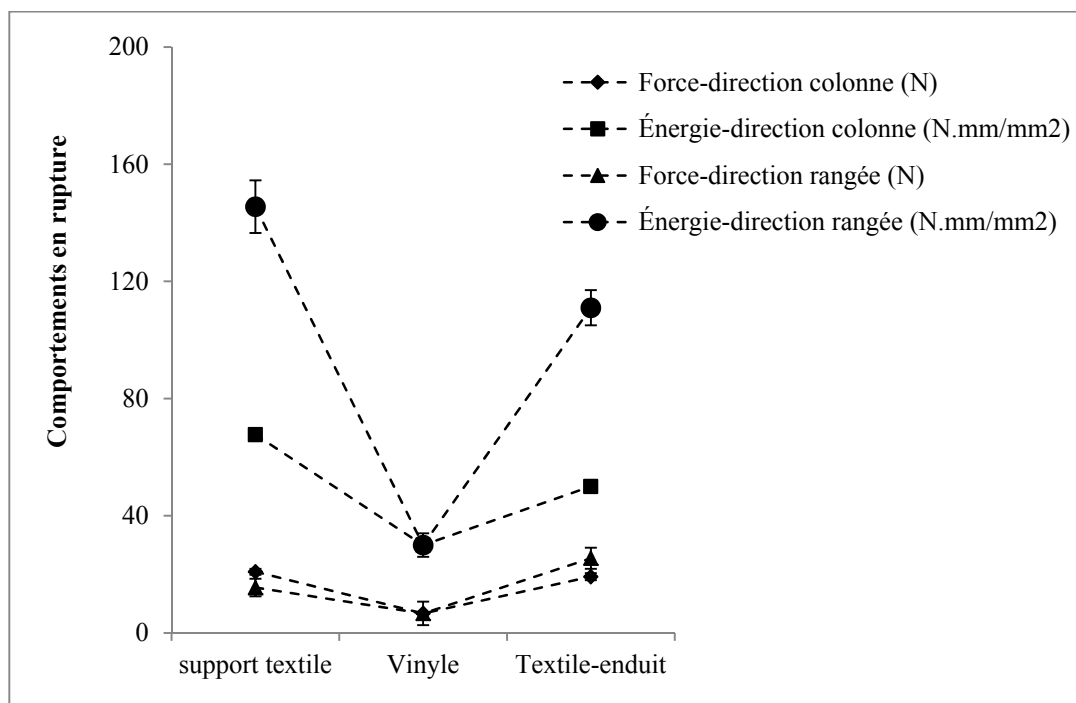


Figure 4.26 Valeurs de la force et de l'énergie de rupture du textile enduit, du support textile et de l'enduit obtenues dans le cas du matériau M2

En ce qui concerne la force de déchirure (moyenne des valeurs maximales), l'examen des Figures 4.26 et 4.27 montre que, selon la valeur de la force obtenue, la couche de l'enduit ne montre aucun effet significatif. En effet, les forces de déchirure des textiles enduits et de leur support textile sont les mêmes. Selon les valeurs obtenues, nous constatons que la couche de l'enduit ne modifie pas le comportement en déchirure des textiles enduits. Ce résultat nous permet aussi d'affirmer que la force de déchirure ne peut être utilisée pour étudier la déchirure des textiles enduits. Cependant, la déchirure selon la direction rangée a montré que la force de déchirure est différente entre le textile enduit et son support textile (Figure 4.26).

L'effet de la direction de déchirure sur la résistance à la déchirure apparaît plus significatif d'après le calcul de l'énergie (Figure 4.26). L'énergie de rupture selon la direction rangée est supérieure à celle qui correspond à la direction colonne. Cela peut s'expliquer par l'effet des

fils de charge qui offrent à la zone *Del* une grande déformation locale. Cette influence de la direction de déchirure sera précisée dans ce qui suit.

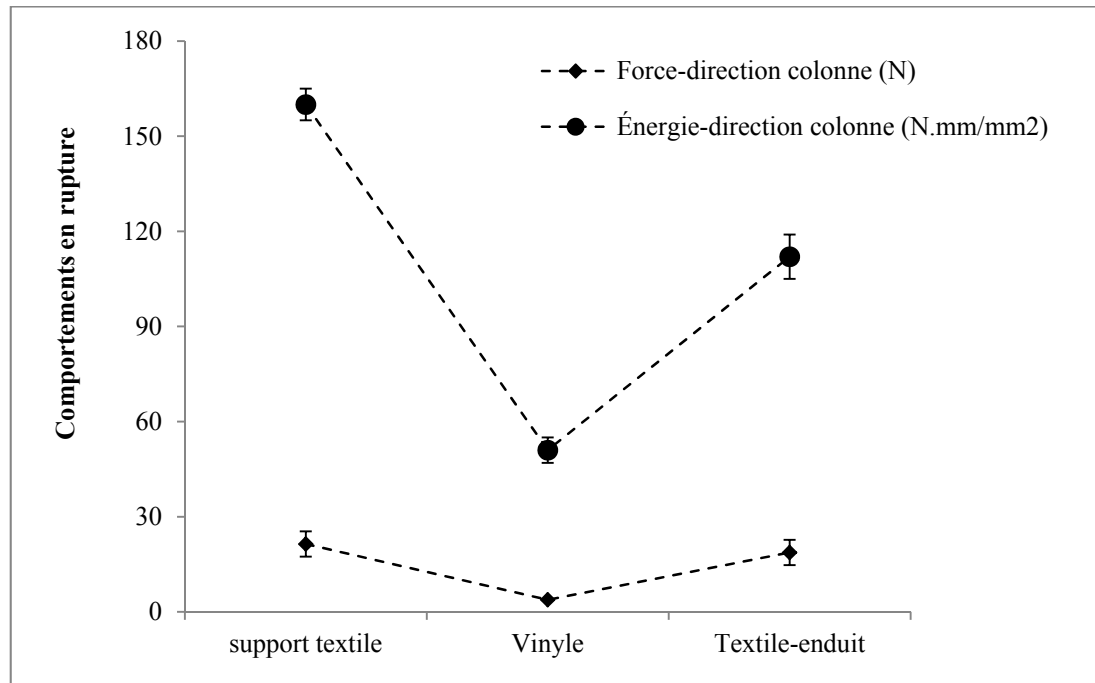


Figure 4.27 Valeurs de la force et de l'énergie de rupture du textile enduit, du support textile et de l'enduit obtenues dans le cas du matériau M3

4.5.3.3 Effet de l'angle sur l'énergie de rupture des textiles

Les résultats obtenus à la suite des essais de déchirure des textiles enduits, menés sur des échantillons coupés en différentes orientations (0, 30, 60 et 90°), montrent que la valeur de l'énergie de rupture varie d'une direction à une autre. L'angle zéro correspond à la direction des fils de trame pour les tissus enduits et à la direction des fils de colonne pour les tricotés enduits.

Les résultats illustrés à la Figure 4.28 montrent une variation de l'énergie de rupture des tissus enduits en fonction de la direction de la propagation de la fissure. Le passage de 0° (rupture des fils de chaîne) à 90° (rupture des fils de trame) engendre une importante réduction de la valeur de l'énergie de rupture. D'après ce graphique, deux différentes zones caractéristiques du phénomène de déchirure peuvent être distinguées. La première zone montre une

importante valeur de l'énergie de rupture (de l'ordre de 800 N.mm/mm²). Dans ce cas, nous observons la déchirure des fils de chaîne. Cette augmentation d'énergie est probablement due au nombre de fils par motif qui se trouvent en double fils. Par ailleurs, dans la deuxième zone, la valeur de l'énergie de rupture est beaucoup plus faible (de l'ordre de 250 N.mm/mm²). Ici, pour les trois directions de déchirure 30°, 60° et 90°, seule la déchirure des fils de trame a été observée. En revanche, les valeurs de l'énergie de rupture obtenues sont légèrement différentes l'une de l'autre. Cela peut être associé à l'influence des mécanismes de déchirure qui varient d'une orientation à une autre. Il semble que l'interaction des fils entre eux, notamment le glissement, change d'une direction de déchirure à une autre.

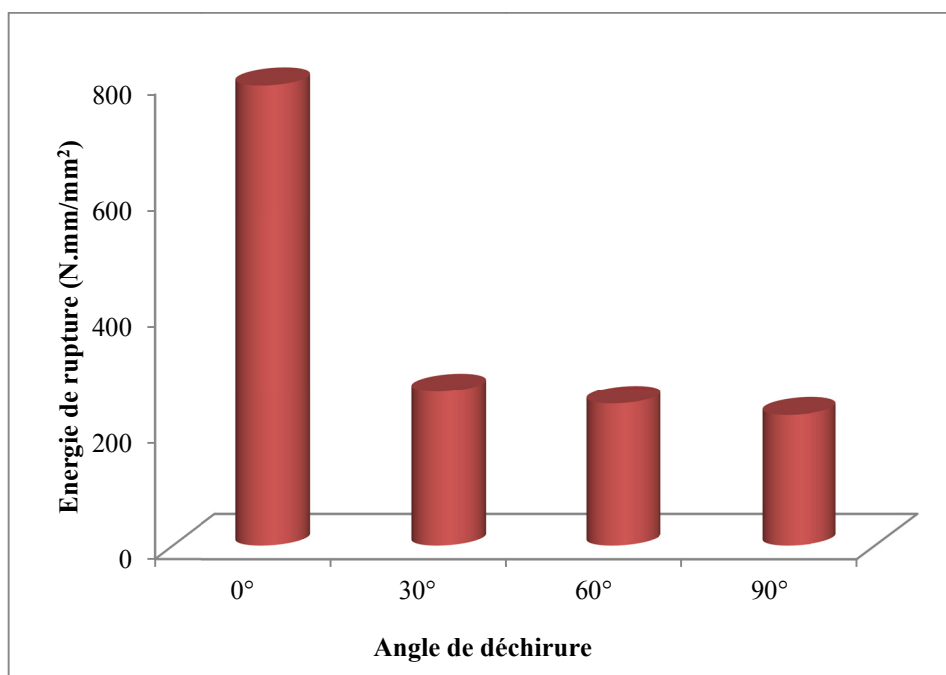


Figure 4.28 Effet de l'angle de déchirure sur la valeur de l'énergie de rupture des tissus enduits (M1)

En ce qui concerne l'effet de l'angle de déchirure sur l'énergie de rupture des tricots enduits, il semble que l'énergie de rupture a la même tendance que celle qui correspond aux tissus enduits. En effet, les graphes illustrés aux Figures 4.29 et 4.30 montrent que le changement de la direction de déchirure de 0° (colonne) à 90° (rangée) fait doubler la valeur de l'énergie de rupture. De même, ce résultat peut être attribué aux mécanismes de déchirure qui changent

d'une direction de déchirure à une autre. De plus, il est à noter que les fils de charge qui s'orientent selon la direction rangée contribuent énormément au comportement en déchirure des tricots enduits. De toute évidence, ces fils augmentent la déformation de la structure textile, en particulier la déformation de la zone *Del*, au moment de la déchirure selon la direction colonne.

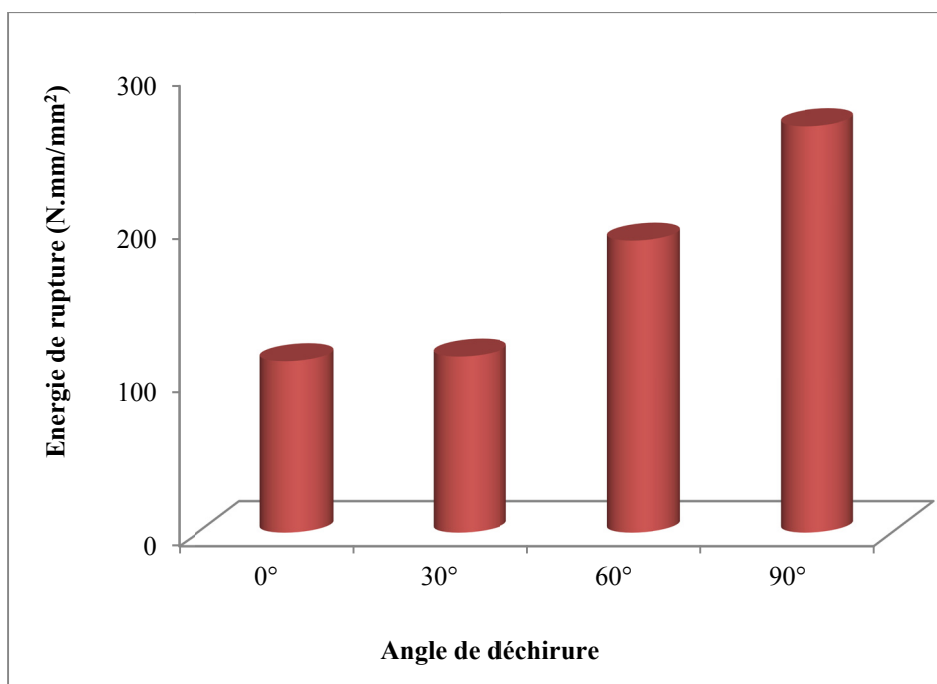


Figure 4.29 Effet de l'angle de déchirure sur la valeur de l'énergie de rupture des tricots enduits (M2)

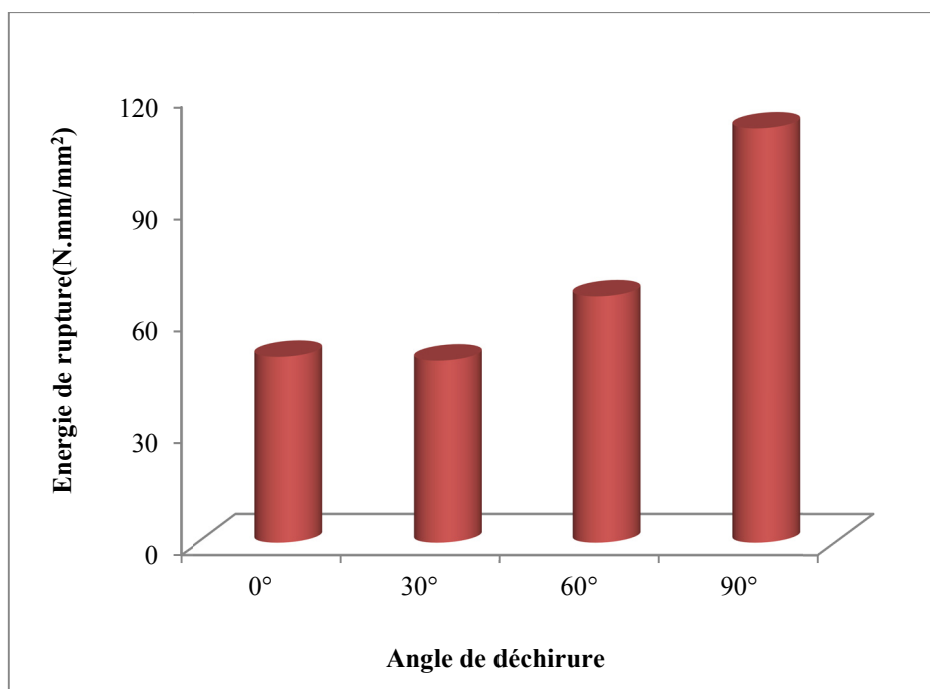


Figure 4.30 Effet de l'angle de déchirure sur la valeur de l'énergie de rupture des tricots enduits (M3)

4.6 Conclusion

Ce chapitre portant sur la déchirure des textiles enduits complète l'étude de la déchirure des vêtements de protection. Dans la première partie, cette étude a servi à déterminer les divers mécanismes de la propagation de la fissure dans les textiles enduits. Ainsi, un critère pour calculer l'énergie de rupture a été défini. L'étude des comportements en déchirure des textiles enduits a montré que la résistance à la rupture de leur support textile est celle qui est la plus responsable de leur rupture. En effet, l'énergie de rupture des couches d'enduits est très faible. La contribution de cette couche à la déchirure des textiles enduits peut être révélée par l'adhésion du textile avec l'enduit.

CHAPITRE 5

COMPORTEMENT EN DÉCHIRURE DES TEXTILES ENDUITS APRÈS VIEILLISSEMENT THERMO-OXYDATION

5.1 Introduction

Dans les chapitres précédents, l'énergie rupture du matériau textile (propriété mécanique intrinsèque) a été présentée. Cette propriété détermine d'une manière plus précise la résistance à l'amorçage de déchirure dans les matériaux textiles. L'objectif principal de ce chapitre est d'évaluer si une diminution de l'énergie de rupture des textiles enduits se produit lorsque ceux-ci sont utilisés à de hautes températures. Pour ce faire, des tests de vieillissement thermique ont été menés dans des conditions sévères afin de prédire l'évolution de l'énergie de rupture à long terme. Lors du vieillissement des polymères, le comportement d'une propriété est souvent décrit en fonction de la température selon une loi de type Arrhenius (Tung and Vu-khanh 2007) :

$$\frac{dx}{dt} = A \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) f(x) \quad (5.1)$$

Où x est la variation de la propriété, t est le temps de vieillissement, E_a est l'énergie d'activation, R est la constante de gaz, T est la température appliquée et $f(x)$ sont les fonctions caractéristiques.

En utilisant cette méthode, cette étude sera réalisée par la détermination de l'évolution de l'énergie de rupture, en fonction de la température, des matériaux suivants : textiles enduits, support textile et couche de l'enduit. De même, la variation de la force de délaminage du textile et de l'enduit selon la variation de la température sera déterminée. Ensuite, la loi de type Arrhenius sera utilisée afin de pouvoir prédire les comportements en déchirure du matériau. Enfin, cette étude sera couplée avec une analyse des propriétés chimiques et physiques du matériau pour en préciser les mécanismes de dégradation.

5.2 Justification de l'importance de l'étude

Durant les dernières années, un effort marquant, en particulier dans notre laboratoire de recherche (CSST), a été consacré à l'étude de l'effet de vieillissement sur la résistance mécanique des vêtements de protection, notamment les vêtements de pompiers et les gants de protection. Des méthodes normalisées ont été établies pour mesurer les propriétés mécaniques ainsi que physico-chimiques de ces matériaux. Les chercheurs ont réalisé des tests de vieillissement accéléré dans différentes conditions (thermique, humidité et UV) afin de déterminer l'évolution des propriétés en traction (résistance et élongation à la rupture) et en déchirure pour des tissus et des tissus enduits (force de déchirure) (Arrieta et al. 2011; El Aidani et al. 2011). Ces auteurs ont montré que le vieillissement a un effet significatif sur ces différentes propriétés.

Cependant, ces travaux n'ont pas étudié l'effet du vieillissement sur la variation de l'énergie de rupture de ces matériaux (l'énergie nécessaire pour faire propager une fissure dans une structure textile). Le calcul de ce paramètre semble indispensable dans le cas de vêtements de protection. De fait, le calcul de cette variable permet de déterminer l'amorçage de la fissure dans le matériau. Il est important de mentionner que ce paramètre prend en compte la propagation de la fissure.

5.3 Matériaux et méthodologie

Afin de vérifier l'effet du vieillissement sur les propriétés mécaniques et physico-chimiques des vêtements de protection, des textiles enduits formés par un tissu en polyester laminé par une couche de polyacétate de vinyle ont été utilisés. Dans la plupart des cas, ces vêtements sont utilisés dans des domaines où l'utilisateur est soumis à des conditions de chaleur intense. Pour simuler ces conditions sévères d'utilisation, des échantillons en tissus enduits sont exposés à de hautes températures, dans un four électrique, pendant différentes durées afin de déterminer l'énergie de rupture pour chaque condition. L'intervalle de température appliquée est déterminé selon les conditions d'utilisation de ces matériaux. Il varie de 70°C à 170°C (70, 100, 130, 150 et 170°C).

5.4 Influence du vieillissement sur l'énergie critique de déchirure

Le vieillissement thermique des tissus en polyester, des élastomères en polyacétate de vinyle et des tissus enduits en polyester-polyacétate de vinyle s'exprime par une réduction de leur énergie de rupture. En effet, une réduction de plus de 50% de la rétention de l'énergie de rupture des matériaux a été constatée.

5.4.1 Tissus

La Figure 4.31 illustre l'évolution de la rétention de l'énergie de rupture des tissus, qui est égale le rapport entre l'énergie de rupture du matériau vieilli et celle du matériau neuf ($\frac{G_{c_{vieilli}}}{G_{c_{initial}}}$), en fonction du temps de vieillissement à différentes températures. D'après ces résultats, il est évident qu'il y a une diminution de l'énergie de rupture des tissus sous l'effet de ces conditions. Cette évolution est similaire pour toutes les températures de vieillissement. Cette tendance s'explique possiblement par le fait que le mécanisme de dégradation qui cause la réduction de l'énergie de rupture est le même pour toutes les conditions choisies. La vitesse de dégradation, toutefois, dépend de la température de vieillissement. À titre d'exemple, une exposition de longue durée à une température de 70°C entraîne une réduction de l'énergie de rupture de 30%; tandis que, pour une exposition plus courte, une importante réduction d'environ 50% de l'énergie est observée à 170°C.

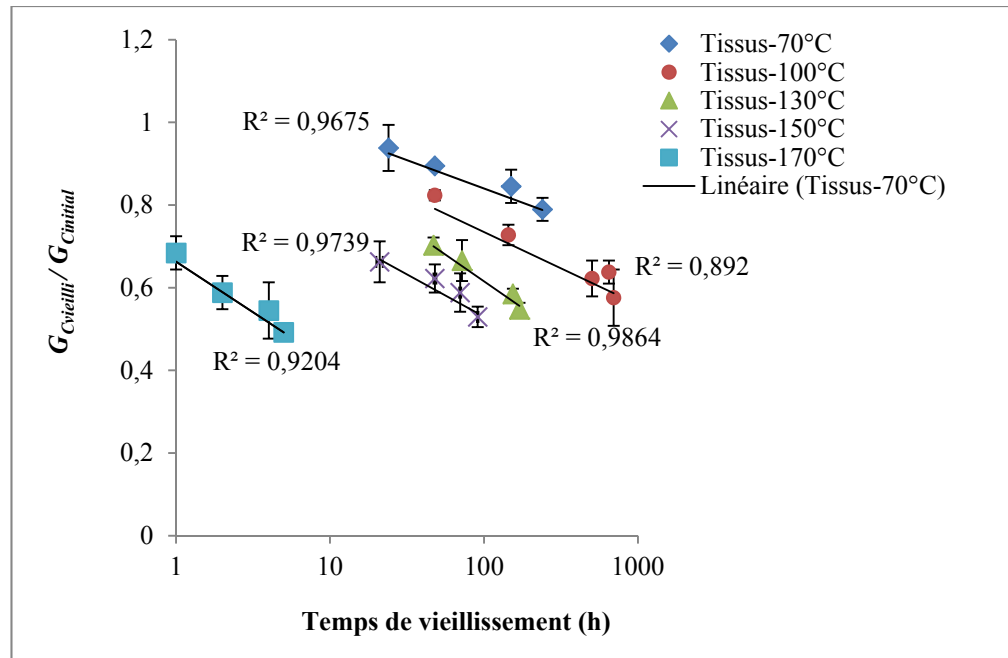


Figure 5.1 Effet du vieillissement sur la rétention de l'énergie de rupture des tissus

5.4.2 Tissus enduits

De la même manière, nous avons suivi l'évolution de l'énergie de rupture des tissus enduits à différentes températures de vieillissement (Figure 5.2). Ces essais montrent que la réduction de l'énergie G_{CTE} peut atteindre 80% de la valeur initiale. Ici, la vitesse de dégradation des tissus enduits est largement supérieure à celle qui a été observée pour les tissus. Ceci peut être attribué à l'ajout de la couche de l'enduit. De même, comme nous l'avons observé dans le cas de vieillissement des tissus, toutes les courbes de la variation de l'énergie ont une allure semblable, ce qui suggère que le processus de dégradation est similaire pour toutes les températures. Toutefois, la vitesse de ce processus varie d'une température à une autre. Le vieillissement à 70°C montre une faible réduction (environ de 15%) de l'énergie de rupture. Par ailleurs, une importante diminution de l'énergie de rupture de l'ordre de 80% a été observée à 150°C. Soulignons que la rétention de l'énergie de rupture des tissus enduits est plus importante que celle des tissus. Il vaut la peine de remarquer que l'enduit qui a été ajouté au support textile a un effet significatif sur la dégradation des tissus enduits.

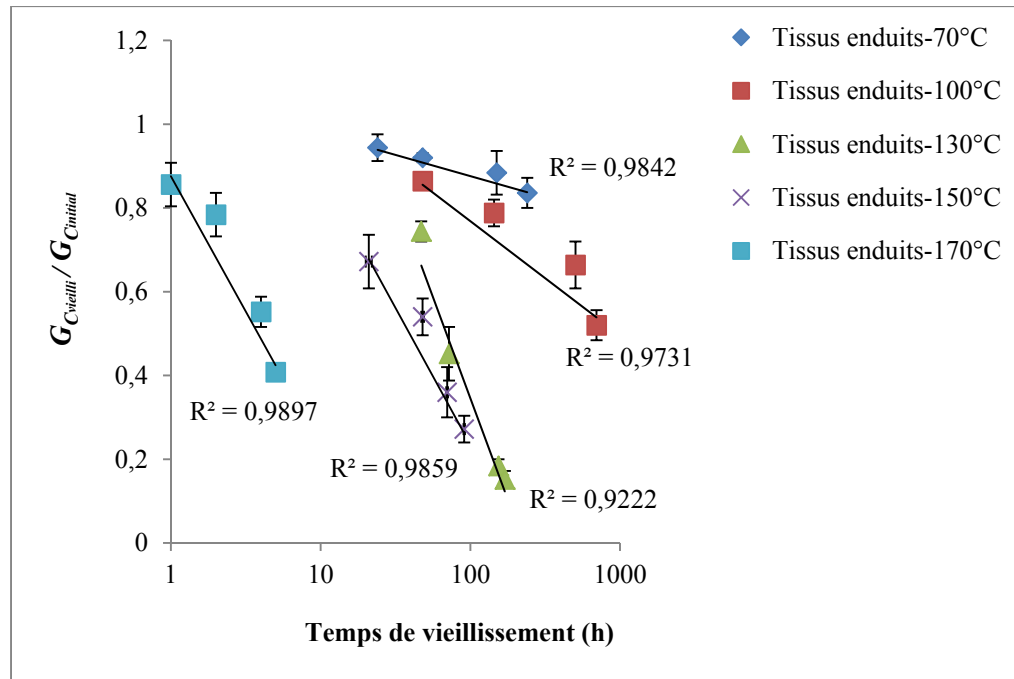


Figure 5.2 Effet du vieillissement sur la rétention de l'énergie de rupture des tissus enduits

5.4.3 Couches d'enduits

La Figure 5.3 illustre la variation de la rétention de l'énergie de rupture des plaques de polyacétate de vinyle en fonction du temps de vieillissement, à différentes températures. L'évolution de la rétention de l'énergie varie d'une température à une autre. De fait, le processus de dégradation du matériau est différent à certaines températures. Le vieillissement à faibles températures (inférieures à 100°C) montre une instabilité de la variation de l'énergie de rupture en fonction du temps de vieillissement. Pourtant, lorsque le matériau est exposé à des températures plus importantes (130, 150 et 170°C), la variation de son énergie de rupture montre la même tendance. De fait, l'énergie critique de déchirure pour chaque température est diminuée en fonction du temps de vieillissement. Cela peut être attribué au processus de dégradation thermique qui semble similaire pour les trois températures.

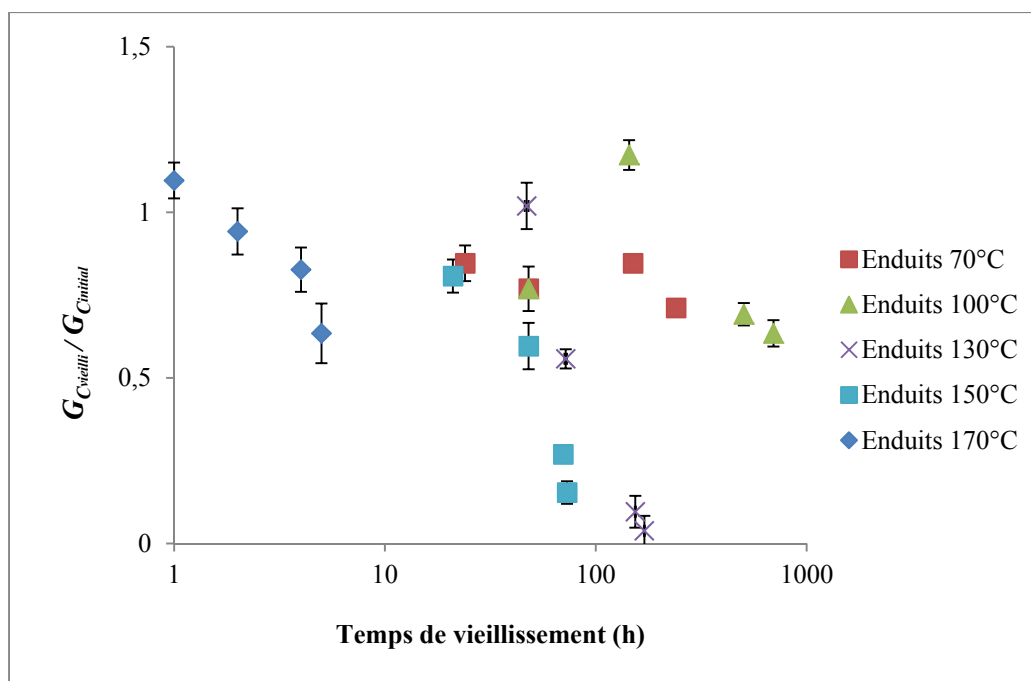


Figure 5.3 Effet du vieillissement sur la rétention de l'énergie de rupture des enduits

5.5 Prédiction de la durée de vie

De nombreuses études ont été réalisées à l'aide de tests de vieillissement accéléré à hautes températures dans le but de prédire la durée de vie des tissus ou d'extrapoler leurs propriétés après un certain temps de service (Arrieta et al. 2011). Ces essais de vieillissement permettent de déterminer l'évolution des propriétés du matériau ainsi que les paramètres cinétiques de la dégradation thermique, tels que l'énergie d'activation. Cette dernière peut être déterminée par l'étude de la variation des propriétés en fonction de la température selon la loi d'Arrhenius.

5.5.1 Tissus

En se servant du principe de superposition temps-température (Figure 5.4), nous pouvons donc tracer la courbe maitresse de la variation de la rétention de l'énergie de rupture en fonction du temps dans l'intervalle de température 70 à 170°C (Figure 5. 5). Le Tableau 5.1 regroupe toutes les valeurs du facteur de déplacement, a_T , obtenues à différentes températures dans le cas de la déchirure des tissus.

Tableau 5.1 Valeurs de décalage a_T obtenues à différentes températures de vieillissement des tissus

Température de vieillissement (°C)	a_T (h)
70	1
100	5
130	30
150	90
170	900

Cette linéarité entre l'évolution du logarithme népérien du décalage, $\ln(a_T)$, en fonction de $1/T$, l'inverse de la température de vieillissement, permet d'utiliser la loi d'Arrhenius.

On peut donc écrire :

$$a_T = a_{T_0} \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (5.2)$$

À partir du tracé de $\ln(a_T)$ en fonction de $1/T$ (Voir équation 5.3), on peut calculer l'énergie d'activation E_a du processus de rétention d'énergie de rupture selon l'expression suivante :

$$\ln(a_T) = -\frac{E_a}{RT} + \ln(a_{T_0}) \quad (5.3)$$

Cette approche a donné une énergie d'activation E_a d'une valeur de 81 kJ/mole.

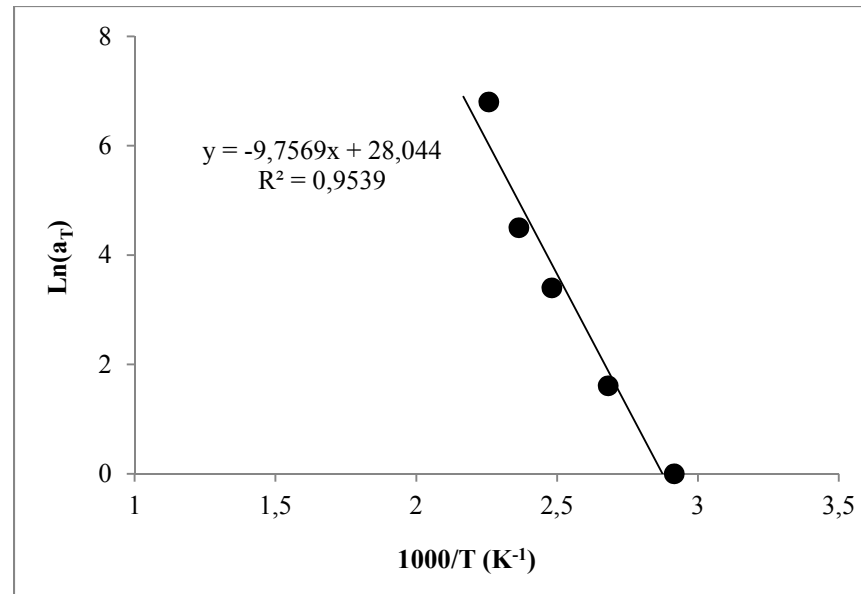


Figure 5.4 Évolution de $\text{Ln}(a_T)$ en fonction de $1/T$ obtenue pour les tissus

Le graphique d'Arrhenius, illustré dans la figure 5.4, peut être utilisé pour l'évolution de la rétention de l'énergie de rupture du matériau en fonction du temps. En effet, la Figure 5.5 illustre l'évolution de la rétention de l'énergie de rupture, $\frac{G_{c_{\text{vieilli}}}}{G_{c_{\text{initial}}}}$, en fonction du temps de vieillissement. Ce graphique est construit à partir des résultats présentés à la Figure 5.1. Toutes les courbes illustrées dans cette dernière figure sont quasiment linéaires. En prenant la courbe de 70°C comme courbe de référence, un décalage horizontal est effectué sur les autres courbes. Le graphique suivant nous permet de déterminer le temps de vieillissement nécessaire pour avoir une valeur d'énergie de rupture donnée. Cette prédiction s'avère excellente dans l'intervalle de 70 à 170°C. Cela laisse supposer que le mécanisme prépondérant de dégradation thermique reste le même dans cette gamme de température. Il paraît alors possible de réaliser des prédictions de l'énergie de rupture du matériau.

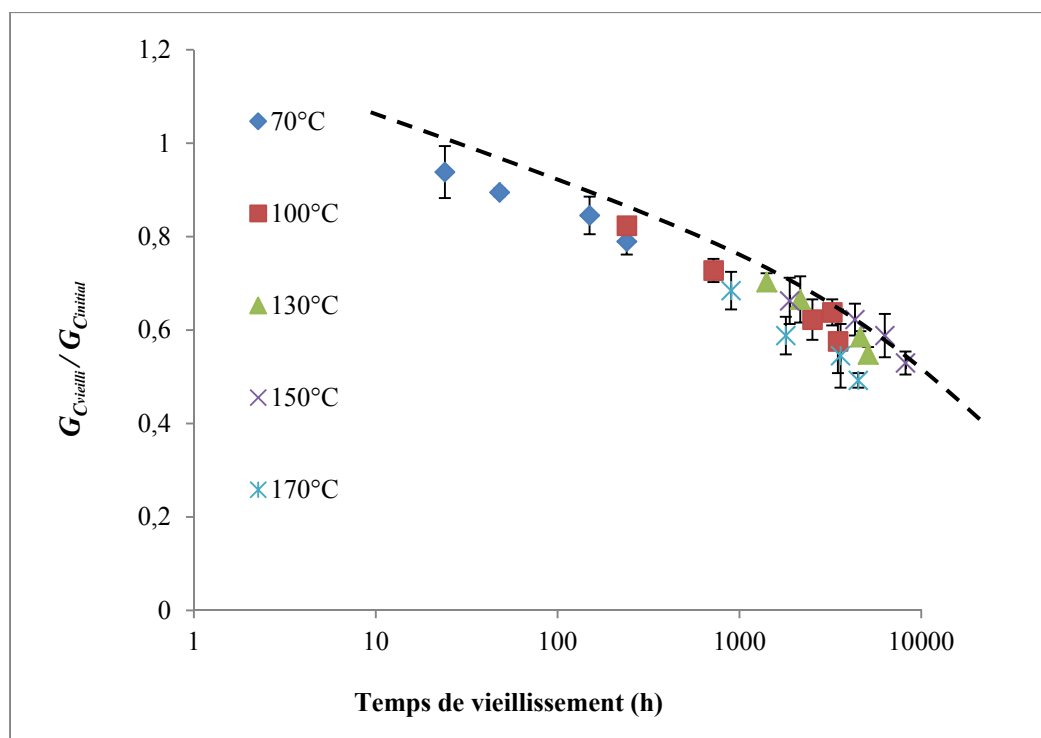


Figure 5.5 Évolution de la courbe maitresse TTS à différentes températures de vieillissement des tissus

5.5.2 Tissus enduits

En traçant l'évolution de $\ln(a_T)$ en fonction de l'inverse de la température $1/T$ dans le cas de la déchirure des textiles enduits (Tableau 5.2), nous remarquons que la variation de a_T en fonction de la température obéit la loi d'Arrhénius (Figure 5.6). Par cette méthode, nous déterminons l'énergie d'activation de dégradation des tissus enduits. Cette approche est couplée avec le principe de superposition temps-température afin de construire la courbe maîtresse de la rétention de l'énergie de rupture pour toutes les températures dans l'intervalle de 70 à 170°C.

Tableau 5.2 Valeurs de décalage a_T obtenues à différentes températures de vieillissement pour des tissus enduits

Température de vieillissement (°C)	a_T (h)
70	1
100	2
130	20
150	40
170	250

Nous constatons que le coefficient de corrélation offert par la régression linéaire du graphique d'Arrhenius est assez proche de l'unité, ce qui montre la bonne qualité de la régression (Figure 5.6). En utilisant l'équation 5.3, nous obtenons alors une énergie d'activation du processus de dégradation thermique E_a d'une valeur de 67 kJ/mole.

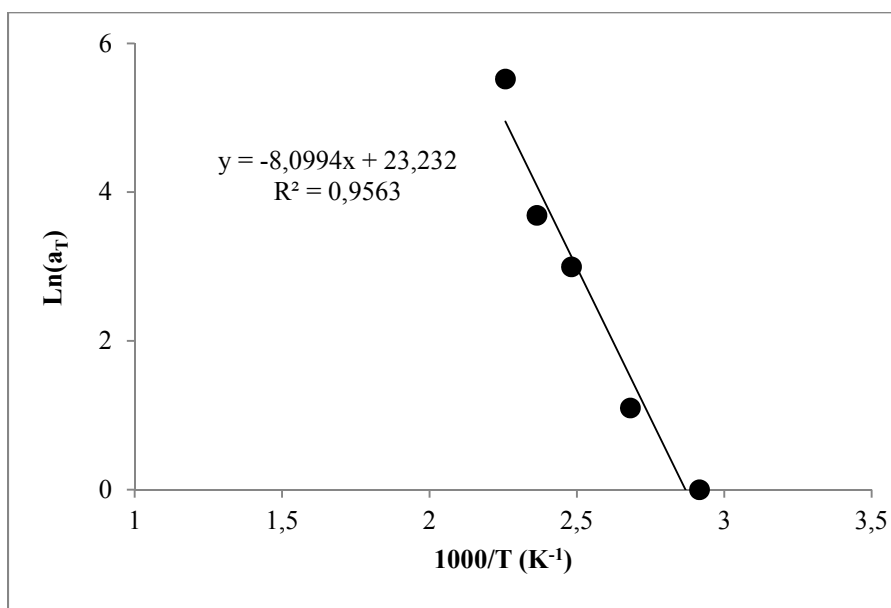


Figure 5.6 Évolution de $\ln(a_T)$ en fonction de $1/T$ obtenue pour les tissus enduits

Il est intéressant de noter que la différence entre la valeur de l'énergie d'activation obtenue pour les textiles enduits et celle qui a été déterminée pour les textiles est possiblement causée par l'effet de l'adhésion du textile avec l'enduit.

La Figure 5.7 représente l'évolution de la rétention de l'énergie rupture au cours du vieillissement à différentes températures. Nous observons que, pour les temps de vieillissement courts, l'énergie de rupture reste essentiellement constante, tandis qu'elle montre une importante diminution lors des durées d'exposition plus longues. Notons que les valeurs de l'énergie aux temps de vieillissement courts correspondent aux faibles températures. Dans ces conditions, la vitesse de dégradation thermique du matériau est faible ; ce n'est pas le cas dans la deuxième partie de la courbe, où le processus de dégradation est rapide. Cette tendance est aussi observée lors de l'évolution de la force à la rupture des fils textiles en kevlar vieillis à différentes températures (Arrieta et al. 2011). Les mécanismes responsables de la réduction de l'énergie de rupture peuvent possiblement être chimiques (diminution de la masse molaire, oxydation, etc.) ou mécaniques (friction des fils entre eux). Ces divers mécanismes seront identifiés dans les parties suivantes.

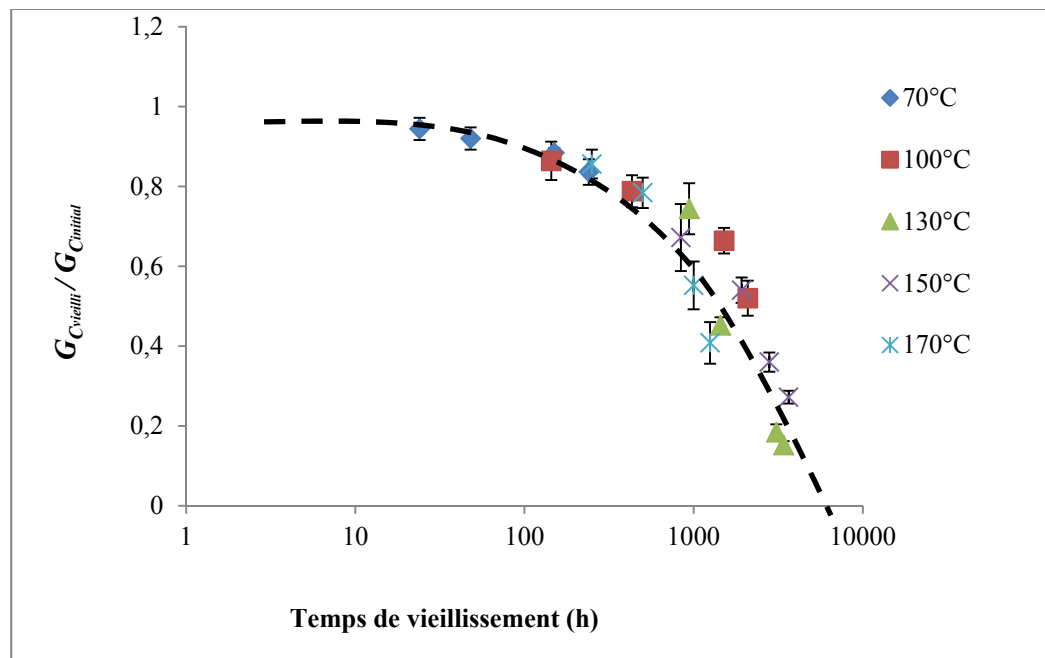


Figure 5.7 Évolution de la courbe maitresse TTS à différentes températures de vieillissement des tissus enduits

5.8 Propriétés physico-chimiques

5.8.1 Analyse DSC

L'analyse *Differential Scanning Calorimetry* (DSC) permet de déterminer les transitions thermiques et le taux de cristallinité des matériaux. Dans cette étude, nous utilisons la DSC afin de caractériser les changements physiques des gants lorsqu'ils subissent un vieillissement accéléré au laboratoire. Après une isotherme de 5 minutes à 50°C, nous imposons une croissance de température à une vitesse de 10°C/min, de 50°C à 300°C, puis une descente de 300°C à 100°C. La Figure 5.8 montre un exemple de la courbe de la DSC d'un tissu en polyester. Cette courbe présente uniquement deux transitions. Le pic exothermique près de 205°C correspond à la température de cristallisation. Le deuxième pic endothermique à 254°C assigné à la température de fusion du polyester. Ici, la température de transition vitreuse n'a pas été observée.

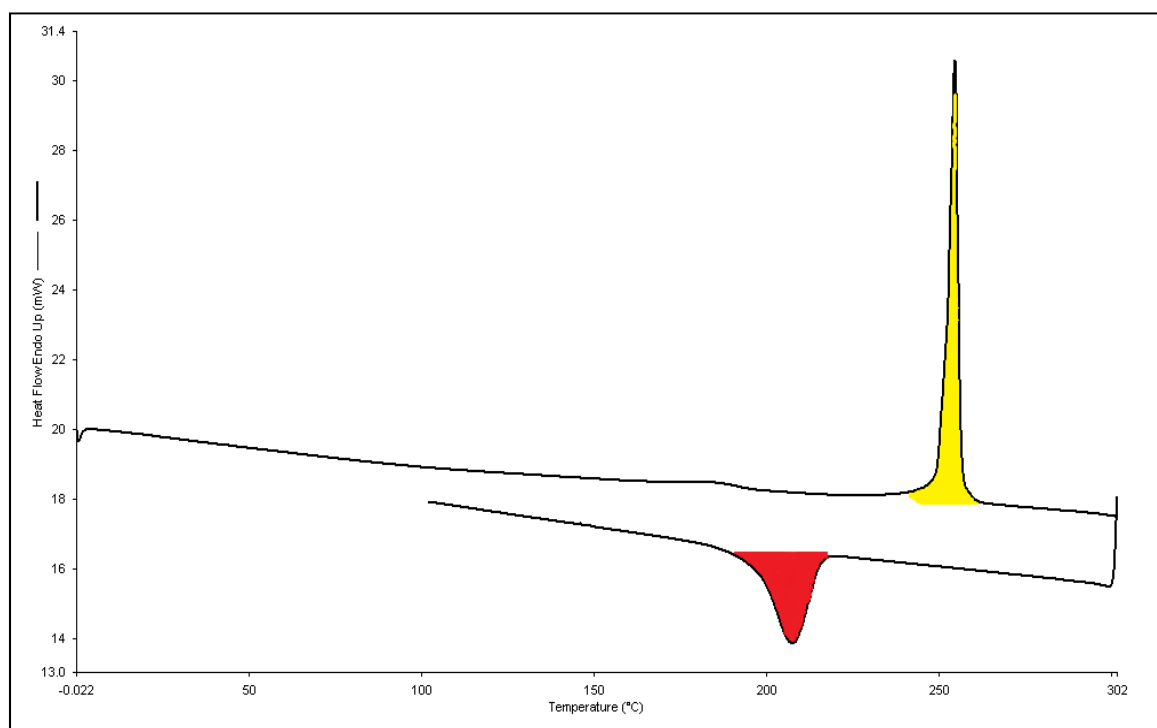


Figure 5.8 Courbe de la DSC d'un tissu en PET vieilli à 170°C

En déterminant d'abord l'enthalpie de fusion ΔH_f pour calculer, par la suite, le taux de cristallinité en utilisant la formule suivante :

$$\chi_c = \frac{\Delta H_f}{\Delta H_0} \quad (5.4)$$

Où ΔH_0 égale 140 J/g (Mehta et al. 1978).

Le Tableau 5.3. représente les différentes valeurs du taux de cristallinité des tissus en polyester, obtenus à partir de cinq différents temps de vieillissement à 170°C. On constate que ces valeurs diminuent en fonction du temps de vieillissement. Le taux de cristallinité du matériau décroît de 6% après 5h de vieillissement accéléré à 170°C. Ces résultats sont en accord avec ceux qui ont été présentés par les travaux de Gautier (1998) et de Zhang et Yuan (2010) qui ont montré une réduction de la cristallinité des fibres textiles sous l'effet de la température, des rayonnements UV et de l'humidité.

Tableau 5.3 Comportement thermique des tissus en polyester vieillis
à différents temps à 170°C

Temps (h)	ΔH_f (J/g)	X_c (%)
0	64,045	46
1	54,67	44
2	61,52	42
4	59,095	42
5	59,334	40

D'après l'évolution du taux de cristallinité en fonction du temps de vieillissement (Figure 5.9), la valeur initiale de cristallinité est de 46% (non vieilli) et la valeur finale se trouve aux alentours de 40% après une exposition de 5 h à 170°C. Ce résultat donne une idée de la variation du X_c en fonction des conditions de vieillissement. Cette tendance de la cristallinité est similaire aux résultats présentés par Zhang et Yuan (2010). Ces auteurs ont montré que la cristallinité des fibres de soie diminue de 18% à 14% sous l'effet de la température (150°C,

pendant 24h). De plus, selon Hindeleh et *al.* (Hindeleh and Abdo 1989a; Hindeleh and Abdo 1989b; Hindeleh et al. 1990), la réduction de la cristallinité de 75,5 à 64%, sous l'effet de la température, conduit à la diminution des propriétés mécaniques des fibres en Kevlar® 49.

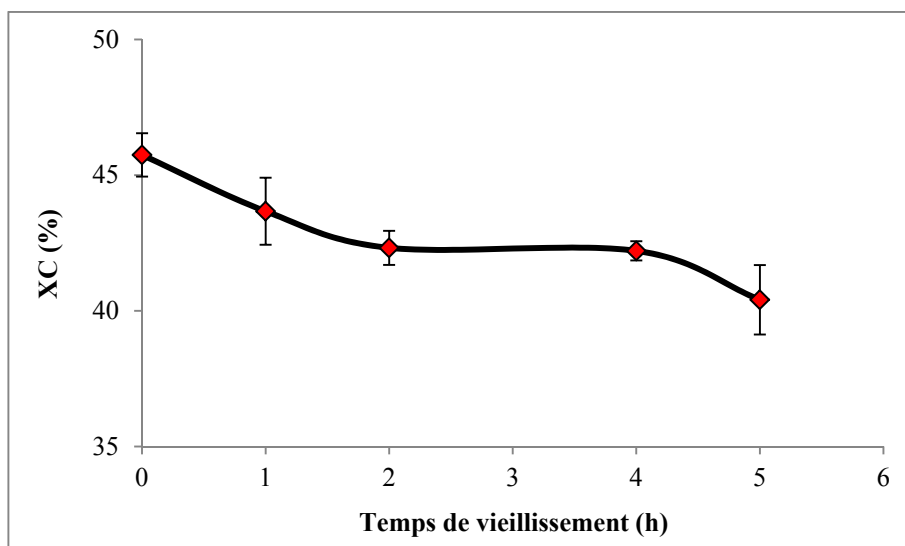


Figure 5.9 Évolution du taux de cristallinité des tissus vieillis à 170°C

5.8.2 Analyse FTIR

Cette technique nous permet d'obtenir le spectre d'absorption d'un matériau lorsqu'il est illuminé avec un faisceau de rayonnement infrarouge. La nature des différents groupements chimiques qui composent la structure du matériau peut être déduite d'après l'emplacement des bandes d'absorption présentes dans le spectre FTIR. En comparant le spectre des échantillons vieillis et non vieillis, on peut repérer les changements chimiques qui ont lieu dans le matériau comme conséquence du vieillissement. Les spectres comportent une plage de longueur d'onde comprise entre 4000 et 650 cm^{-1} (Figure 5.10). Aucun changement majeur n'est observé sur le spectre du matériau vieilli. Toutefois, une diminution de l'intensité du pic de la courbe à 1371 cm^{-1} (C-H) a lieu lors du vieillissement thermique. Cette diminution peut vraisemblablement être reliée à une perte d'hydrogène (Downing and Newell 2004) qui conduit à la formation des radicaux libres.

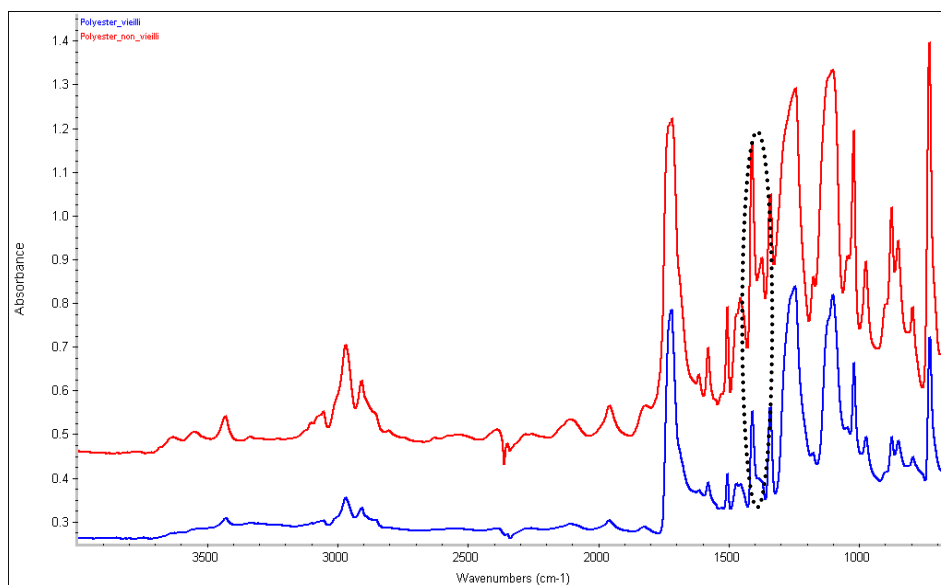


Figure 5.10 Analyse FTIR sur des tissus en polyester vieillis et non vieillis

Selon les deux spectres montrés à la Figure 5.10, nous pouvons voir les bandes d'absorption caractéristiques des principales fonctions rencontrées dans le polyester. Les fréquences de vibration de chaque bande sont énumérées dans le Tableau 5.4 (Donelli et al. 2010).

Tableau 5.4 Caractéristiques infrarouges des groupements principaux du PET

Vibrations caractéristiques	Fréquence de vibration (cm ⁻¹)
O-H stretching	3440
C=O stretching	1720
C-C stretching	1506 et 1410
CH ₂ wagging	1371
C(=O)-O stretching, ring-ester CC stretching et C=O in-plane bending	1260
C-O stretching	1098 et 1044
ring CH out-of-plane bending, ring-ester C-C out-of-plane bending et C=O out-of-plane bending	874
C=O out-of-plane bending	725

5.9 Analyse de la morphologie des tissus

Les analyses de la morphologie réalisées à l'aide du microscope électronique à balayage (MEB) sur les tissus vieillis et non vieillis sont illustrées par la Figure 5.11. D'une manière générale, la surface des fibres non vieilles apparaît relativement lisse, alors que celle des fibres vieilles présente plusieurs défauts tout au long de la surface. La dégradation de l'état de la surface des fibres a des retombées sur la friction entre les fils

Plusieurs auteurs (Taylor 1959; Scelzo et al. 1994b) ont montré que le glissement des fils est un facteur principal lors de la propagation de la fissure dans les tissus. En vertu de son importance, ils ont développé des modèles de déchirure qui prennent en compte le glissement des fils. Teixeira et ses collaborateurs (Teixeira et al. 1955) ont montré que l'augmentation de la résistance de glissement des fils entraîne une réduction de la force de déchirure. Ainsi, dans le chapitre 3, nous avons montré que l'augmentation de la force de glissement se manifeste par une réduction de l'énergie de rupture des tissus à haute densité des fils. De même, les analyses MEB révèlent que la dégradation de la surface des fibres suite au vieillissement thermique peut influencer, en partie, sur le glissement des fils dans la structure textile. En effet, la diminution de l'énergie de rupture des tissus et des tissus enduits vieillis est alors liée au changement de l'état de surface des fils.

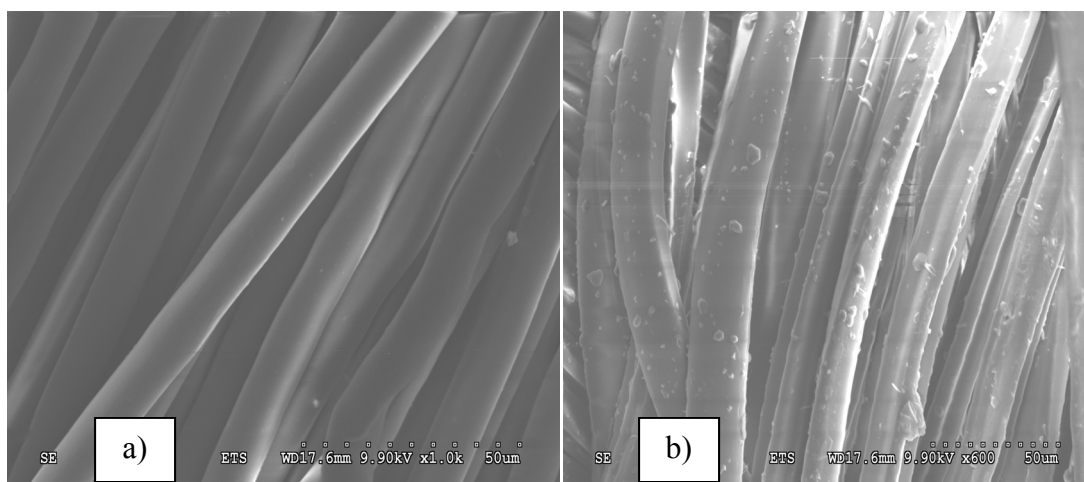


Figure 5.11 Changement de la morphologie des fibres en polyester avant et après vieillissement, a) non vieillis et b) vieillis

5.10 Discussion

L'énergie de rupture des enduits est très faible en comparaison à celle du support textile (Figure 5.12). Ainsi, cette énergie ne contribue pas à la résistance à la déchirure des textiles enduits. Or, l'influence de l'enduit sur la propagation de la fissure dans les textiles enduits se manifeste par l'adhésion du textile avec l'enduit, qui nuit au glissement entre les fils. Par conséquent, cette couche d'enduit diminue l'énergie de rupture des textiles enduits.

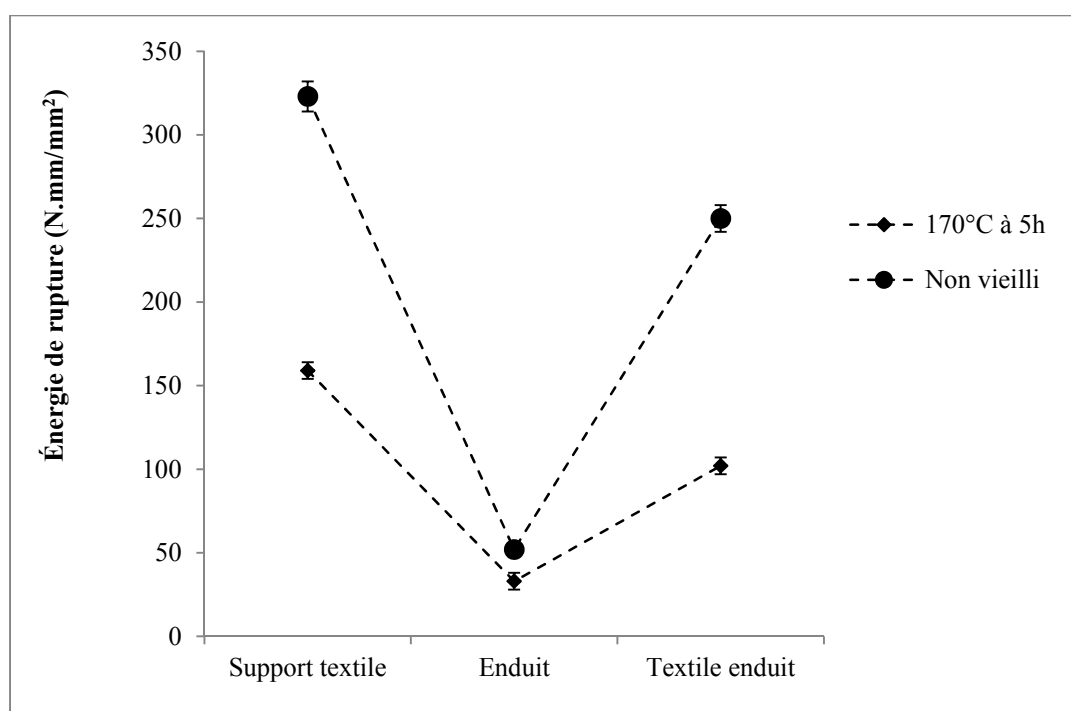


Figure 5.12 L'effet du vieillissement thermique sur l'énergie de rupture du support textile, de l'enduit et du textile enduit

La diminution de la rétention de l'énergie de rupture des textiles enduits semble être liée à deux différents phénomènes qui peuvent être caractérisés à l'échelle macroscopique et microscopique.

À l'échelle macroscopique

Le premier processus qui cause la diminution de l'énergie de rupture des textiles enduits à l'échelle macroscopique correspond au glissement des fils dans la structure textile. Les tests de délaminage T-peel montrent que la rétention de la force d'adhésion du textile avec l'enduit, $F_{\text{vieilli}}/F_{\text{initial}}$, augmente lors du vieillissement (Figure 5.13). Cette augmentation engendre une diminution de la force de glissement des fils qui, à son tour, a pour effet de provoquer une décroissance de la résistance à la déchirure des textiles enduits (Mewes 1989). La déchirure de ces matériaux, vieillis dans des conditions plus sévères, comme à 130°C pendant 170 h, ne montre aucun délaminage au moment de la propagation de la fissure. Ainsi, une grande adhésion du textile avec l'enduit a été observée. Par conséquent, le glissement des fils au moment de la déchirure est négligeable. Cela engendre une importante diminution de l'énergie de rupture.

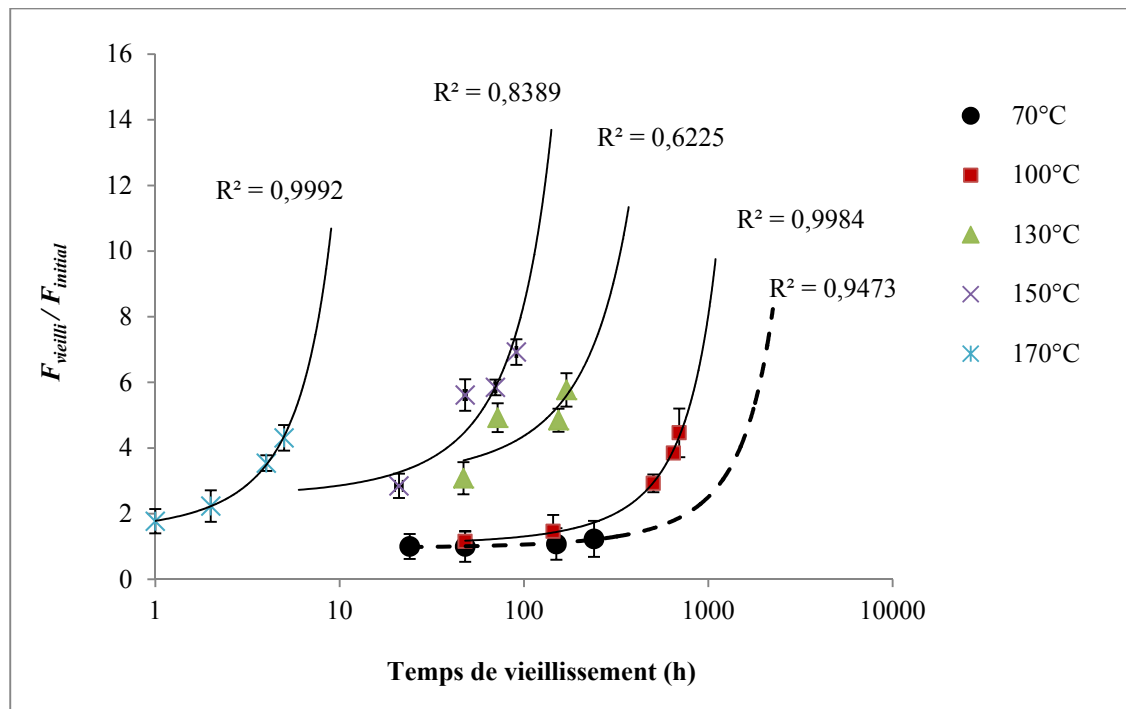


Figure 5.13 Effet du vieillissement thermique sur la rétention de la force d'adhésion du textile avec l'enduit

La comparaison de la vitesse de dégradation thermique des tissus et des tissus enduits fait aussi l'objet de cette étude. Nous nous sommes particulièrement intéressés à l'étude de la variation de l'énergie de rupture de ces deux matériaux en fonction de la durée de vieillissement thermique. La Figure 5.14 présente les courbes maîtresses de la rétention de l'énergie de rupture pour les tissus et les tissus enduits. À temps de vieillissement courts, l'allure des deux courbes est très semblable. Ceci met en évidence l'effet majeur du support textile sur le comportement en déchirure des textiles enduits. Cependant on observe que, pour les temps d'exposition longs, il y a une différence en ce qui a trait à l'évolution de l'énergie de rupture des deux matériaux. Le processus de réduction de l'énergie de rupture des tissus et des tissus enduits n'est donc pas le même. En outre, les résultats présentés au préalable montrent que l'énergie d'activation des tissus est supérieure à celle des tissus enduits. Ces résultats peuvent être attribués à l'effet marquant de l'adhésion du textile avec l'enduit, laquelle augmente en fonction du vieillissement thermique (Figure 5.13). Cette croissance accélère d'une manière significative la diminution de l'énergie de rupture des textiles enduits.

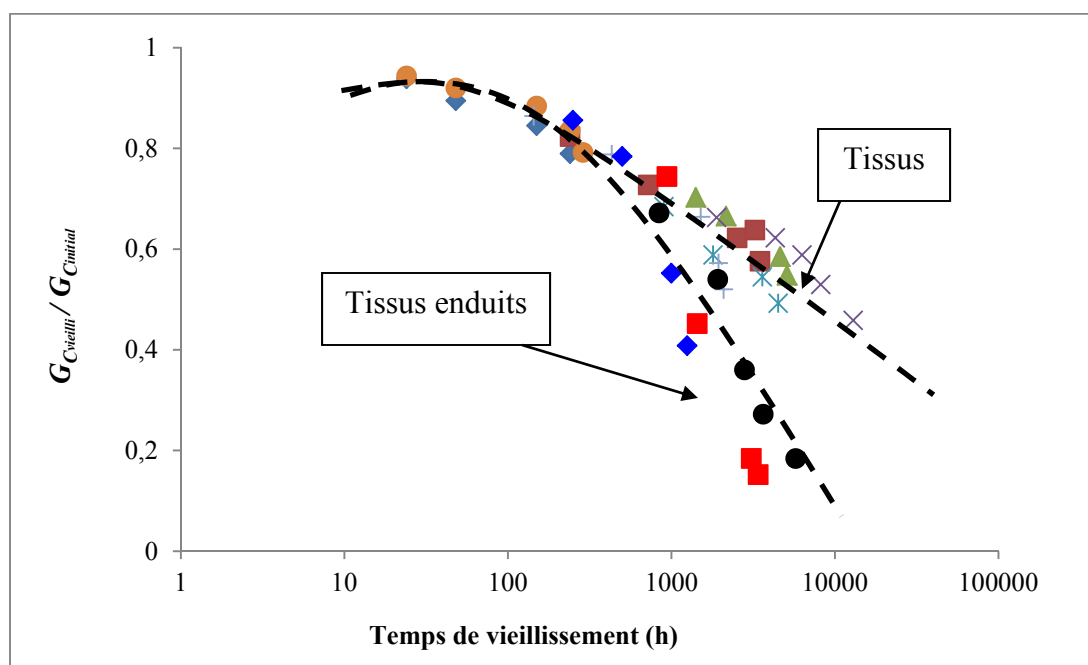


Figure 5.14 Évolution de la courbe maîtresse TTS à différentes températures de vieillissement des tissus et des tissus enduits

est de faire extrapoler l'évolution de la rétention de l'énergie de rupture, qui a été obtenue par la loi d'Arrhenius, par l'équation d'Hill.

Disposant, d'une part, de la courbe maîtresse de l'évolution de la rétention de l'énergie de rupture des tissus et des tissus enduits en fonction de la durée de vieillissement à différentes températures et, d'autre part, de la loi de la variation de $\ln(a_T)$ avec la température, il est possible de réaliser des prédictions de la durée de vie des tissus. Ainsi, une interpolation de cette courbe maîtresse de rétention de l'énergie de rupture a fait le sujet de cette partie. Pour ce faire, l'équation suivante d'Hill est utilisée (Triki et al. 2012) :

$$\frac{G_C}{G_{C_0}} = 1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{t_{dépl}}{\alpha} \right)^\beta} \quad \Rightarrow \quad t_{dépl} = \alpha \left(\frac{1}{1 - \frac{G_C}{G_{C_0}}} - 1 \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (5.5)$$

Où G_C/G_{C_0} est la rétention de l'énergie de rupture, $t_{dépl}$ est la durée de vieillissement qui dépend du facteur de déplacement a_T et α et β sont deux constantes.

En utilisant cette équation, l'interpolation de l'évolution de la rétention de l'énergie de rupture en fonction du temps de vieillissement, réalisé à différentes températures, est parfaite (Figure 5.16). Dans ce cas, α et β prennent respectivement les valeurs suivantes 1484 heures et -1.04. La concordance entre la courbe maîtresse qui a été obtenue à la suite de l'utilisation des valeurs de décalage, et la courbe obtenue à l'aide de l'équation d'Hill, permet de dire que cette dernière est capable d'interpoler l'évolution de la rétention de l'énergie de rupture des tissus (Figure 5.16).

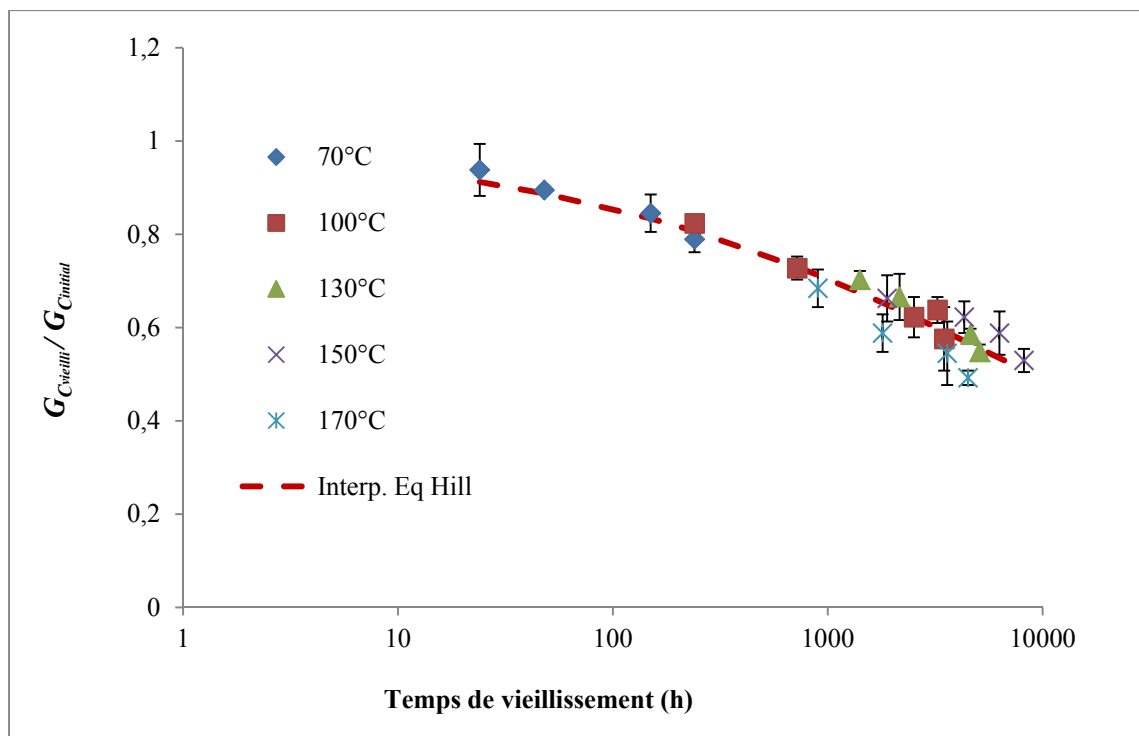


Figure 5.16 Courbe maîtresse de rétention de l'énergie de rupture en fonction de la durée de vieillissement et son interpolation par l'équation d'Hill pour la thermo-oxydation du tissu en polyester

Dans le cas du vieillissement par thermo-oxydation des tissus enduits, nous avons montré, au préalable, que la rétention de l'énergie de rupture suit le principe de la superposition temps-température. La courbe maîtresse, construite par les facteurs de déplacement, peut être interpolée par l'équation d'Hill (Figure 5.17). Nous pouvons ainsi prédire les temps de vieillissement nécessaires afin d'obtenir des rétentions de l'énergie de rupture bien précises.

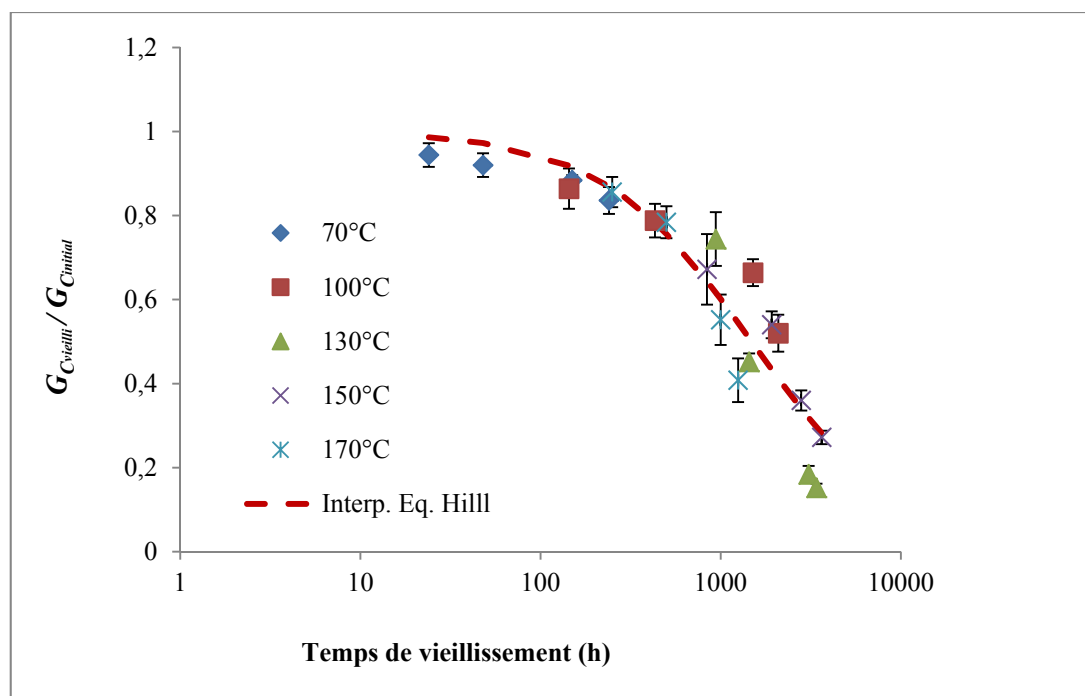


Figure 5.17 Courbe maîtresse de rétention de l'énergie de rupture en fonction de la durée de vieillissement et son interpolation par l'équation d'Hill pour la thermo-oxydation du tissu en polyester-vinyle

Nous venons de voir qu'il est possible de prédire la durée de vie des tissus en polyester et des tissus en polyester-vinyle par l'évaluation de l'énergie de rupture. Le principe du superposition temps-température permet de déterminer une courbe maîtresse dans l'intervalle de température 70 à 170°C. De fait, les mécanismes prépondérants de dégradation par thermo-oxydation semblent les mêmes pour toutes les températures. La seconde méthode utilisée s'avère plus générale. Elle permet de décrire, d'une manière précise, l'évolution de la rétention de l'énergie de rupture en fonction de la durée de vieillissement.

5.12 Conclusion

L'effet du vieillissement thermique sur les comportements en déchirure des textiles enduits a été qualitativement déterminé. Bien que les mécanismes de dégradation thermique soient quasiment les mêmes pour les tissus et les tissus enduits, la vitesse de ce processus de dégradation est, par ailleurs, différente pour les deux matériaux. Cela est dû à l'effet marquant de l'enduit, qui se manifeste seulement par la réduction de la mobilité des fils au moment de la déchirure.

CONCLUSION

Cette étude vise à mieux comprendre les mécanismes de déchirure et à étudier à nouveau les comportements en déchirure des matériaux textiles utilisés pour les vêtements de protection. La déchirure des tissus à basse densité de fils et dont les fils sont de faible masse linéique permet, exclusivement, d'obtenir la propagation de la fissure par glissement des fils, la rupture des fils n'ayant pas été observée. Un critère de rupture a été établi afin de déterminer l'effet des caractéristiques des tissus sur leur énergie de rupture. Une modélisation expérimentale et analytique de la déchirure des tissus a été réalisée en faisant intervenir la force de glissement et la force à la rupture des fils. Nous nous sommes également intéressés à l'étude de l'effet du vieillissement thermique sur l'énergie de rupture des structures textiles afin d'élaborer un modèle apte à décrire l'effet de la température sur le comportement en déchirure de ce type de matériaux.

Dans le premier chapitre, un état de l'art sur la déchirure des matériaux utilisés pour les vêtements de protection a été présenté. Nous avons porté notre attention sur les différentes méthodes de déchirure, la propagation de la fissure, l'effet des caractéristiques des tissus sur la force de déchirure et les modèles empiriques de calcul de la résistance à la déchirure de ces matériaux. Cette étude attache beaucoup d'importance à la nécessité de définir un critère pour caractériser la résistance à la déchirure des textiles.

Le deuxième chapitre est consacré à l'élaboration d'un nouveau critère de rupture par des configurations de déchirure pantalon et uni-axiale. Des tests de déchirure ont été menés sur des tissus en coton, en polyester et en mélange polyester/coton afin d'étudier l'effet, sur l'énergie de rupture, de la densité des fils, de la masse linéique des fils et du type d'armure. L'originalité de cette étude se révèle, en partie, par la déchirure des tissus sans rupture des fils. Ce nouveau processus de déchirure donne des résultats totalement contraires à ceux qui ont été présentés dans la littérature. De fait, la configuration de déchirure pantalon offre la possibilité d'observer la propagation de la fissure par glissement des fils transversaux. Ce nouveau mécanisme a été observé dans le cas des

tissus à basse densité de fils et de faible masse linéique des fils. Il engendre alors une réduction de l'énergie de rupture des tissus.

À partir de la caractérisation des mécanismes de déchirure, nous avons développé un modèle analytique qui sert à identifier l'énergie de rupture en tenant compte des caractéristiques des tissus, notamment la densité des fils, le nombre de croisement des fils de chaîne et de trame et l'espacement entre les fils, et en considérant, également, des comportements en déchirure des tissus tels que la force de glissement et la force à la rupture des fils. Cette modélisation souligne aussi deux différentes catégories de déchirure : la déchirure des tissus à basse densité des fils et la déchirure des tissus de haute densité des fils. Sur la base de ces résultats, le rapport établi entre la force à la rupture et la force de glissement d'un fil a un effet marquant sur la variation de l'énergie de rupture du tissu. La résistance à la déchirure la plus élevée est observée lorsque ce rapport est égal à l'unité, c'est-à-dire que la valeur de la force de glissement et celle de la force à la rupture d'un fil sont très proches.

Pour compléter cette étude expérimentale de la déchirure des matériaux textiles, le quatrième chapitre est consacré à l'étude de la déchirure des textiles enduits. La propagation de la fissure dans ces matériaux se manifeste par la déchirure de la couche d'enduit et du support textile ainsi que par le délaminage du textile et de l'enduit. La résistance à la déchirure des textiles enduits peut seulement être déterminée par le calcul de leur énergie de rupture. De fait, la force de déchirure n'est pas apte à caractériser cette résistance d'une manière juste. Le calcul de la force néglige complètement la contribution de la couche d'enduit.

L'effet du vieillissement thermique accéléré sur l'énergie de rupture des tissus et des tissus enduits est aussi réalisé dans le but de mettre en évidence l'influence des conditions d'utilisation sévères, notamment les hautes températures, sur la performance des vêtements de protection. La réduction de l'énergie de rupture des tissus enduits en fonction du temps de vieillissement à différentes températures a été attribuée aux modifications des propriétés physiques et chimiques du tissu ainsi qu'au comportement en

adhésion du textile avec l'enduit. Nous avons également observé que l'énergie de rupture de la couche d'enduit est très faible. En effet, l'énergie de rupture du support textile est quasiment la seule qui détermine la résistance à la déchirure des tissus enduits.

RECOMMANDATIONS

En perspective, nous proposons d'étudier à nouveau l'effet des autres caractéristiques des tissus tels que le type de fibres, la torsion des fils, etc. sur l'énergie de rupture de matériaux. Il serait également intéressant d'appliquer notre modèle de calcul de l'énergie de rupture à d'autres types de textiles pour vérifier sa fiabilité.

L'étude de l'effet de l'humidité, du rayonnement Ultraviolet et des solvants sur la variation de l'énergie de rupture des textiles utilisés pour les vêtements de protection doit être considérée comme une perspective immédiate à notre étude. L'utilisation de l'énergie tenue pour un critère de rupture pour les matériaux textiles, notamment les textiles enduits, permet d'observer l'effet de l'adhésion du textile- enduit sur l'évolution du comportement en déchirure dans différentes conditions sévères.

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abbott, N. J., T. E. Lannefeld, L. Barish et R. J. Brysson (1971a). "Study of tearing in coated cotton fabrics: Part I: the Influence of Fabrics Construction." *Journal of Industrial Textiles* **1**: 4-17.
- Abbott, N. J., T. E. Lannefeld, L. Barish et R. J. Brysson (1971b). "Study of tearing in coated cotton fabrics: Part II: the Influence of Coating Characteristics." *Journal of Industrial Textiles* **1**: 64-84.
- Arrieta, C., D. Éric. et T. Vu-khanh. (2011). Étude de l'effet du vieillissement sur les propriétés d'un tissu en mélange KEVLAR®-PBI utilisé dans le vêtement extérieur des habits de protection contre le feu, Rapport de thèse, Département de génie mécanique à l'École de technologie supérieure.
- ASTM, A. S. f. T. M. (1989). Standard Test Method for Tearing Strength of Woven Fabrics by the Tongue (Single Rip) Method (Constant-Rate-of-Extension Tensile Testing Machine). Philadelphia, PA., Annual Book of ASTM Standards. **07-01**: 344-346.
- Berriot, J., H. Montes, F. Lequeux, D. Long et P. Sotta (2002). "Evidence for the shift of the glass transition near the particles in silica-filled elastomers." *Macromolecules* **35**(26): 9756-9762.
- Boyce, M. C., M. L. Palmer, M. H. Seo, P. Schwartz et S. Backer (1991). Model of the tensile failure process in woven fabrics. Proceedings of the Fiber Society 50th Anniversary Technical Conference, August 19, 1990 - August 23, 1990, Princeton, NJ, USA, Publ by John Wiley & Sons Inc.
- Budrugaec, P., E. Segal, et S. Ciutacu (1991). "Thermooxidative degradation of nitrile-butadiene rubber." *Journal of Thermal Analysis* **37**(6): 1179-1191.
- Calvarin, L. (1994). "Acétate de vinyle." *Techniques de l'ingénieur Référence J6040*

- Clulow, E. E. and H. M. Taylor (1963). "Experimental and theoretical investigation of biaxial stress-strain relations in plain-weave cloth." Textile Institute -- Journal **54**(8): 323-347.
- Coste, G. (2004). "Les non-tissés." EFPG/IRFIP, INP Grenoble EFPG, cerig.efpg.inpg.fr.
- Dartman, T. and R. Shishoo (1993). "Studies of adhesion mechanisms between PVC coatings and different textile substrates." Journal of Coated Fabrics **22**: 317-335.
- Das, A., S. M. Ishtiaque, S. Singh et H. C. Meena (2009). "Tensile characteristics of yarns in wet condition." Indian Journal of Fiber and Textile Research **34**: 338-344.
- Datye, K. V. and B. H. Palan (1989). "Effect of alkali on filaments of poly(ethylene terephthalate) and its copolyesters." Journal of Applied Polymer Science **38**(8): 1447-1468.
- Debnath, S. and S. Sengupta (2009). "Effect of linear density, twist and blend proportion on some physical properties of jute and hollow polyester blended yarn." Indian Journal of Fibre and Textile Research **34**: 11-19.
- Dhingra, R. C., S. de Jong, et R. Postal (1981). "LOW-STRESS MECHANICAL PROPERTIES OF WOOL AND WOOL-BLEND WOVEN FABRIC." Textile Research Journal **51**(12): 759-768.
- Dolez, P., E. Triki, et T. Vu-khanh (2011). "Factors Affecting The Tearing Resistance of Textile Structures." World Journal of Engineering **ICCE-19 SHANGHAI PROCEEDINGS EXCELLENT**(Supplement 1): P281.
- Donelli, I., G. Freddi, V. A. Nierstrasz et P. Taddei (2010). "Surface structure and properties of poly-(ethylene terephthalate) hydrolyzed by alkali and cutinase." Polymer Degradation and Stability **95**(9): 1542-1550.

- Downing Jr, J. W. and J. A. Newell (2004). "Characterization of structural changes in thermally enhanced Kevlar-29 fiber." Journal of Applied Polymer Science **91**(1): 417-424.
- Dridi, S. (2010). Essais de Caractérisation des Structures Tissées, L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- Dupont (2011). "Kevlar® Aramid Fiber." Technical Guide fo Kevlar Aramid Fiber Advanced Fibers H-77848, Systemes Customer Inquiry Center, U.S.A.
- Dutta, B. (1994). "Coated fabrics." Rubber Product Manufacturing Technology **473-501**.
- Eichert, U. (1981). "Studies on the Effect of Yarn Twist on Adhesion and Tear Srength in PVC-Coated " Industrial Fabrics, Enka Glanzstoff, Information.
- Eichert, U. (1981). "Technical Properties of Coated Industrial Fabrics." Sympos. Industrial Fabrics '81, Durban.
- Eichert, U. (1994). "Weaving and coating processing influences (fabric rendement)." Journal of Coated Fabrics **24**: 20-20.
- El Aidani, R., P. I. Dolez, et T. Vu-khanh (2011). "Effect of Thermal Aging on the Mechanical and Barrier Properties of an e-PTFE/NomexVR Moisture Membrane Used in Firefighters' Protective Suits." Journal of Applied Polymer Science **121**: 3101–3110.
- EN388 (2003). "Protective gloves against mechanical risks-EN 388." Comité Européen de Normalisation
- Farboodmanesh, S., J. Chen, J. L. Mead, K. D. White, H. E. Yesilalan, R. Laoulache et S. B. Warner (2005). "Effect of coating thickness and penetration on shear behavior of coated fabrics." Journal of Elastomers and Plastics **37**(3): 197-227.

- Felbeck, D. and A. Atkins (1996). "Strength and fracture of engineering solids." 2nd ed. NJ: Prentice-Hall Inc.
- Gautier, K. B. (1998). Analyse et simulation du comportement mécanique des renforts composites tissés, thèse de doctorat, Université d'Orleans.
- Gdoutos, E. E., I. M. Daniel, et P. Schubel (2003). "fracture mechanics of rubber" Mechanics, Automatic Control and Robotics **3**(13): 497 - 510.
- Gent, A. N. and H. J. Kim (1978). "TEAR STRENGTH OF STRETCHED RUBBER." Rubber Chemistry and Technology **51**(1): 35-44.
- Gent, A. N. and P. B. Lindley (1959). "Internal Rupture of Bonded Rubber Cylindres in Tension." Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences **A249**(1257): 195-205
- Gent, A. N. and C. T. R. Pulford (1984). "Micromechanics of fracture in elastomers." Journal of Materials Science **19**(11): 3612-3619.
- Gillen, K. T., M. Celina, R. L. Clough et J. Wise (1997). "Extrapolation of accelerated aging data – Arrhenius or erroneous ?" Trends Polym. Sci **5**(8): 250-257.
- Greensmith, H. W. and A. G. Thomas (1955). "Rupture of rubber. III. Determination of tear properties." Journal of Polymer Science **18**(88): 189–200.
- Griffith, A. A. (1920). "The phenomena of rupture and flow in solids." Philosophical Transactions of the Royal Society of London **A**(221): 163-198.
- Grosberg, P. and S. Kedia (1966). "Mechanical properties of woven fabrics -- 1." Textile Research Journal **36**(1): 71-79.
- Hager, O. B., D. D. Gagliardi, et H. B. Walker (1947). "Analysis of tear strength." Textile Research Journal **17**(7): 376-381.

- Hamkins, C. P. and S. Backer (1980). "On the Mechanisms of Tearing in Woven Fabrics." Textile Research Journal **50**: 323-327.
- Harrabi, L. (2009). Comportement viscoelastique à grande déformation des composites élastomeres - textiles utilisés dans les équipements de protection, Rapport de thèse, École de technologie supérieure.
- Helaly, F. M., S. M. El-Sawy, et M. A. Abd El-Ghaffar (1994). "Physico-mechanical properties of styrene-butadiene rubber (SBR) filled with Egyptian Kaolin." Journal of Elastomers and Plastics **26**(4): 335-346.
- Hindeleh, A. M. and S. M. Abdo (1989a). "Effects of annealing on the crystallinity and microparacrystallite size of Kevlar 49 fibres." Polymer **30**(2): 218-224.
- Hindeleh, A. M. and S. M. Abdo (1989b). "Relationship between crystalline structure and mechanical properties in Kevlar 49 fibres." Polymer communications Guildford **30**(6): 184-186.
- Hindeleh, A. M., R. Hosemann, G. Hinrichsen et H. Springer (1990). "Paracrystallinity, microparacrystal size and molecular weight distribution of Kevlar 49 fibres, exposed to elevated temperatures." Polymer communications Guildford **31**(5): 205-208.
- Hu, X. C. and H. H. Yang (2000). "Polyamide and polyester fibers." Comprehensive Composite Materials, E. A. Kelly **1**: 327-344.
- Institute, I. R. (2000). "Rubber engineering." McGraw-Hill: 52-59 521-552.
- IRSST (1990). "Les accidents aux mains dans le secteur de la fabrication de produits en métal." Institut de recherche en santé et en sécurité du travail du Québec **Profil-recherche** **117**.

- Julie, C., L. Johannes, P. Ning, M. Joey et W. Steve (2002). "Substrate-Coating Interaction in Coated Fabrics." National Textile Center Annual Report F00-MD06.
- Kadir, A. and A. G. Thomas (1981). "TEAR BEHAVIOR OF RUBBERS OVER A WIDE RANGE OF RATES." Rubber Chemistry and Technology **54**(1): 15-23.
- Kawabata, S. (1989). "Non Linear Mechanics of Woven and Knitted Materials." Textile Structural Composites, Chou, T. W. and Ko, F. K. (Ed.), Elsevier Science Publisher: 67-116.
- KEVLAR®, D. (1999). "Gloves of 100% KEVLAR® brand fiber drove injuries down 50% at U.S. auto assembly plant."
- Kim, J., W. I. Lee, et S. W. Tsai (2002). "Modeling of mechanical property degradation by short-term aging at high temperatures." Composites Part B: Engineering **33**(7): 531-543.
- Kim, J. H. and H. Y. Jeong (2005). "A study on the material properties and fatigue life on natural rubber with different carbon blacks." Intern. J. of Fatigue **27**: 263-272.
- Kirkwood, K. M., J. E. Kirkwood, Y. S. Lee, R. G. Egres et N. J. Wagner (2004). "Yarn Pullout as a Mechanism for Dissipating Ballistic Impact Energy in Kevlar KM-2 fabric. Part I: Quasi-static Characterization of Yarn Pull-out." Textile Research Journal **74**: 939-948.
- Kozak, M., A. Danch, W. Osoba, L. Domka, F. Stelzer et S. Jurga (2004). "Relationship between filler loading and morphology of the interphase in polyethylene-chalk composites." Polymers and Polymer Composites **12**(5): 409-416.
- Krook, C. M. and K. R. Fox (1945). "Study of tongue-tear test." Textile Research Journal **15**(11): 389-396.

- Lawandy, S. N., A. F. Younan, N. A. Darwish, F. Yousef et A. Mounir (1997). "Adhesion properties of butyl rubber-coated polyester fabric." Journal of Adhesion Science and Technology **11**(9): 317-325.
- Lord, P. R. and W. C. Stuckey (1986). "Plain-Weave Fabrics Made from Twistless and Low-Twist Staple Yarns." Textile Research Journal **56**: 533-545.
- Lourdin, P. and P. Couvrat (1999). "Polychloroprène." Macrogalleria, Ecole Catholique d'Arts et Métiers est une école d'ingénieurs généralistes située à Lyon (France).
- Lu, M. G., M. J. Shim, et S. W. Kim (2000). "Thermal degradation of LC epoxy thermosets." J. Appl. Polym. Sci **75**: 1514-1521.
- Mardelle, N. (2009). "Le néoprène®." Crausaz ares armement, ZI "La trentaine" 8, rue Gustave Eiffel 77507 Chelles cedex.
- Martin, B. G. (1998). Sur la Propagation de Fissure dans les Elastomères, Laboratoire de mécanique des Solides, à l'Ecole Polytechnique de Paris.
- Mathur, A., A. N. Netravali, et T. D. O'Rourke (1994). "Chemical aging effects on the physio-mechanical properties of polyester and polypropylene geotextiles." Geotextiles and Geomembranes **13**(9): 591-626.
- Mazich, K. A., K. N. Morman, F. G. Oblinger, T. Y. Pan, et P. C. Killgoar (1989). "Effect of specimen thickness on the tearing energy of a gum vulcanizate." Rubber Chemistry and Technology **62**(5): 850-862.
- Mehta, A., U. Gaur, et W. Bernhard (1978). "Equilibrium Melting Parameters of Poly (ethylene terephthalate)." J. of Polym. Sci., Polym. Phys. **16**: 289.
- Mewes, H. (1989). "Adhesion and Tear Resistance of Coated Fabrics from Polyester and Nylon." Journal of Industrial Textiles **19**: 112-128.

- Miller, B., P. Muri, et L. Rebenfeld (1987). "Microbond method for determination of the shear strength of a fiber/resin interface." Composites Science and Technology **28**(1): 17-32.
- Minami, H. (1978). "strength of coated fabrics with crack." Journal of Coated Fabrics **7**(4): 269-292.
- Nayak, S., J. Labde, S. Geedh, S. K. Jaisingh, K. Rao, S. Venkatachalam et A. K. Kelkar (2010). "Study on Degradation Reactions in PolyethyleneTerephthalate Containing 5-sulpho Isophthalyl Moieties." Journal of Applied Polymer Science **118**: 2791–2800.
- Nelson, W. (1971). "Analysis of accelerated life test data-1." IEEE Trans. Elec. Insul. **EI-6**(4): 165-181.
- Nguyen, C., V.-K. Toan, P. Dolez et J. Lara (2009). "Puncture of elastomer membranes by medical needles - Part I: mechanisms." International Journal of Fracture **155**(1): 75-81.
- Patterson, J. (1975). "The mechanism of the thermal degradation of aromatic amine cured glycidyl ether type epoxy resins." J. Appl. Polym. Sci **19**: 1539-1547.
- May-Lin, P. s. I. (1958). "Nitrile, EP / EPDM." May-Lin Silicone Products, Inc. PO Box 335 • 955 Wooster Road West Barberton, Ohio 44203
- Piotin, S. (2005). Vers un outil C.A.O. pour la maille, Université de Reims Champagne-Ardenne, Ecole doctorale Sciences, Technologies et Santé.
- Pogany, G. A. (1969). "Heat resistance of epoxy resins." Brit. Polym. J. **1**: 177-179.
- Raghavendra, R. H., A. Dahiya, et M. G. Kamath (2004). "POLYESTER FIBERS."
- Realff, M. L. (1992). Mechanical Properties of Fabrics Woven from Yarns Produced by Different Spinning Technologies, Thesis, Massachusetts Institute of Technology.

- Realff, M. L. (1994). "Identifying local deformation phenomena during woven fabric uniaxial tensile loading." Textile Research Journal **64**(3): 135-141.
- Realff, M. L., M. Seo, M. C. Boyce, P. Schwartz et S. Backer (1991). "Mechanical properties of fabrics woven from yarns produced by different spinning technologies. Yarn failure as a function of gauge length." Textile Research Journal **61**(9): 517-530.
- Rivlin, R. S. and A. G. Thomas (1953). "Rupture of rubber. I. Characteristic energy for tearing." Journal of Polymer Science **10**(3): 291–318.
- Saintier, N. (2001). Fatigue multiaxiale dans un élastomère de type NR charge: mécanismes d'endommagement et critère local d'amorçage de fissure Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Salem, E. H., R. H. Johnson, et M. H. Mohamed (1995). "Tensile properties of textured polyester woven fabrics: theoretical model for plain weave fabric." Textile Research Journal **65**(4): 185-196.
- Scelzo, W. A., S. Backer, et M. C. Boyce (1994a). "Mechanistic role of yarn and fabric structure in determining tear resistance of woven cloth part I: understanding tongue tear." Textile Research Journal **64**(5): 291-304.
- Scelzo, W. A., S. Backer, et M. C. Boyce (1994b). "Mechanistic role of yarn and fabric structure in determining tear resistance of woven cloth part II: modeling tongue tear." Textile Research Journal **64**(6): 321-329.
- Schwartz, P., R. Fornes, et M. Mohamed (1982). "analysis of the mechanical behavior of triaxial fabrics and the equivalency of conventional fabrics." Textile Research Journal **52**(6): 388-394.
- Selling, H. J. and C. A. Bok (1968). New Method of Manufacturing Twistless Yarns, In Studies in Modern Yarn Production, the Textile Institute.

- Sen, A. K. and D. John (2001). "Physical Properties of Coated Fabrics." Coated Textiles Principles and Applications: 99-111.
- Seo, M. H. (1989). Modelling of Tear Phenomena in Fabric, Research Memo, MIT Department of Mechanical Engineering.
- Seo, M. H., M. L. Realff, N. Pan, M. Boyce, P. Schwartz et S. Backer (1993). "Mechanical properties of fabric woven from yarns produced by different spinning technologies: yarn failure in woven fabric." Textile Research Journal **63**(3): 123-134.
- Taylor, H. M. (1959). "Tensile and tearing strength of cotton cloths." Journal of the Textile Institute **50**: T161-T187.
- Teixeira, N. A., M. M. Latt, et W. J. hamburger (1955). "Mechanics of elastic performance of textile materials -- 12." Textile Research Journal **25**(10): 839-861.
- Thoma, H. (2003). "La solutions matériaux." CARMA - Centre d'Animation Régional en Matériaux Avancés **27**.
- Tricas, N., E. Vidal-Escales, S. Borros et M. Gerspacher (2003). Influence of carbon black amorphous phase content on rubber filled compounds. Nano- and Micro-Composite. Symposium N of the 2002 E-MRS Spring Meeting, 18-21 June 2002, UK, Elsevier.
- Triki, E., C. Arrieta, et T. Vu-khanh (2012). "Tear behavior of polyester-based coated textiles after thermo-oxidative aging." Polymer Composites **in Press**.
- Triki, E., P. Dolez, et T. Vu-khanh (2011). "Tear resistance of woven textiles - Criterion and mechanisms." Composites Part B: Engineering **42**(7): 1851-1859.
- Tsotsis, T. K., S. Keller, J. Bardis et J. Bish (1999). "Preliminary evaluation of the use of elevated pressure to accelerate thermooxidative aging in composites." Polym. Degrad. & Stab. **64**: 207-212.

- Tsunoda, K., J. J. C. Busfield, C. K. L. Davies et A. G. Thomas (2000). "Effect of materials variables on the tear behaviour of a non-crystallising elastomer." Journal of Materials Science **35**(20): 5187-5198.
- Tung, H.-A. and T. Vu-khanh (2007). influence du vieillissement thermo-oxydatif sur les comportements mécaniques du polychloroprène, Université de Sherbrooke, Quebec, Canada.
- Van Santvoort, G. P. T. M. (1994). Geotextiles and geomembranes in civil engineering. A.A. Balkema, Netherlands, Dutch Geotextile Organisation (NGO).
- Verdu, J. (2002). "Vieillissement Chimique des Plastiques: Aspects Généraux." In Techniques de l'ingénieur, traité plastiques et composites: 14 p.
- Wake, W. C. (1973). "adhesion science and tyres." Rubber Industry **7**(6): 242-251.
- Ward, I. M. and D. W. Hadley (1993). An Introduction to the Mechanical Properties of Solid Polymers, 348 pages, John Wiley & Sons; 1 edition, ISBN-10: 0471938874.
- Warner, S. B. (1995). "Fiber science." Prentice Hall, l'Université du Michigan.
- Witkowska, B. and I. Frydrych (2008). "Static tearing, part I: Its significance in the light of European standards." Textile Research Journal **78**(6): 510-517.
- Wong, J. S. S., D. Ferrer-Balas, R. K. Y. Li, Y. Mai, M. L. Maspoche et H. J. Sue (2003). "On tearing of ductile polymer films using the essential work of fracture (EWF) method." Acta Materialia **51**(16): 4929-4938.
- Wypych, J. (1988.). "Polymer Modified Textile Materials." New York: John Wiley & Sons.
- Zhong, W., N. Pan, et D. Lukas (2003). A Stochastic Approach on the Tear Behavior of Coated Fabrics with Interphase. 2003 ASME International Mechanical

Engineering Congress, November 15, 2003 - November 21, 2003, Washington, DC, United states, American Society of Mechanical Engineers.

Zuiderduin, W. C. J., C. Westzaan, L. Huetink et R. J. Gaymans (2003). "Toughening of polypropylene with calcium carbonate particles." Polymer **44**(1): 261-275.

Vu Thi BN (2004) Mécanique et mécanisme de la coupure des matériaux de protection. Ph.D. dissertation, Université de Sherbrooke, QC, Canada