

Prévention des risques mécaniques et physiques

Études et recherches

RAPPORT R-903



Résistance des matériaux de protection aux agresseurs mécaniques multiples Coupure et perforation simultanées

*Ennouri Triki
Phuong Nguyen-Tri
Meriam Azaiez
Toan Vu-Khanh
Chantal Gauvin*



Solidement implanté au Québec depuis 1980, l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) est un organisme de recherche scientifique reconnu internationalement pour la qualité de ses travaux.

NOS RECHERCHES

travaillent pour vous !

Mission

Contribuer, par la recherche, à la prévention des accidents du travail et des maladies professionnelles ainsi qu'à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes;

Assurer la diffusion des connaissances et jouer un rôle de référence scientifique et d'expertise;

Offrir les services de laboratoires et l'expertise nécessaires à l'action du réseau public de prévention en santé et en sécurité du travail.

Doté d'un conseil d'administration paritaire où siègent en nombre égal des représentants des employeurs et des travailleurs, l'IRSST est financé par la Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail.

Pour en savoir plus

Visitez notre site Web ! Vous y trouverez une information complète et à jour. De plus, toutes les publications éditées par l'IRSST peuvent être téléchargées gratuitement. www.irsst.qc.ca

Pour connaître l'actualité de la recherche menée ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement au magazine *Prévention au travail*, publié conjointement par l'Institut et la CNESST. Abonnement : preventionautravail.com

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales du Québec
2016
ISBN : 978-2-89631-861-2-0 (PDF)
ISSN : 0820-8395

IRSST - Direction des communications
et de la valorisation de la recherche
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : 514 288-1551
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca
© Institut de recherche Robert-Sauvé
en santé et en sécurité du travail,
Février 2016

Prévention des risques mécaniques et physiques

Études et recherches

RAPPORT R-903

Résistance des matériaux de protection aux agresseurs mécaniques multiples Coupure et perforation simultanées

Avis de non-responsabilité

L'IRSST ne donne aucune garantie relative à l'exactitude, la fiabilité ou le caractère exhaustif de l'information contenue dans ce document. En aucun cas l'IRSST ne saurait être tenu responsable pour tout dommage corporel, moral ou matériel résultant de l'utilisation de cette information.

Notez que les contenus des documents sont protégés par les législations canadiennes applicables en matière de propriété intellectuelle.

*Ennouri Triki, Phuong Nguyen-Tri,
Meriam Azaiez, Toan Vu-Khanh
École de technologie supérieure*

*Chantal Gauvin
IRSST*

Cliquez recherche
www.irsst.qc.ca



Cette publication est disponible
en version PDF
sur le site Web de l'IRSST.

ÉVALUATION PAR DES PAIRS

Conformément aux politiques de l'IRSST, les résultats des travaux de recherche publiés dans ce document ont fait l'objet d'une évaluation par des pairs.

REMERCIEMENTS

Les auteurs expriment leur reconnaissance à tous les membres du comité de suivi pour leur collaboration à la réalisation de cette étude. Nous remercions également les manufacturiers de gants de protection qui nous ont gracieusement fourni les échantillons nécessaires aux tests. Nous tenons aussi à souligner la participation de plusieurs personnes aux travaux présentés dans ce rapport : Radu Romanica, technicien à l'École de technologie supérieure (ÉTS), Pierre Drouin, technicien en mécanique, et Marianne Leroux, stagiaire, tous deux de l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST).

SOMMAIRE

Les lacérations de type perforation et coupure représentent une part importante des blessures aux mains dans plusieurs milieux de travail. Les agresseurs mécaniques comme la pointe d'un couteau, des échardes de métal, des pièces mal ébavurées ou des éclats de verre peuvent être très diversifiés et constituer des risques multiples. Le port de gants de protection contribue à réduire ces risques. Cependant, les gants n'offrent pas toujours une résistance adéquate pour tous les types d'agresseurs. Puisqu'il n'y a pas de corrélation entre les résistances à la coupure, à la perforation et à la piqûre, par exemple, un matériau peut être très résistant à un type d'agresseur mécanique et s'avérer très faible à un autre. Les travaux de recherche précédents, menés à l'IRSST, ont porté sur les phénomènes de coupure, de perforation, et plus récemment, de piqûre par des aiguilles médicales. Cependant, les mécanismes de perforation par un objet pointu et tranchant sont encore peu connus. Le manque d'information sur le processus combinant perforation et coupure, ainsi que l'absence de méthodes de caractérisation objective pour cette catégorie d'agresseurs, ne permet pas actuellement d'évaluer la protection qu'offrent les gants contre la perforation/coupure.

L'objectif principal de cette étude était d'étudier les aspects fondamentaux liés au comportement des matériaux de protection contre les agresseurs mécaniques multiples combinant la perforation et la coupure simultanément, afin de mettre au point une méthode d'essai objective pour caractériser la résistance à la perforation par un objet pointu et tranchant. Pour simuler un agresseur mécanique multiple, des tests expérimentaux de perforation par des lames pointues ont été réalisés sous différentes conditions. Les influences de la géométrie de la lame (angle à la pointe), des caractéristiques des matériaux (épaisseur, type de matériau) et des conditions expérimentales (vitesse de déplacement, lubrification et angle d'attaque de la lame, ainsi que la préextension de l'échantillon) sur la résistance à la perforation par une lame pointue ont été étudiées pour les membranes d'élastomère. Ces travaux de recherche ont analysé en détail les comportements des matériaux homogènes les plus utilisés dans la fabrication des gants de protection, soit les caoutchoucs néoprène, butyle et nitrile, ainsi que quelques modèles de gants de protection.

Les résultats ont montré que les mécanismes de perforation des membranes d'élastomère par des lames pointues impliquent un mode de rupture mixte, combinant le Mode I (par contrainte normale au plan de fissure) et le Mode III (par contrainte de cisaillement parallèle au plan de la fissure et au front de fissure). Ces mécanismes et les contributions respectives de ces modes de rupture sont différents de ceux mis en cause lors de la perforation par des aiguilles médicales ou par des sondes normalisées à bout arrondies. L'étude a également mis en évidence la contribution majeure de la friction entre la lame et le matériau lors du processus de la rupture. L'énergie de friction pour les matériaux testés est deux fois plus élevée que celle requise pour la rupture. Par conséquent, la résistance des matériaux à la perforation par une lame pointue est fortement affectée par la friction entre les gants utilisés et l'agresseur mécanique. Cette friction dépend notamment du milieu de travail, dont les activités peuvent requérir, par exemple, l'utilisation de divers lubrifiants.

Les influences de la géométrie de la lame, des caractéristiques des matériaux et des conditions expérimentales sur la résistance à la perforation par une lame pointue ont été étudiées. La force de pénétration complète diminue lorsque l'angle d'attaque entre le tranchant de la lame et

l'échantillon augmente, lorsque la lame est lubrifiée ou lorsque le matériau est en extension. Cette force de pénétration complète, fortement dépendante de la géométrie de la lame et de l'épaisseur de l'échantillon, ne représente pas un paramètre intrinsèque de la performance du matériau à la perforation/coupure.

Une méthode de caractérisation a donc été développée afin de permettre l'évaluation objective et quantitative de la résistance du matériau à la perforation et coupure combinées. Elle consistait à évaluer les énergies de rupture et de friction par unité de surface de la fissure créée à partir d'un test de perforation par une lame pointue. Les résultats ont démontré que l'énergie de rupture par unité de surface est indépendante des géométries de la lame et de l'échantillon, représentant ainsi une propriété intrinsèque du matériau et un paramètre objectif de la résistance à la perforation/coupure par des lames pointues. L'énergie de friction par unité de surface est aussi indépendante des géométries de la lame et de l'échantillon, mais varie en fonction du milieu environnant. Elle joue un rôle important dans la performance de protection du matériau et peut être considérée comme une propriété semi-intrinsèque qui représente les conditions en service de la perforation/coupure. Lorsque la friction est importante, elle contribue à augmenter la résistance de pénétration de la lame dans le matériau. Cependant, s'il y a présence de lubrifiant dans le milieu environnant, ce qui contribue à diminuer la friction, l'utilisation de matériaux plus performants tels ceux présentant une énergie de rupture par unité de surface (paramètre intrinsèque) plus élevée, devrait alors être considérée pour assurer un niveau de protection élevé.

Cette nouvelle approche de caractérisation a également été testée sur différents types de gants de protection ayant des compositions et épaisseurs différentes. Une méthode simplifiée, plus rapide et plus facilement réalisable, est donc proposée pour la caractérisation des gants de protection.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	i
SOMMAIRE.....	iii
LISTE DES FIGURES.....	vii
LISTE DES TABLEAUX.....	xi
LISTE DES ACRONYMES, SIGLES ET ABRÉVIATIONS.....	xiii
1. INTRODUCTION.....	1
1.1 Importance du sujet.....	1
1.2 Coupure, perforation et piqûre.....	2
1.3 Contexte scientifique.....	4
1.4 Objectifs et étapes du projet.....	4
2. MÉTHODES EXPÉRIMENTALES.....	7
2.1 Montage de perforation par une lame pointue.....	7
2.2 Matériaux.....	8
2.2.1 Membranes d'élastomère.....	8
2.2.2 Gants de protection.....	8
2.3 Caractéristiques des lames utilisées.....	10
2.4 Dispositifs expérimentaux.....	10
2.4.1 Perforation/coupure en présence de lubrifiant.....	10
2.4.2 Perforation/coupure du matériau sous précontrainte.....	11
2.4.3 Perforation/coupure du matériau avec la variation de l'angle d'attaque de la lame.....	12
2.4.4 Perforation/coupure du matériau avec la présence d'un support simulant la main.....	13
2.4.5 Détection du moment où la lame atteint la face inférieure de l'échantillon.....	14
2.5 Calcul de l'énergie de rupture.....	15
2.6 Mesure de la surface de rupture.....	16

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION.....	18
3.1 Processus de perforation/coupure des membranes d'élastomère.....	18
3.2 Forces caractéristiques.....	21
3.3 Comparaison des résultats de perforation obtenus avec une lame pointue, une sonde conique et une aiguille médicale.....	23
3.4 Comportement à la perforation/coupure des élastomères.....	24
3.5 Influence de la géométrie de la lame pointue et de l'épaisseur de l'échantillon	26
3.6 Influence des conditions d'utilisation en service.....	27
3.6.1 Effet de la présence de lubrifiant	27
3.6.2 Effet d'une préextension	28
3.6.3 Effet de la vitesse de déplacement de la lame pointue.....	29
3.6.4 Effet de l'angle d'attaque de la lame pointue	31
3.6.5 Effet d'un support simulant la main.....	32
3.7 Tests de perforation/coupure de certains gants de protection.....	34
3.7.1 Mesures en déformation libre et avec support	34
3.7.2 Comparaison des résultats de perforation obtenus avec une lame pointue, une sonde et une aiguille médicale	34
3.8 Développement d'une méthode de caractérisation quantitative à la perforation/coupure par une lame pointue.....	36
3.8.1 Faiblesse des méthodes existantes	36
3.8.2 Méthode de mesure en éliminant la friction	37
3.8.3 Nouvelle approche de caractérisation avec des énergies de rupture et de friction.....	40
3.8.4 Application de la méthode proposée sur les gants de protection	51
4. CONCLUSION.....	55
BIBLIOGRAPHIE	57
ANNEXE A : EFFET DE L'USURE DE LA LAME SUR LA PERFORATION DES GANTS DE PROTECTION.....	63

LISTE DES FIGURES

Figure 1	Photos de différents types d'agresseurs mécaniques : (a) pointe de couteau, (b) lame tranchante, (c) sonde de perforation, (d) aiguille médicale, reproduits de [13, 14, 15].3	3
Figure 2	Représentation schématique du montage d'essai de perforation par une lame pointue en déformation libre.7	7
Figure 3	Schéma du dispositif d'application du lubrifiant.11	11
Figure 4	Illustration d'un gant déformé par le mouvement de la main [15].12	12
Figure 5	Schéma du dispositif d'application de la préextension.12	12
Figure 6	Montage de perforation par une lame pointue selon différents angles d'attaque.13	13
Figure 7	Représentation schématique de la lame pointue selon différentes orientations du tranchant de la lame : a) en direction X, b) en direction -X, c) en direction Z.13	13
Figure 8	Montage de perforation par une lame pointue avec la présence d'un support simulant la main.14	14
Figure 9	Méthode de contact électrique avec une double feuille d'aluminium placée sous l'échantillon pour détecter l'instant où la pointe de la lame atteint la face inférieure de l'échantillon.14	14
Figure 10	Représentation schématique d'un test de chargement/déchargement pour caractériser la rupture d'un matériau pendant la perforation/coupure : a) positionnement de la lame à la surface de l'échantillon; b) et c) test de chargement et déchargement respectivement.15	15
Figure 11	Exemple de la courbe force-déplacement lors d'un test de chargement/déchargement, à deux valeurs différentes de déplacement, pour créer deux surfaces de rupture successives dans une membrane de néoprène de 1,6 mm d'épaisseur, lame pointue de 22,5°, vitesse de déplacement de 100 mm/min.16	16
Figure 12	Microscopie optique : a) test de perforation/coupure, b) échantillon entaillé, c) moitié d'échantillon sectionné avec l'entaille ouverte, d) microscope optique, e) surface de rupture avec un grossissement x 20.17	17
Figure 13	Exemple de la variation de la force appliquée en fonction du déplacement d'une lame pointue.18	18
Figure 14	a) Variation de la force appliquée en fonction du déplacement de la lame pointue de 22,5°, membrane de néoprène de 1,6 mm d'épaisseur, vitesse de déplacement de 100 mm/min, b) avancement schématique de la lame.19	19
Figure 15	Initiation de la fissure, membrane de néoprène de 1,6 mm d'épaisseur, lame pointue de 22,5° : a) variation de la force appliquée, b) image par microscopie optique de la surface de rupture.20	20

Figure 16	Propagation de la fissure, membrane de néoprène de 1,6 mm d'épaisseur, lame pointue de 22,5° : a) variation de la force appliquée, b) image par microscopie optique de la surface de rupture.	20
Figure 17	Contact de la lame avec la face inférieure de l'échantillon, membrane de néoprène de 1,6 mm d'épaisseur, lame pointue de 22,5° : a) variation de la force appliquée, b) image par microscopie optique de la surface de rupture.	21
Figure 18	Pénétration totale de l'échantillon sur toute la largeur de la lame, membrane de néoprène de 1,6 mm d'épaisseur, lame pointue de 22,5° : a) variation de la force appliquée, b) image par microscopie optique de la surface de rupture.....	21
Figure 19	Variation de la force appliquée en fonction du déplacement de la lame, lame pointue de 22,5°, membrane de néoprène de 1,6 mm d'épaisseur, avec la présence du contact électrique, pour trois vitesses de déplacement de la lame.	22
Figure 20	Valeurs de la force de pénétration complète et du déplacement correspondant, mesurées selon les méthodes de perforation par une sonde, une aiguille médicale et une lame pointue, néoprène de 1,6 mm d'épaisseur, vitesse de déplacement de 100 mm/min.	23
Figure 21	Variation de la force de pénétration complète par trois lames pointues (22,5°, 35° et 56°) avec une vitesse de déplacement de 250 mm/min dans trois élastomères.....	25
Figure 22	Diagramme de la distribution des forces dues à la perforation par une lame pointue.....	25
Figure 23	Force de pénétration complète en fonction de l'angle à la pointe de la lame pour différentes membranes d'élastomère de différentes épaisseurs, vitesse de déplacement de 250 mm/min.	26
Figure 24	Force de pénétration complète par les lames pointues de 22,5°, 35° et 56°, en fonction de l'épaisseur de l'échantillon pour différentes membranes d'élastomère, vitesse de déplacement de 250 mm/min.....	27
Figure 25	Force de pénétration complète avec et sans lubrifiant pour deux membranes de néoprène (1,6 et 3,2 mm) et une membrane de nitrile (1,6 mm), lame pointue de 35°, vitesse de déplacement de 50 mm/min.	28
Figure 26	Variation de la force de pénétration complète en fonction de l'étirement des membranes de nitrile de 0,4, 0,8 et 1,6 mm d'épaisseur, lame pointue de 35°, vitesse de déplacement de 250 mm/min.	29
Figure 27	Variation de la force de pénétration complète dans une membrane de nitrile de 1,6 mm, en fonction de la vitesse de déplacement d'une lame pointue lubrifiée de 22,5°	30

Figure 28	Variation de la force de pénétration complète dans une membrane de néoprène de 1,6 mm, en fonction de la vitesse de déplacement d'une lame pointue non lubrifiée de 35°.....	30
Figure 29	Force de pénétration complète en fonction de l'angle d'inclinaison du matériau pour des orientations du tranchant de la lame dans les directions X, -X et Z, néoprène de 1,6 mm d'épaisseur, lame pointue de 35°, vitesse de déplacement de 250 mm/min.	31
Figure 30	Variation de la force de pénétration complète en fonction de l'angle d'attaque, obtenu avec des lames pointues de 35°et de 56° orientées selon les directions X et -X, pour des membranes de néoprène d'épaisseur 1,6 et 3,2 mm, vitesse de déplacement de 250 mm/min.	32
Figure 31	Force de pénétration complète en fonction de la dureté du support simulant la main, membranes de néoprène de 0,4, 1,6 et 3,2 mm d'épaisseur, lame pointue de 35°, vitesse de déplacement de 250 mm/min.	33
Figure 32	Force de pénétration complète en fonction de la dureté du support simulant la main, pour les trois membranes d'élastomère de 1,6 mm d'épaisseur, lame pointue de 35°, vitesse de déplacement de 250 mm/min.	33
Figure 33	Forces de pénétration complète obtenues avec et sans support pour une sélection de gants de protection, lame pointue de 35°, vitesse de déplacement de 250 mm/min.	34
Figure 34	Variation de l'énergie de perforation/coupure par unité de surface P en fonction du taux d'énergie de déformation par unité de surface T , membranes de néoprène de 1,6 mm d'épaisseur, lames pointues de 22,5° et 35°, vitesse de déplacement de 100 mm/min.	39
Figure 35	Représentation schématique de la nouvelle approche pour caractériser la rupture du matériau et la friction entre la lame et le matériau pendant la perforation/coupure : a) positionnement de la lame à la surface de l'échantillon; b) et c) test de chargement/déchargement; d) et e) test de friction par la réinsertion de la lame dans la surface de rupture créée.....	40
Figure 36	Exemple des courbes force-déplacement issues d'un test de chargement/déchargement, suivi d'un test de friction sur une membrane de néoprène avec une lame pointue de 22,5°.....	41
Figure 37	Variation de l'énergie de rupture globale en fonction du déplacement d'une lame pointue de 22,5°, 35° et 56°, membrane de néoprène de 1,6 mm d'épaisseur, vitesse de déplacement de 100 mm/min.....	42
Figure 38	Variation de l'énergie de friction globale en fonction du déplacement d'une lame pointue de 22,5°, 35° et 56°, membrane de néoprène de 1,6 mm d'épaisseur, vitesse de déplacement de 100 mm/min.....	42
Figure 39	Relation quadratique de la surface de rupture A avec la profondeur de pénétration de la lame d dans la membrane.	43

Figure 40	Variation de l'énergie de rupture globale en fonction du déplacement de la lame pointue de 56°, avec et sans présence d'un lubrifiant, membrane de néoprène de 1,6 mm d'épaisseur, vitesse de déplacement de 100 mm/min.	44
Figure 41	Variation de l'énergie de friction globale en fonction du déplacement de la lame pointue de 56°, avec et sans présence d'un lubrifiant, membrane de néoprène de 1,6 mm d'épaisseur, vitesse de déplacement de 100 mm/min.	44
Figure 42	Variation de l'énergie de rupture globale en fonction de la surface de rupture, membrane de néoprène de 1,6 mm d'épaisseur, lames pointues de 22,5°, 35° et 56°, vitesse de déplacement de 100 mm/min.....	46
Figure 43	Variation de l'énergie de friction globale en fonction de la surface de rupture, membrane de néoprène de 1,6 mm d'épaisseur, lames pointues de 22,5°, 35° et 56°, vitesse de déplacement de 100 mm/min.....	46
Figure 44	Variation de l'énergie de rupture globale en fonction de la surface de rupture, membranes de nitrile de 1,6 et 3,2 mm d'épaisseur, lame pointue de 35°, vitesse de déplacement de 100 mm/min.	47
Figure 45	Variation de l'énergie de friction globale en fonction de la surface de rupture, membranes de nitrile de 1,6 et 3,2 mm d'épaisseur, lame pointue de 35°, vitesse de déplacement de 100 mm/min.	48
Figure 46	Variation de l'énergie de rupture globale en fonction de la surface de rupture avec et sans présence d'un lubrifiant, néoprène de 1,6 mm d'épaisseur, lames pointues de 22,5°, 35° et 56°, vitesse de déplacement de 100 mm/min.	49
Figure 47	Variation de l'énergie de friction globale en fonction de la surface de rupture avec et sans présence d'un lubrifiant, néoprène de 1,6 mm d'épaisseur, lames pointues de 22,5°, 35° et 56°, vitesse de déplacement de 100 mm/min.	50
Figure 48	Variations des énergies globales de rupture et de friction en fonction de la surface de rupture, lames pointues de 22,5°, 35° et 56°, vitesse de sollicitation de 100 mm/min, gants de protection Ansell Hycron 27-805.	52
Figure 49	Variations des énergies globales de rupture et de friction en fonction de la surface de rupture, trois types de lame pointue, vitesse de sollicitation de 100 mm/min, gants Mapa Chem-Ply 414, 0,75 mm d'épaisseur.....	53
Figure 50	Effet de l'usure de la lame sur la force de pénétration complète pour trois matériaux : Gant Superior Touch S13SXPUQ, Gant Ansell 8-352 et trois couches de SuperFabric®, lame pointue de 35°, vitesse de déplacement de 250 mm/min.	63

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Caractéristiques des élastomères utilisés.	8
Tableau 2	Caractéristiques des gants de protection utilisés.....	9
Tableau 3	Caractéristiques des lames pointues utilisées.	10
Tableau 4	Forces de perforation complète (F) par une sonde (sonde B de la méthode ASTM F1342-05), par une aiguille médicale 25G, et par une lame pointue de 35°, pour une sélection de gants de protection.....	35
Tableau 5	Énergies de rupture par la piqûre avec et sans lubrifiant, pour trois diamètres d’aiguilles médicales (23G, 25G et 28G) et deux matériaux (membrane de néoprène 1,6 mm et gant en nitrile 0,8 mm) (vitesse de déplacement de la sonde de 50 mm/min, écart-type entre parenthèses) [15].....	43
Tableau 6	Énergies de rupture et de friction par unité de surface du néoprène et du nitrile.	48
Tableau 7	Énergies de rupture et de friction par unité de surface du néoprène de 1,6 mm d’épaisseur, avec et sans présence de lubrifiant.	49
Tableau 8	Énergies de rupture associées à la perforation par une lame pointue, à la piqûre par une aiguille et à la coupure par une lame tranchante, pour du néoprène de 1,6 mm d’épaisseur.....	50
Tableau 9	Moyennes (écarts-type) des énergies globales de rupture et de friction par unité de surface des gants Mapa Chem-Ply 414, 0,75 mm d’épaisseur.....	53
Tableau 10	Moyenne (écart-type) de l’énergie totale, de la surface de rupture et de l’énergie totale par unité de surface, gants Ansell Hyflex 11-601 et 11-900, vitesse de sollicitation de 100 mm/min.....	54
Tableau 11	Caractéristiques des gants de protection utilisés pour évaluer l’effet de l’usure de la lame sur la perforation.	63

LISTE DES ACRONYMES, SIGLES ET ABRÉVIATIONS

CSST	Commission de la santé et de la sécurité du travail
IRSST	Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail
ASTM	ASTM International, anciennement connu sous le nom de American Society for Testing and Materials
ISO	Organisation internationale de normalisation (International Organization for Standardization)
ÉTS	École de technologie supérieure
G	Taux de restitution d'énergie totale
P	Énergie de perforation et coupure combinées
T	Énergie de préextension ou de déchirure
G_F	Énergie de friction globale
G_R	Énergie de rupture globale
ΔU	Changement de l'énergie de déformation
ΔA	Changement de la surface de rupture
U	Énergie de déformation
A	Surface de rupture créée par une lame pointue
l_o	Longueur initiale d'un échantillon
l	Longueur d'un échantillon après étirement
W_t	Énergie emmagasinée lors d'un test de traction d'un échantillon sans préfissure
W	Énergie emmagasinée lors d'un test de traction d'un échantillon avec préfissure
t	Épaisseur de l'échantillon
S_e	Densité d'énergie emmagasinée
λ	Allongement du matériau
β	Facteur numérique qui dépend de λ
C_1 et C_2	Coefficients de Mooney-Rivlin
d	Profondeur de la pénétration de la lame
F_t	Force de rupture d'un échantillon sans préfissure
F	Force de rupture d'un échantillon avec préfissure
A_0	Surface de rupture d'un échantillon sans préfissure
θ	Angle de la pointe de la lame

1. INTRODUCTION

1.1 Importance du sujet

Les blessures aux poignets, aux mains et aux doigts, dont plus du tiers sont des lacérations de type perforation et coupure [1, 2], représentent 18,4 % de l'ensemble des lésions avec perte de temps indemnisée par la Commission de la santé et de la sécurité du travail (CSST), et des débours de 279 millions de dollars pour les années 2009–2011 [2]. Dans certains secteurs d'activité, notamment dans les secteurs de la fabrication d'aliments, de machines, de vêtements, de meubles et de produits (métalliques, textiles, de plastique, en bois), ce pourcentage est plus élevé, variant de 25 à 39 % [2].

Le port de gants de protection contribue à réduire les risques de lacération et de perforation. Des études ont estimé que ces risques pouvaient être diminués de 60 à 70 % dans un grand nombre de milieux de travail [3, 4]. Une diminution des risques de 80 % a même été constatée dans des abattoirs en Australie, à la suite de la mise en place d'un programme préventif visant à encourager le port de gants en maille d'acier offrant une meilleure protection contre la coupure [5].

En milieu professionnel, les risques mécaniques sont très souvent de sources multiples, c.-à-d. qu'il y a présence à la fois de risques de coupure (lame, pièce métallique mal ébavurée par exemple) et de risques de perforation (clou, outil pointu, etc.). Les risques mécaniques peuvent également être de sources combinées, comme la pointe d'un couteau, des échardes de métal ou des éclats de verre, qui représentent à la fois un risque de coupure et un risque de perforation. Dans l'industrie de la viande ou du poisson par exemple, de nombreuses blessures causées par l'utilisation des couteaux ont été rapportés [6, 7]. De manière générale, tous les secteurs qui font usage d'outils manuels pointus et coupants ou qui manipulent des pièces coupantes sont exposés à des risques mécaniques multiples, par exemple le secteur alimentaire, le domaine manufacturier, l'usinage, etc.

Le fait de ne pas porter de gants au moment de l'accident, associé à d'autres éléments tels que la réalisation de tâches inhabituelles, une distraction, ou des contraintes de temps, demeure l'une des principales causes de blessures aux mains. Selon certaines études [3, 4, 8], 70 à 80 % des travailleurs ayant subi des blessures aux mains n'étaient pas munis de gants de protection lors de l'accident. Pour ceux qui portaient des gants, on mentionne que leurs blessures aux mains étaient causées, entre autres, par le port de gants qui étaient soit inadéquats, ou bien endommagés, ou encore non adaptés aux risques présents [8]. Bien que plusieurs gants offrent une protection contre les risques de coupure ou de perforation, il peut être parfois difficile d'allier ces deux propriétés à la fois. Par exemple, deux études réalisées dans le secteur de la transformation de la viande indiquent que les travailleurs ne portaient pas les gants de protection recommandés, en partie parce qu'ils considèrent que ces gants, bien que résistants aux coupures, sont peu efficaces contre les piqûres [9] ou les coups de couteau [5]. Les matériaux de gants offrant une bonne résistance à la perforation ne présentent pas nécessairement une bonne résistance à la coupure, et vice-versa, en raison de l'absence de corrélation entre les deux processus de rupture [10, 11].

L'amélioration des performances des gants de protection passe notamment par le développement de méthodes d'essai normalisées. Plusieurs travaux de recherche, menés conjointement par

l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) et l'École de technologie supérieure (ÉTS), ont porté sur la caractérisation de la résistance des gants de protection face aux différents types d'agresseurs mécaniques et sur la compréhension des phénomènes de coupure par une lame tranchante [12, 13], de perforation par une sonde [13, 14] et de piqûre par une aiguille médicale [15]. Ces travaux ont contribué à l'élaboration de méthodes d'essai normalisées pour mesurer différentes propriétés des matériaux utilisés dans la fabrication des vêtements et des gants de protection, telles que les méthodes ASTM F1790 [16] et ISO 13997 [17] pour la résistance à la coupure, ASTM F1342 [18], ISO 13996 [19] et EN 388 [20] pour la résistance à la perforation par des sondes à bout arrondi, ainsi que la méthode ASTM F2878 [21] pour la résistance à la piqûre par des aiguilles médicales. Les résultats de ces travaux ont également permis de déterminer les meilleurs matériaux pour la conception de gants plus performants et offrant des niveaux de résistance plus adéquats [15, 22, 23].

Dans les études précédentes, les agresseurs mécaniques impliquant un seul mode de rupture (lame tranchante, sonde, ou aiguille) ont été considérés de manière individuelle. Les mécanismes de rupture (coupure, perforation, piqûre) ont été étudiés séparément pour chaque agresseur et les paramètres caractérisant la résistance du matériau à chacun de ces modes de rupture ont été analysés. Dans la présente étude, la perforation et la coupure combinées, créées simultanément lors de la rupture par un même agresseur mécanique, seront prises en compte.

1.2 Coupure, perforation et piqûre

Les projets de recherche sur les phénomènes de coupure [12, 13], de perforation [13, 14], et de piqûre [15], ont essentiellement porté sur les différents processus de rupture qui caractérisent chacun de ces agresseurs mécaniques. Ainsi, dans le cas d'une coupure par tranchage, il a été révélé que la plus grande partie de l'énergie dépensée pour couper est absorbée par la friction entre la lame et le matériau [13, 24]. Cette contribution de la friction se décompose elle-même en deux phénomènes : celui de la friction de l'arête tranchante de la lame, et celui de la friction des surfaces latérales de la lame avec le matériau coupé. Ces deux contributions de la friction ont des effets opposés sur la résistance à la coupure d'un matériau.

Pour la perforation des membranes en caoutchouc par une sonde conique à bout arrondi, il a été démontré que ce mécanisme de rupture est gouverné par un taux maximal de déformation locale du matériau, qui est un paramètre intrinsèque de celui-ci [14, 25]. Un modèle de rupture a été formulé et des corrélations ont été obtenues entre les données expérimentales de perforation et le modèle proposé [25].

En ce qui concerne le phénomène de piqûre par les aiguilles hypodermiques, un type d'agresseur mécanique constitué d'un cylindre creux dont l'extrémité est une pointe biseautée au bord coupant, l'étude [15] a notamment permis la mise en place d'une méthode d'essai pour mesurer la résistance des matériaux de protection à la piqûre par les aiguilles. Ceci a contribué à l'élaboration et à l'approbation d'une méthode d'essai normalisée ASTM [21]. Un modèle analytique a aussi été conçu pour décrire le phénomène de piqûre dans les élastomères, incluant des contributions importantes de la coupure et de la friction [26, 27]. Ce modèle permet de déterminer l'énergie de rupture associée à la pénétration par les aiguilles médicales [27] sans friction, ce qui est une propriété intrinsèque du matériau.

En revanche, la question des mécanismes de perforation et de coupure qui interviennent simultanément en cas de pénétration par des lames pointues est restée, quant à elle, peu explorée. Hormis quelques résultats expérimentaux sur quelques matériaux, les aspects fondamentaux de la rupture par une lame pointue sont encore inconnus. Xinglong et coll. [28] ont étudié la rupture par un coup de couteau de différentes couches de tissu en fibre aramide (Kevlar®) en se basant sur le calcul de l'énergie d'impact et la profondeur de pénétration du couteau dans le matériau. Les résultats obtenus montrent que la résistance à la perforation/coupure est fortement dépendante de la friction interfils et du nombre de couches de tissu. L'augmentation du nombre de couches fait croître l'énergie d'impact sur le textile et diminuer la profondeur de pénétration.

Une analyse par éléments finis, portant également sur la rupture des tissus en Kevlar® par un couteau, a été menée par Wang et coll. [29]. Cette étude montre, d'une part, que la force de pénétration du couteau dans le tissu dépend de la rigidité des fils et de la friction entre les fils, et d'autre part, que les mécanismes de perforation par une lame pointue provoquent une rupture en cisaillement des fibres.

Dans une autre étude sur la mécanique et les processus de rupture par coup de couteau des matériaux composites, présentée par Ankersen [30], un modèle a été conçu en utilisant la méthode des éléments finis afin de quantifier la force de pénétration nécessaire au coup de couteau pour rompre le matériau. Des tests d'impact par une lame pointue ont été nécessaires afin d'avoir un aperçu de la nature et du type de problème à modéliser. Ces résultats expérimentaux montrent que la force de pénétration dépend fortement de la géométrie de la pointe de la lame. Une corrélation indirecte a également été constatée entre la résistance à la pénétration de la lame et la résistance à la traction du matériau. Il est suggéré que la résistance à la rupture est le résultat, d'une part, de la force de coupure et, d'autre part, de la force de cisaillement des fibres.

En termes de performance à la coupure par tranchage, à la perforation par une sonde et à la piqûre par une aiguille, des gants enduits et des membranes de polymère ont montré des niveaux de protection très différents pour chaque type d'agresseur (Figure 1) et aucune corrélation entre ces performances n'a été observée [31]. La géométrie de lame pointue, qui combine à la fois coupure et perforation, suggère donc un cas plus complexe des risques mécaniques multiples combinant plusieurs modes simultanés dans un même processus de rupture.

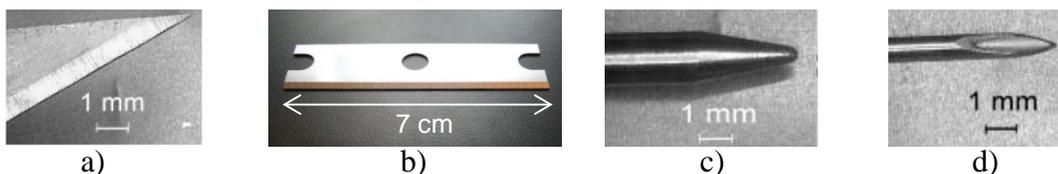


Figure 1 Photos de différents types d'agresseurs mécaniques : (a) pointe de couteau, (b) lame tranchante, (c) sonde de perforation, (d) aiguille médicale, reproduits de [13, 14, 15].

1.3 Contexte scientifique

Les études réalisées antérieurement ont montré que la rupture des polymères, à la fois en déformation et en contrainte planes, peut être gouvernée par deux énergies caractéristiques liées à l'initiation et à la propagation de la fissure [32-35]. Ces approches peuvent être utilisées afin de mieux comprendre les mécanismes de rupture des membranes d'élastomère combinant la coupure et la perforation. Par ailleurs, la rupture créée par la combinaison d'une perforation et d'une coupure pourrait impliquer un mode de rupture mixte se manifestant par des contraintes de cisaillement et une contrainte normale au plan de fissure. La contribution de ces contraintes pourrait varier en fonction de la géométrie de l'agresseur mécanique, et affecter la performance de protection du matériau. La contribution de la friction, dont l'importance a été révélée lors des investigations sur le phénomène de coupure [13, 36-38], est aussi un paramètre majeur devant être analysé en détail.

Certains paramètres liés à la sollicitation mécanique ou associés à des conditions d'utilisation en service, tels que la vitesse de déplacement de la lame, la forme et la dimension du tranchant de la lame, la présence d'un lubrifiant, la préextension du gant porté par la main, ou la variation de l'angle d'attaque de la lame pointue, peuvent avoir une influence sur les mécanismes de rupture en jeu et sur les performances. Ces paramètres peuvent affecter la force maximale pour percer le matériau, les énergies d'amorçage et de propagation de la fissure, la friction entre le matériau et la lame, etc. Les méthodologies développées dans le cadre des projets de recherche antérieurs [13, 14, 15] sont utilisées dans la présente étude.

1.4 Objectifs et étapes du projet

Les objectifs de ce projet sont:

- 1) d'étudier, de manière expérimentale (à partir de tests en laboratoire) et théorique (à partir d'un modèle de calcul de l'énergie de rupture basé sur la théorie de la mécanique de la rupture), les différents aspects liés à l'interaction des matériaux de protection, en particulier les élastomères, avec les sollicitations simultanées de perforation et de coupure (perforation/coupure);
- 2) de proposer une méthode de caractérisation quantitative appropriée de la résistance des matériaux de gants aux agresseurs mécaniques multiples.

La perforation/coupure des gants de protection, notamment les gants en textiles enduits d'une couche d'élastomère, est généralement complexe. De ce fait, cette étude a été réalisée en différentes étapes. Dans un premier temps, des analyses expérimentales et théoriques ont été effectuées pour déterminer et décrire les mécanismes en jeu lors de l'interaction d'une lame pointue avec uniquement la couche d'élastomère. Pour ce faire, des essais mécaniques simulant la perforation/coupure combinées ont été réalisés sur différents élastomères, avec différentes géométries de lame et sous différentes conditions. L'effet de divers paramètres sur la résistance à la perforation/coupure combinées a été étudié, tels que la géométrie de la pointe de la lame, l'angle d'attaque, la vitesse de déplacement et la lubrification des lames, de même que l'épaisseur du matériau, la préextension de l'échantillon, et la présence d'un support simulant la main. Ensuite, des tests de perforation/coupure ont été pratiqués sur certains modèles de gants de

protection. Une comparaison du comportement de ces gants soumis à des agresseurs mécaniques de types coupure, perforation et perforation/coupure combinées a été réalisée.

Dans un deuxième temps, une méthode de caractérisation objective et quantitative, permettant de déterminer les propriétés intrinsèques qui gouvernent la perforation/coupure, a été élaborée. Cette méthode a été définie pour les élastomères, puis testée avec quelques modèles de gants de protection. Finalement, en se basant sur les résultats obtenus, une méthode simplifiée et plus facile à réaliser pour les gants de protection a aussi été proposée.

2. MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

2.1 Montage de perforation par une lame pointue

Pour simuler la perforation et la coupure combinées, un montage permettant de réaliser des tests de perforation par des lames pointues a été utilisé. Ce montage est similaire à celui employé dans plusieurs travaux précédents [13, 15, 39], et conforme à la méthode d'essai normalisée ASTM F1342-05 [18]. L'échantillon est fixé entre deux plaques d'acier contenant chacune un trou d'un diamètre de 38 mm, comme illustré à la Figure 2, permettant à l'échantillon de se déformer librement durant l'essai. Ce porte-échantillon est placé sur le bâti d'une machine de traction MTS-alliance. La lame pointue est maintenue par un manche de couteau de type X-Acto, qui a été modifié afin de pouvoir être fixé à une cellule de charge de 25 N, elle-même fixée à la partie mobile de la machine de traction.

Durant l'essai, la lame se déplace vers le bas à une vitesse constante et pénètre dans l'échantillon. La vitesse de déplacement est imposée et peut avoir une valeur entre 5 et 500 mm/min, selon les besoins. Cette méthode de perforation/coupure correspond donc à l'application d'un déplacement à vitesse contrôlée constante, plutôt que sur l'application d'une force constante. La force subie par la lame pour perforez le matériau est enregistrée pour chaque test.

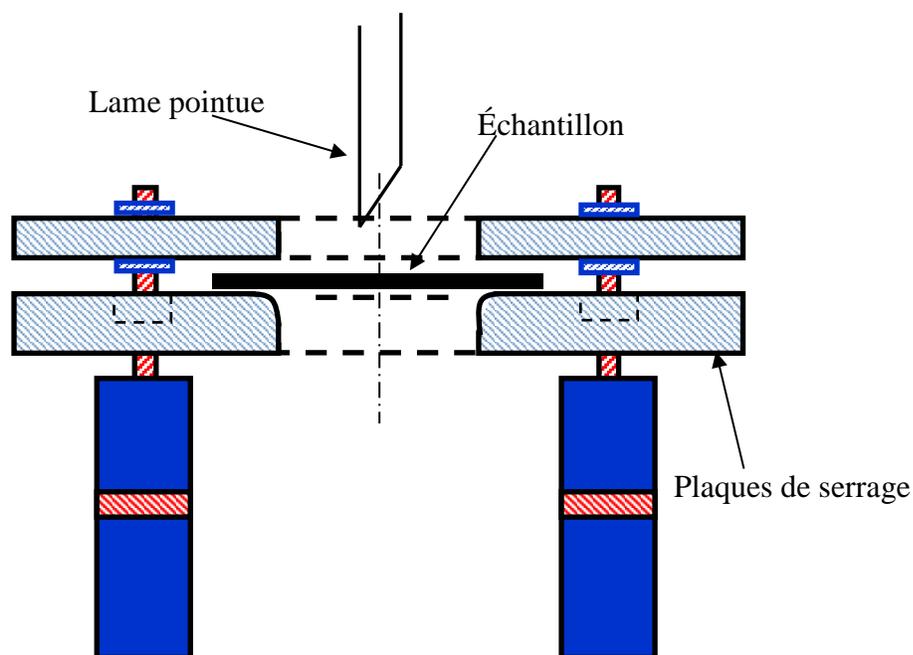


Figure 2 Représentation schématique du montage d'essai de perforation par une lame pointue en déformation libre.

2.2 Matériaux

2.2.1 Membranes d'élastomère

Des feuilles relativement homogènes de butyle, de néoprène et de nitrile, de différentes épaisseurs (Tableau 1), ont été utilisées pour étudier les aspects fondamentaux de la perforation/coupure combinées afin de développer une méthode de caractérisation objective et quantitative de la résistance des matériaux à la perforation par une lame pointue. Ces trois types de matériaux sont employés largement dans la fabrication des gants de protection en polymère non renforcés, et aussi comme enduit dans les gants renforcés. Les feuilles d'élastomère ont été fournies par McMaster-Carr.

Tableau 1 Caractéristiques des élastomères utilisés.

Matériaux	butyle	néoprène	nitrile
Épaisseur (mm)		0,4	0,4
	0,8	0,8	0,8
	1,6	1,6	1,6
	3,2	3,2	3,2

2.2.2 Gants de protection

Conçus avec des membranes ou un enduit d'élastomère, différents modèles de gants de protection (Tableau 2), avec ou sans renfort textile, ont été utilisés pour évaluer l'applicabilité des méthodes de perforation par une lame pointue. Tous ces gants sont disponibles sur le marché pour être utilisés dans différents milieux de travail. Les gants renforcés sont formés par un tricot enduit d'une couche d'élastomère pour améliorer son niveau de protection. Les gants non renforcés, généralement utilisés comme protection contre les risques chimiques, comprennent seulement une couche d'élastomère. Les échantillons utilisés pour les tests ont été prélevés dans la paume des gants.

Tableau 2 Caractéristiques des gants de protection utilisés.

Modèle	Image	Description
Ansell Hyflex 11-501		Tricot Intercept Technology™, paume enduite de mousse nitrile sarcelle
Ansell Hyflex 11-900		Paume enduite de mousse nitrile doublée en tricot de nylon
Ansell Neox 9-022		Doublure de tricot en coton enduit de néoprène, très épais
Ansell Neox 9-912		Doublure de tricot en coton enduit de néoprène
Ansell Edmont 15-552		Tricot en coton, enduit de néoprène et PVC
Best NSK 24		Jersey en coton/polyester, enduit de nitrile
Best 724R		Tricot coton, PVC renforcé avec enduction nitrile.
Best 4811		Tricot de Kevlar®, enduit de PVC
Warwick Mill OPS 003		TurtleSkin® composé d'un tissage très fin de fibres d'aramide
HexArmor 9005		SuperFabric® (1 couche) et tricot, enduit de polyuréthane
Ansell Hycron 27-805		Gant entièrement enduit de nitrile, support jersey de coton
Mapa Chem-Ply 414		Superposition de deux couches de néoprène
Ansell Hyflex 11-601		Paume enduite de polyuréthane, doublure en tricot de nylon

2.3 Caractéristiques des lames utilisées

Trois modèles de lames pointues (Tableau 3) ont été utilisés comme sondes de perforation. Le choix de ces lames était basé sur le fait qu'en plus d'être de géométrie simple, elles sont disponibles en trois angles de pointe de moins de 90° afin de simuler les agresseurs mécaniques multiples. Les lames ont servi pour cinq tests avant d'être jetées de manière sécuritaire et remplacées. Cette durée utile de cinq tests par lame a été déterminée à la suite de l'analyse de l'effet de l'usure de la lame, présentée à l'annexe A.

Tableau 3 Caractéristiques des lames pointues utilisées.

Géométrie	Modèle	Angle à la pointe (°)
	X-Acto, modèle X211	22,5
	X-Acto, modèle X224	35
	X-Acto, modèle X219	56

2.4 Dispositifs expérimentaux

L'analyse de la résistance à la perforation par une lame pointue a été effectuée à l'aide de la mesure de la force de pénétration. Au contraire des méthodes d'essai normalisées, les énergies dégagées par les mécanismes de rupture ont également été calculées. Cette résistance à la perforation a été analysée en fonction de la vitesse de déplacement de la lame (entre 5 et 500 mm/min), de l'épaisseur de l'échantillon (Tableau 1) et de la géométrie de la lame pointue (Tableau 3). Le calcul des énergies impliquées dans les mécanismes de rupture a nécessité la mesure de la surface de rupture créée lors d'un test de perforation/coupure. Pour la perforation/coupure des membranes d'élastomère, un minimum de cinq répliques a été réalisé. Dans le cas des gants supportés, de composition plus hétérogène, un minimum de 12 répliques a été effectué. À partir de ces répliques, les valeurs moyennes de la résistance à la perforation/coupure et les écarts-type ont été calculés.

Des tests ont également été réalisés avec différentes conditions simulant les situations réelles d'utilisation : avec la présence d'un lubrifiant, sur des échantillons sous précontraintes, sur des échantillons orientés selon différents angles par rapport à la lame, et avec un support simulant la présence de la main.

2.4.1 Perforation/coupure en présence de lubrifiant

Le contact entre les contaminants (solvants et lubrifiants) et les gants de protection est inévitable dans plusieurs milieux de travail, comme dans le secteur de l'usinage de métaux où l'on retrouve très souvent des huiles ou des fluides de coupe. Ces types de contaminant peuvent diminuer la friction entre la lame et le gant. Comme il a été démontré dans des études précédentes que la friction affecte grandement la performance de protection des gants [13, 24], une diminution de la

friction par la présence d'un lubrifiant peut, par conséquent, avoir un effet sur la rupture du matériau.

Pour évaluer l'effet de la présence de lubrifiant, la lame a été trempée dans une huile, IRM 901 (Compagnie : Calumet lubricants Co., viscosité cinématique de 231 cSt), telle qu'illustrée à la Figure 3. Après le trempage, l'huile utilisée commence à s'écouler vers le bas. Le test de perforation/coupure doit commencer après l'arrêt de l'écoulement de l'huile. Ces étapes nous assurent une mince couche d'huile quasiment uniforme. La répétabilité des résultats confirme cette uniformité (voir Figure 25). Comme chaque lame était utilisée à cinq reprises et que le lubrifiant sur la lame pouvait être éliminé, sous l'effet de la pression latérale exercée par le matériau sur les deux faces de la lame, les lames ont été trempées à nouveau avant chaque test de perforation/coupure.

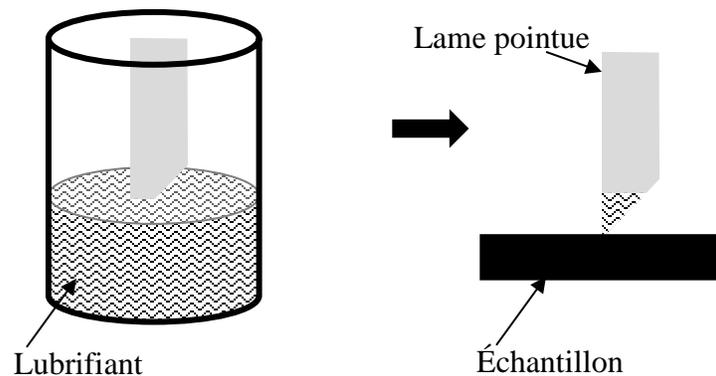


Figure 3 Schéma du dispositif d'application du lubrifiant.

2.4.2 Perforation/coupure du matériau sous précontrainte

Lorsque portés, les gants de protection peuvent être soumis à des déformations causées par le mouvement de la main, notamment par une extension du dos du gant au niveau des articulations des doigts. Par exemple, un taux de déformation de 80 % a été obtenu au niveau des jointures de la main sur un gant de latex bien ajusté [15] (Figure 4). Cette déformation peut influencer la friction entre la lame et le matériau, et ainsi engendrer un effet sur la résistance à la perforation/coupure du matériau.

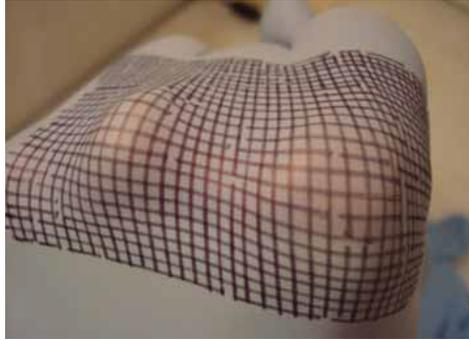


Figure 4 Illustration d'un gant déformé par le mouvement de la main [15].

Le montage présenté à la Figure 5 a été utilisé pour déterminer la variation de la résistance à la perforation/coupure des plaques d'élastomère en fonction d'une préextension appliquée au matériau. Il s'agit du même système que celui employé dans l'étude sur l'effet de la préextension sur la résistance à la piqûre par une aiguille médicale [15]. Dans ce montage, l'échantillon est soumis à une déformation unidirectionnelle, perpendiculaire à l'axe du déplacement et à la surface de la lame. L'évaluation de cet effet de la préextension a été faite sur des échantillons étirés selon différents taux de déformation variant de 0 à 200 %.

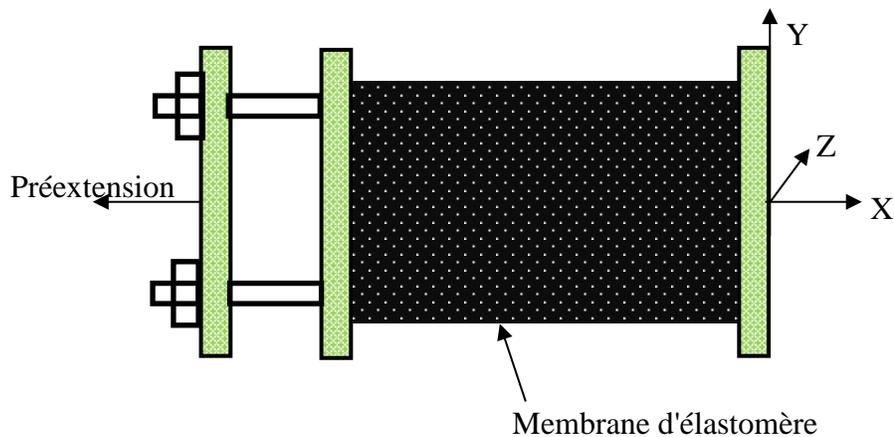


Figure 5 Schéma du dispositif d'application de la préextension.

2.4.3 Perforation/coupure du matériau avec la variation de l'angle d'attaque de la lame

Le contact entre la lame et le gant de protection se produit souvent à des orientations autres que celle à 90° (comme c'est le cas pour le montage de la Figure 2). Pour simuler différents angles d'attaque, le porte-échantillon a été incliné par rapport à l'horizontale à des angles de 0° , 3° , 5° , 8° et 11° (Figure 6). De plus, la lame a été orientée selon trois directions différentes: le tranchant de la lame en direction X (Figure 7a), le tranchant en direction -X (Figure 7b), et le tranchant en direction Z (Figure 7c). Ainsi, lorsque l'angle d'inclinaison du porte-échantillon augmente,

l'angle d'attaque, qui est l'angle entre le tranchant de la lame et le matériau, diminue si le tranchant est dans la direction X, augmente si le tranchant est en direction -X, et reste constant si le tranchant est dans la direction Z.

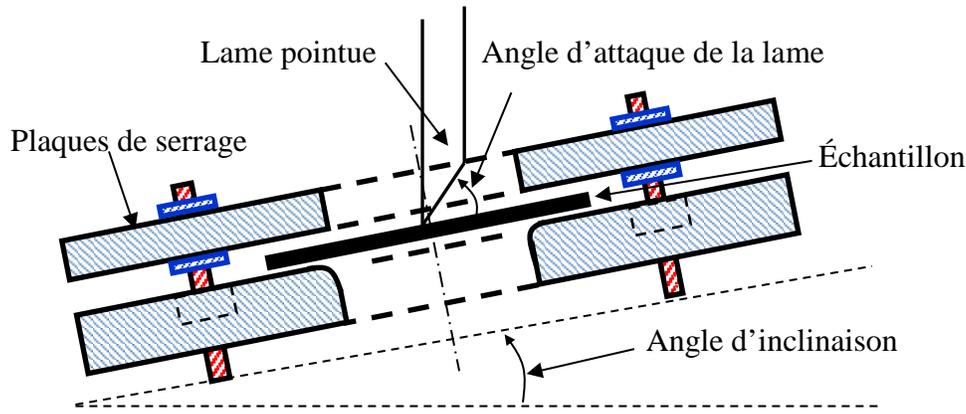


Figure 6 Montage de perforation par une lame pointue selon différents angles d'attaque.

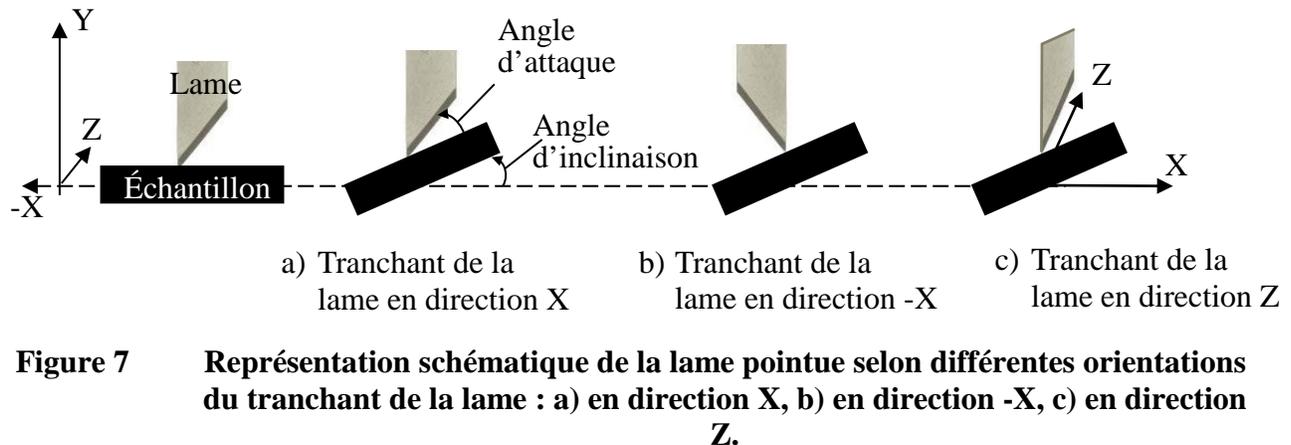


Figure 7 Représentation schématique de la lame pointue selon différentes orientations du tranchant de la lame : a) en direction X, b) en direction -X, c) en direction Z.

2.4.4 Perforation/coupure du matériau avec la présence d'un support simulant la main

Afin d'évaluer l'effet de la présence de la main sur le mécanisme de perforation par une lame pointue, des tests de perforation/coupure ont été réalisés en utilisant des blocs en néoprène comme socle à l'échantillon à tester (Figure 8). Les blocs en néoprène, d'épaisseur de 6,3 mm, avaient des duretés de 10, 30 et 50 Shore A (McMaster-Carr). Les valeurs de dureté pour la main, rapportées dans la littérature, sont estimées à 20 Shore A pour la section ventrale des doigts, et 50 Shore A pour la section dorsale des doigts [40]. Une feuille d'aluminium a été fixée entre le support et l'échantillon pour détecter le moment exact où celui-ci sera totalement perforé (voir section 2.4.5).

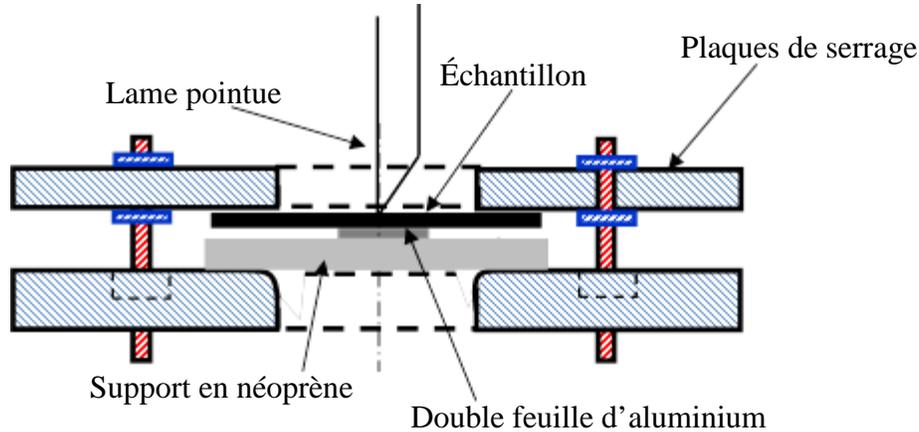


Figure 8 Montage de perforation par une lame pointue avec la présence d'un support simulant la main.

2.4.5 Détection du moment où la lame atteint la face inférieure de l'échantillon

Pour détecter l'instant précis où la pointe de la lame atteint la face inférieure de l'échantillon, une double feuille d'aluminium, d'épaisseur de 0,005 mm (Figure 9), a été placée sous l'échantillon. La double feuille d'aluminium et la lame sont connectées à un boîtier électronique par deux fils fins qui envoient un signal au système d'acquisition de données lorsqu'il détecte un contact électrique entre la lame et l'aluminium. Ce contact électrique est également enregistré en fonction du déplacement de la lame, ce qui permet la synchronisation avec la mesure de la force enregistrée lors d'un test.

La double feuille d'aluminium a été collée avec du ruban adhésif sous l'échantillon, lorsqu'utilisée pour des tests de perforation/coupe en déformation libre, ou sur le support de néoprène sous l'échantillon, lorsqu'utilisée pour des tests de perforation/coupe simulant la présence de la main. Ce type de dispositif a été utilisé dans des travaux précédents [41, 42].

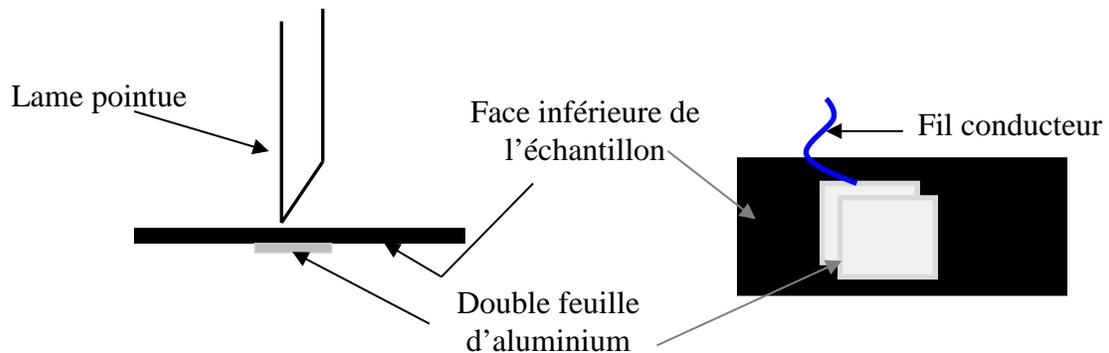


Figure 9 Méthode de contact électrique avec une double feuille d'aluminium placée sous l'échantillon pour détecter l'instant où la pointe de la lame atteint la face inférieure de l'échantillon.

2.5 Calcul de l'énergie de rupture

Théoriquement, la rupture d'un matériau nécessite la création d'une nouvelle surface dans sa structure. Le calcul de l'énergie de rupture des matériaux, présentant un comportement mécanique intrinsèque non linéaire, a été développé par Rivlin et Thomas [43]. Dans un corps sous sollicitation mécanique, l'énergie disponible G pour faire avancer une fissure (l'énergie restituée par unité de surface) est appelée le taux de restitution d'énergie, et il est exprimé par :

$$G = -\left(\frac{\partial U}{\partial A}\right) \approx \Delta U / \Delta A \quad \text{Équation 1}$$

où ΔU est le changement de l'énergie de déformation de l'échantillon créé par le changement de la surface de rupture ΔA dans l'échantillon. Le calcul de ces deux paramètres, ΔU et ΔA , peut se faire à partir de tests de chargement/déchargement de la lame pointue dans le matériau (Figure 10), afin de mesurer la variation de l'énergie dissipée en fonction du déplacement de la lame. Pour chaque progression des états ij de la fissure, le changement de l'énergie de déformation ΔU_{ij} et le changement de la surface de rupture ΔA_{ij} sont respectivement donnés par :

$$\Delta U_{ij} = U_j - U_i \quad \text{Équation 2}$$

$$\Delta A_{ij} = A_j - A_i \quad \text{Équation 3}$$

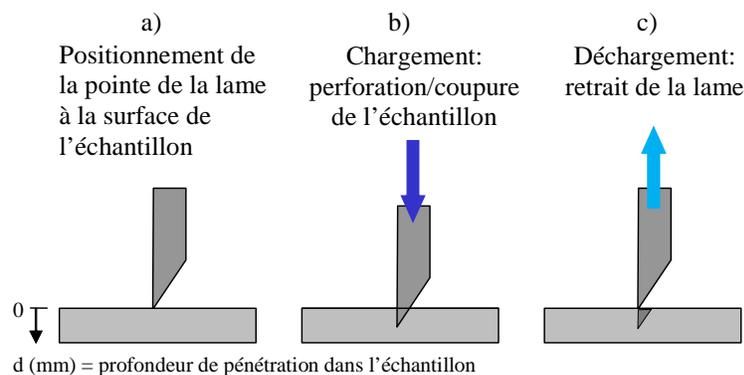


Figure 10 Représentation schématique d'un test de chargement/déchargement pour caractériser la rupture d'un matériau pendant la perforation/coupure : a) positionnement de la lame à la surface de l'échantillon; b) et c) test de chargement et déchargement respectivement.

Les indices i et j peuvent, par exemple, représenter les numéros de tests de perforation/coupure à deux différentes distances de déplacement de la lame (Figure 11). Pour chaque échantillon contenant une surface de rupture A_i , l'énergie de déformation élastique U_i est calculée à partir de l'aire sous la courbe force-déplacement :

$$U_i = \int_0^l F \cdot dl \quad \text{Équation 4}$$

L'énergie de rupture par unité de surface, telle que celle associée à la rupture par une lame pointue, est une propriété intrinsèque d'un matériau.

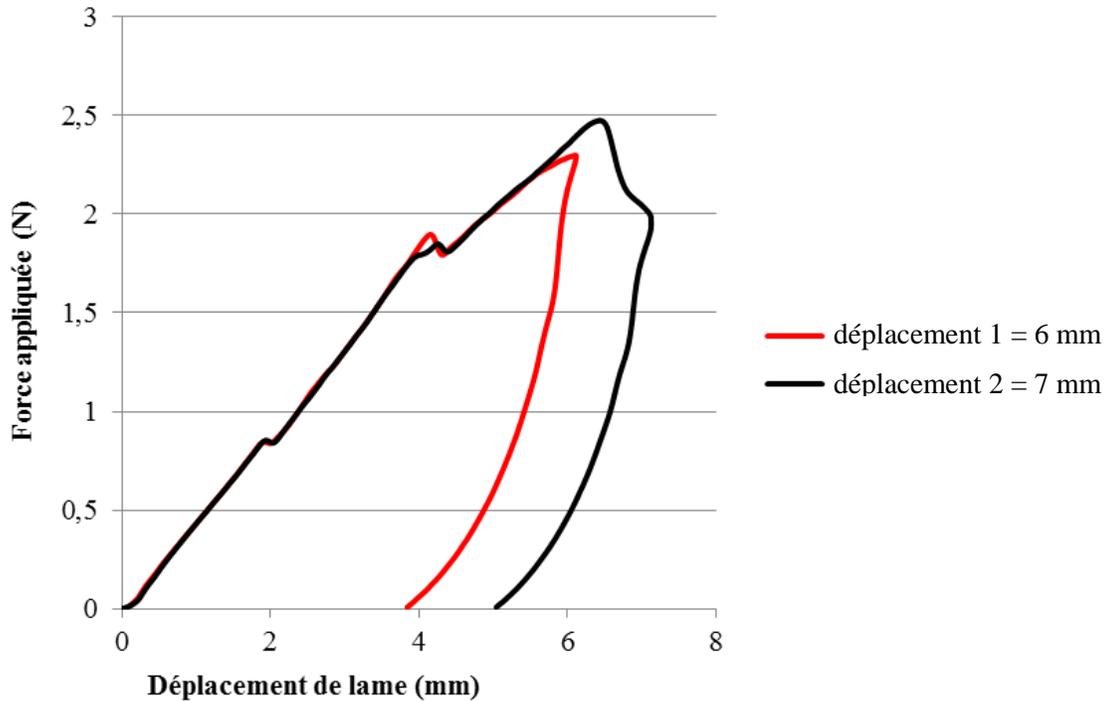


Figure 11 Exemple de la courbe force-déplacement lors d'un test de chargement/déchargement, à deux valeurs différentes de déplacement, pour créer deux surfaces de rupture successives dans une membrane de néoprène de 1,6 mm d'épaisseur, lame pointue de 22,5°, vitesse de déplacement de 100 mm/min.

2.6 Mesure de la surface de rupture

Pour comprendre le processus de perforation/coupure et pour évaluer les énergies impliquées dans les mécanismes de rupture, les surfaces de rupture créées à la suite des tests de perforation/coupure ont pu être mesurées par microscopie optique en suivant les étapes indiquées à la Figure 12. Tout d'abord, la surface de rupture, sous forme d'une entaille, est créée lors de la perforation/coupure d'un échantillon par la lame pointue (Figure 12a). L'échantillon est ensuite séparé en deux parties selon le plan de l'entaille (Figure 12b) ce qui permet de rendre visible la surface de rupture créée. Finalement, la surface de l'entaille ouverte, sous forme triangulaire comme illustrée dans la Figure 12c, est mesurée par microscopie optique (Figures 10d et e).

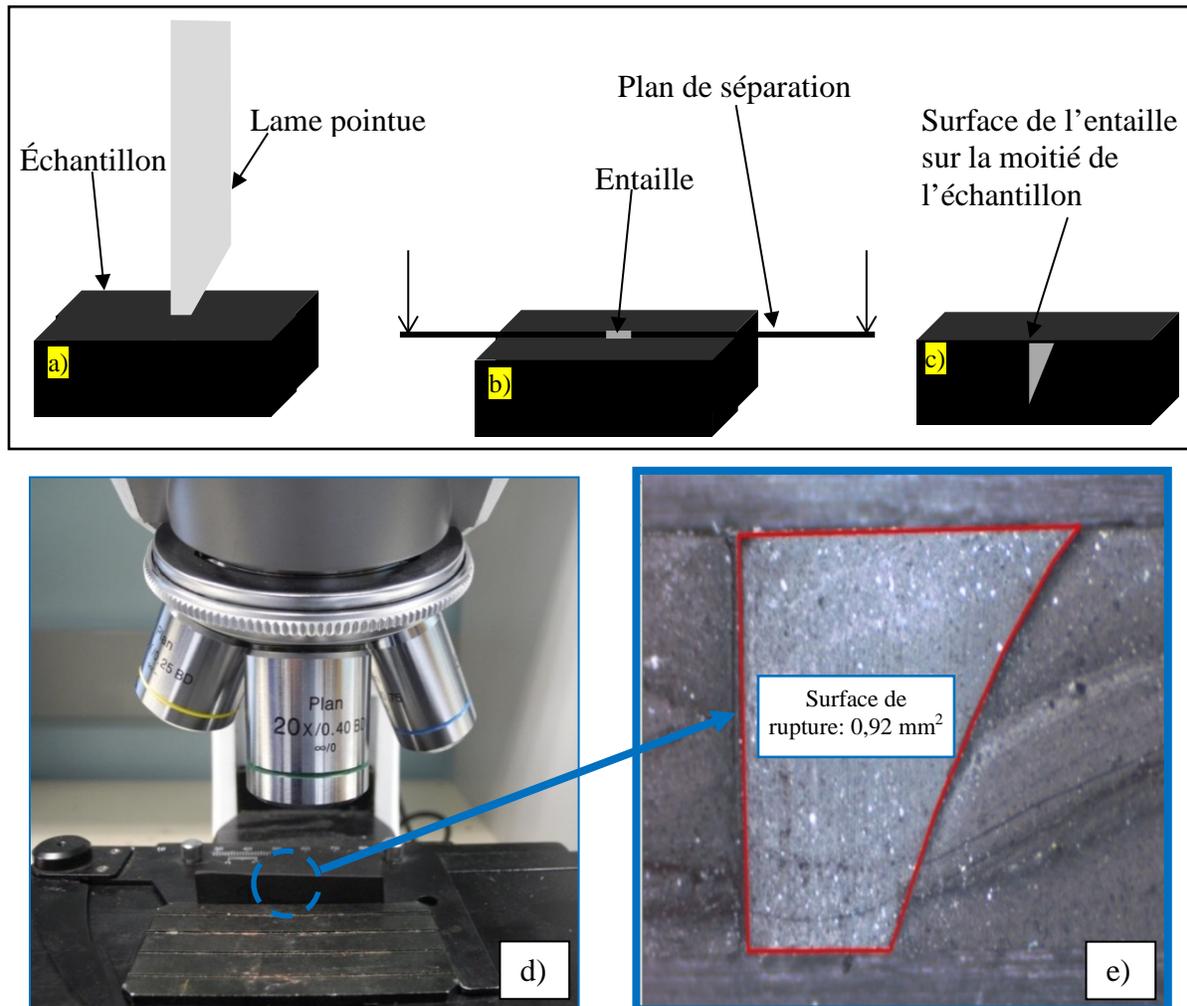


Figure 12 Microscopie optique : a) test de perforation/coupure, b) échantillon entaillé, c) moitié d'échantillon sectionné avec l'entaille ouverte, d) microscope optique, e) surface de rupture avec un grossissement x 20.

3. RÉSULTATS ET DISCUSSION

3.1 Processus de perforation/coupure des membranes d'élastomère

La Figure 13 montre un exemple typique des informations obtenues lors d'un test de perforation/coupure par une lame pointue, réalisé selon la méthode en déformation libre (voir Figure 2). La courbe enregistrée montre la variation de la force appliquée en fonction du déplacement de la lame pendant la perforation et la coupure combinées. On peut voir que la force appliquée augmente au fur et à mesure que la lame pointue pénètre à travers le matériau. Cette courbe indique plusieurs pics successifs et atteint un plafond maximal pour de grands déplacements de la lame.

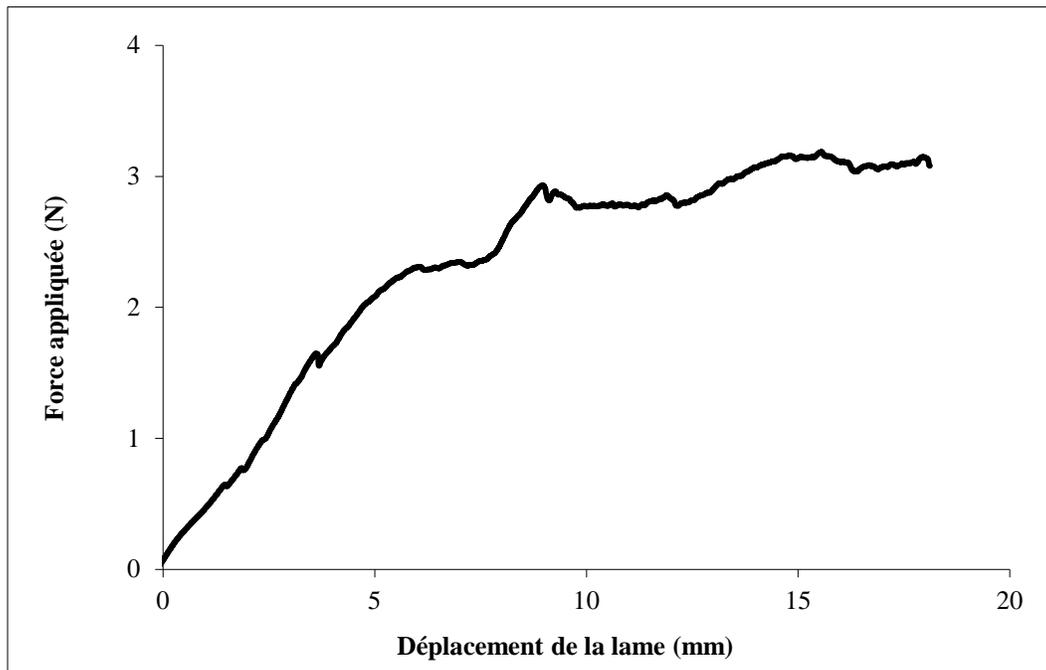


Figure 13 Exemple de la variation de la force appliquée en fonction du déplacement d'une lame pointue.

Afin de mieux comprendre les mécanismes de perforation/coupure par une lame pointue, une analyse approfondie a été faite à partir des courbes force-déplacement enregistrées pendant des tests de perforation/coupure en déformation libre d'un échantillon de néoprène de 1,6 mm d'épaisseur par une lame de 22,5° se déplaçant à une vitesse de 100 mm/min. Des tests successifs ont été effectués à des valeurs spécifiques de déplacement de la lame, de manière à avoir une pénétration partielle et graduelle de la lame dans l'épaisseur du matériau. Ils ont été effectués avec une seule lame, mais à des endroits différents sur l'échantillon de néoprène. Les étapes de pénétration de la lame ont été déterminées à partir de ces tests successifs, puis validées par observation microscopique de la surface de rupture créée par la lame.

La Figure 14a présente la courbe force-déplacement enregistrée pendant le test jusqu'à la perforation complète de l'échantillon de néoprène. Cette courbe présente trois pics liés à la pénétration de la lame pointue à travers l'échantillon (pic n°1, n°2 et n°3), et trois segments (0-1,

1-2 et 2-3) qui montrent les augmentations continues de la force appliquée avec le déplacement de la lame. La Figure 14b illustre, étape par étape, le processus de pénétration de la lame pointue dans l'échantillon. Les Figures 13 à 16 présentent en détail les différentes étapes et décrivent les caractéristiques de la perforation/coupure par une lame pointue que sont la déformation de la membrane et la friction entre le matériau et la lame pointue.

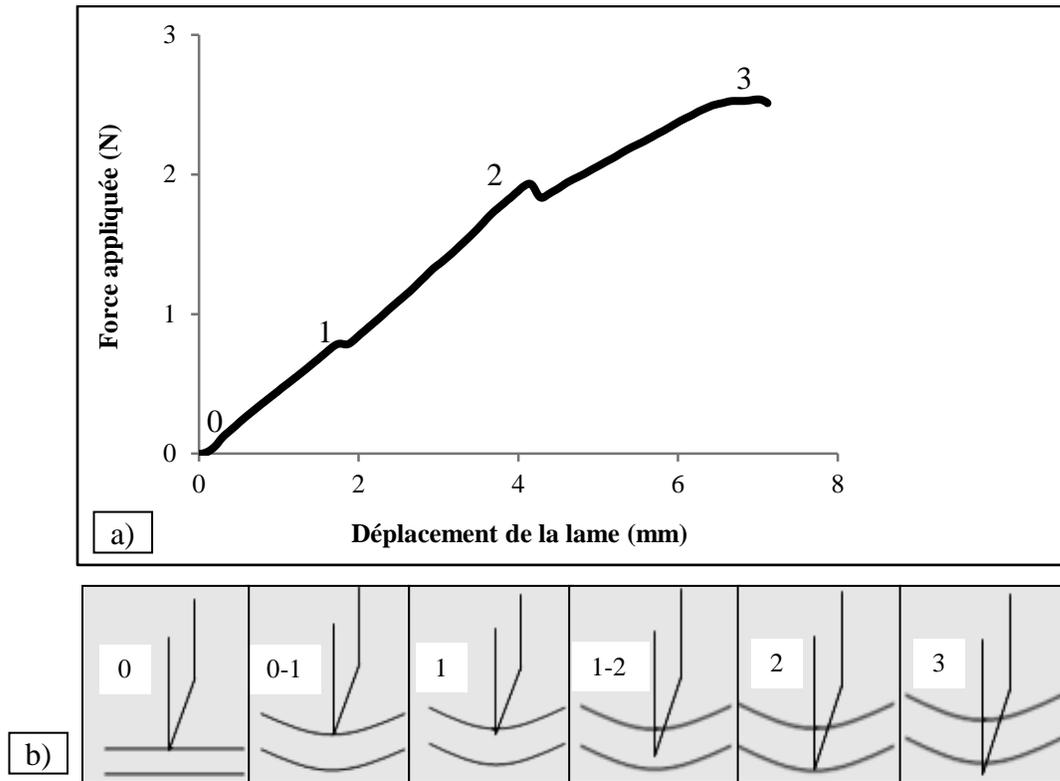


Figure 14 a) Variation de la force appliquée en fonction du déplacement de la lame pointue de 22,5°, membrane de néoprène de 1,6 mm d'épaisseur, vitesse de déplacement de 100 mm/min, b) avancement schématique de la lame.

À la position 0, la lame se trouve en contact avec l'échantillon, mais sans exercer de force sur le matériau. La première partie de la courbe (0-1) est une zone étendue qui représente le comportement élastique du matériau (Figure 15a). Durant cette étape, la lame exerce une déformation sur le matériau sans le pénétrer. À la position 1, correspondant au premier pic, le bout de la lame commence à pénétrer dans l'échantillon. Ce point correspond à l'initiation de la propagation d'une fissure à la surface de l'échantillon. La Figure 15b montre la surface de rupture créée dans l'échantillon par la lame. À partir de la position 1, la friction entre la lame et le matériau entre en jeu jusqu'à la pénétration totale de la lame dans l'échantillon.

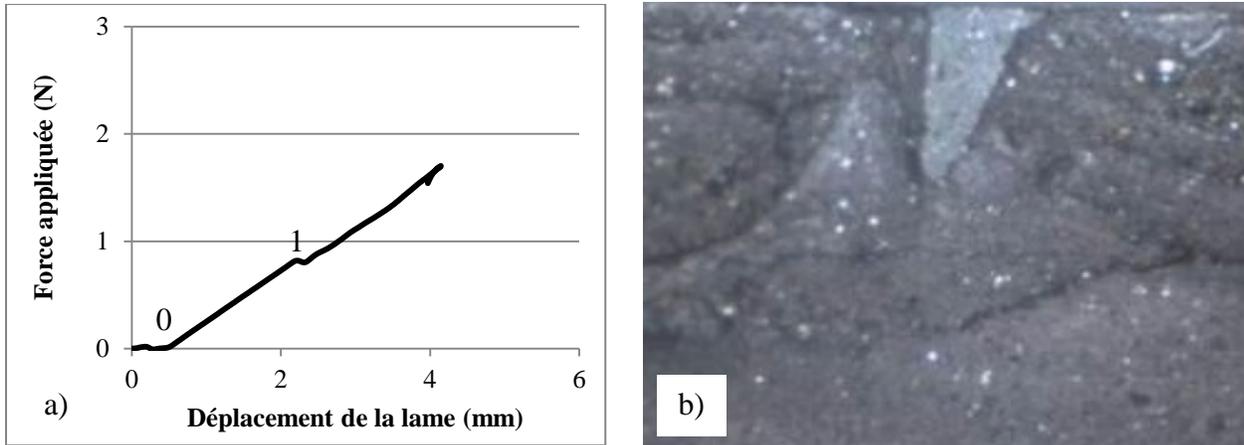


Figure 15 Initiation de la fissure, membrane de néoprène de 1,6 mm d'épaisseur, lame pointue de 22,5° : a) variation de la force appliquée, b) image par microscopie optique de la surface de rupture.

Entre les deux positions, 1 et 2, la lame pointue continue sa pénétration dans le matériau. La force augmente en fonction de la pénétration de la lame (Figure 16a). La fissure (créée par la lame) poursuit sa propagation dans l'échantillon (Figure 16b). À cette étape, la lame n'a pas encore atteint la position 2 (Figure 17a) et n'est pas encore en contact avec la face inférieure de la membrane. La friction entre le matériau et la lame est toujours présente et contribue à l'augmentation de la force de pénétration.

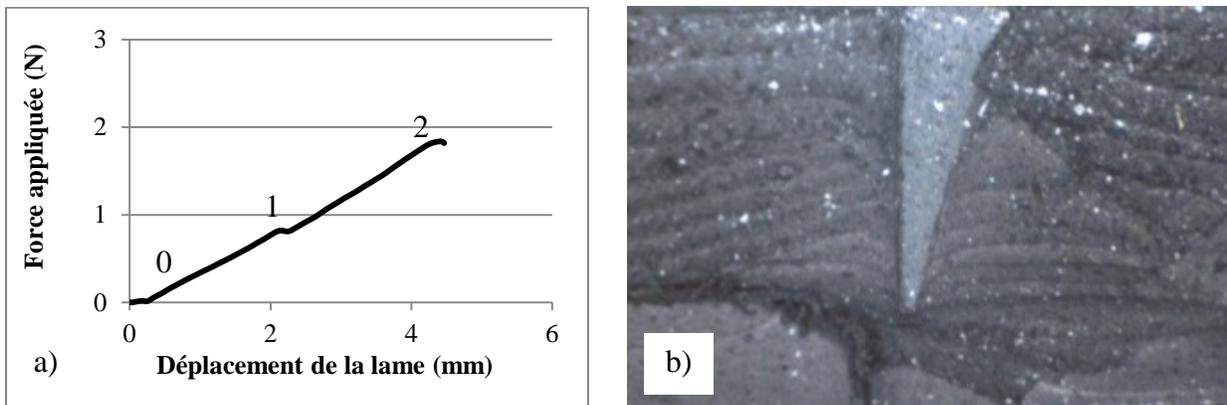


Figure 16 Propagation de la fissure, membrane de néoprène de 1,6 mm d'épaisseur, lame pointue de 22,5° : a) variation de la force appliquée, b) image par microscopie optique de la surface de rupture.

À la position 2, la lame se trouve en contact avec la face inférieure de l'échantillon (Figure 14b). À partir de cette position ($\approx 1,95$ N à la Figure 14a), la lame traverse complètement la face inférieure de la membrane. Ensuite, la force appliquée continue son augmentation (Figure 17a). Le phénomène de rupture en jeu est toujours associé à un processus de perforation et coupure combinées.

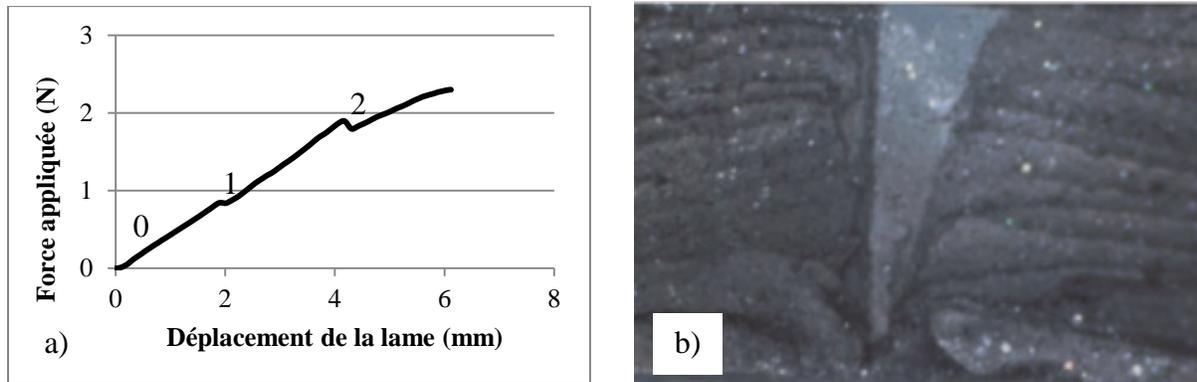


Figure 17 Contact de la lame avec la face inférieure de l'échantillon, membrane de néoprène de 1,6 mm d'épaisseur, lame pointue de 22,5° : a) variation de la force appliquée, b) image par microscopie optique de la surface de rupture.

Dès qu'une partie de la largeur de la lame commence à traverser le matériau (Figure 18b), la force appliquée est maximale (position 3, Figure 18a). À la position 3, la lame poursuit sa pénétration à travers le matériau. À ce stade, seules les forces associées à la coupure par le tranchant de la lame contribuent à la rupture du matériau.

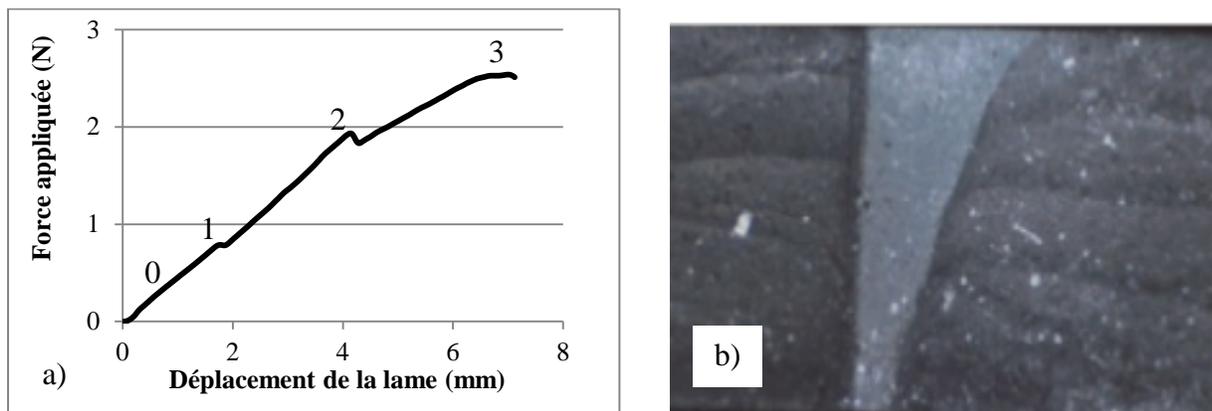


Figure 18 Pénétration totale de l'échantillon sur toute la largeur de la lame, membrane de néoprène de 1,6 mm d'épaisseur, lame pointue de 22,5° : a) variation de la force appliquée, b) image par microscopie optique de la surface de rupture.

3.2 Forces caractéristiques

Dans les méthodes d'essai normalisées actuelles pour mesurer la résistance à la perforation et à la piqûre [18-21], la force maximale enregistrée lors des tests est généralement utilisée pour caractériser la résistance des matériaux et classer leur niveau de protection. Cependant, pour le cas de la perforation par une lame pointue, les observations montrent qu'il n'est pas approprié d'utiliser la force maximale comme critère de performance, car, à cette force, toute la partie

tranchante du bout de la lame a déjà traversé la face inférieure de la membrane. Du point de vue de la protection, lorsque la pointe de la lame atteint la face inférieure de l'échantillon (position 2 de la Figure 14), toute la protection offerte est franchie. Il est donc plus logique de considérer la force à cette position pour la caractérisation de la résistance à la perforation/coupure par une lame pointue que la force maximale, puisqu'elle correspond à une pénétration complète de la membrane en tant que matériau de protection. Il est important de souligner qu'à cette position, un pic n'est pas toujours observable. Plusieurs essais sur différentes membranes ont montré que, dans plusieurs cas, la force de pénétration augmente continuellement sans aucun changement quand la pointe de la lame traverse la face inférieure de l'échantillon. Il est donc essentiel de pouvoir déterminer ce moment avec précision. Pour y parvenir, une double couche d'aluminium est retenue sous l'échantillon avec un ruban adhésif (voir Figure 9).

Des tests de perforation/coupure en déformation libre par une lame de $22,5^\circ$ avec la présence de la double feuille d'aluminium ont été réalisés sur une membrane de néoprène de 1,6 mm d'épaisseur avec trois vitesses de sollicitation de 5, 100 et 500 mm/min. La valeur de la force correspondant à une pénétration complète peut être obtenue en superposant la courbe force-déplacement avec le signal du contact électrique (Figure 19). Les résultats sont montrés pour les trois vitesses de déplacement de la lame pointue. Avec cette technique, la valeur de la force de pénétration complète peut être déterminée avec une bonne précision.

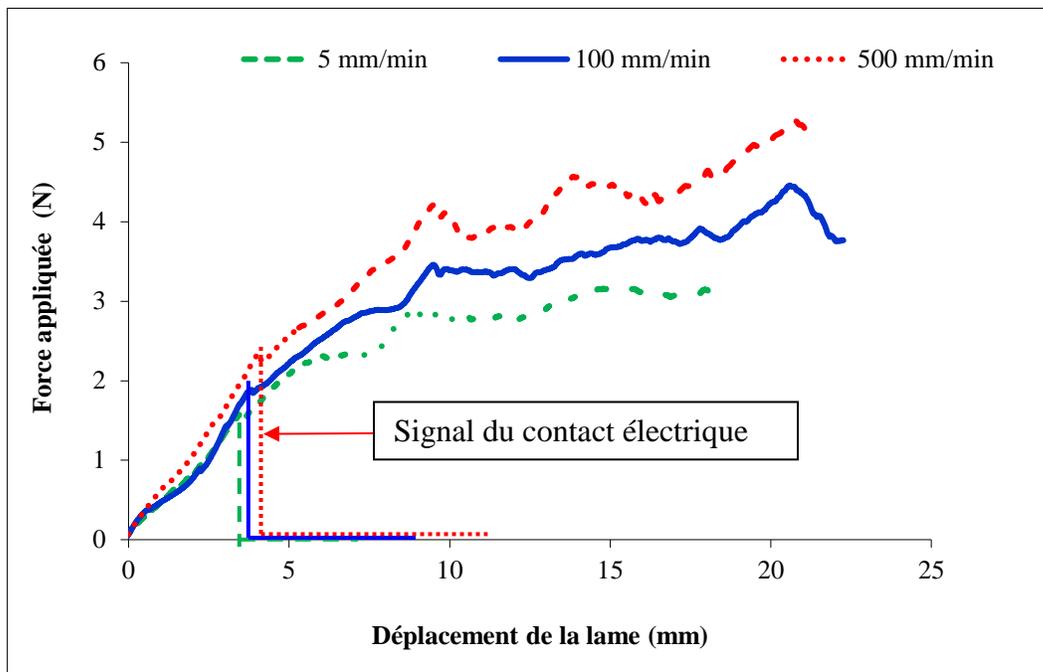


Figure 19 Variation de la force appliquée en fonction du déplacement de la lame, lame pointue de $22,5^\circ$, membrane de néoprène de 1,6 mm d'épaisseur, avec la présence du contact électrique, pour trois vitesses de déplacement de la lame.

3.3 Comparaison des résultats de perforation obtenus avec une lame pointue, une sonde conique et une aiguille médicale

Cette section examine la corrélation des performances entre la perforation par des lames pointues, par des sondes coniques et par des aiguilles médicales. Les valeurs de la force de pénétration complète ont été mesurées selon la méthode en déformation libre avec détection de contact tel que discuté plus haut. La Figure 20 présente une comparaison des valeurs de cette force de pénétration complète, et du déplacement correspondant, pour une feuille de néoprène de 1,6 mm d'épaisseur, avec : une sonde conique (2 mm de diamètre, extrémité arrondie avec un rayon de 0,25 mm, correspondant à la sonde de type A de la méthode d'essai ASTM F1342-05 [18]), une aiguille médicale hypodermique à trois facettes (calibre 23G, 0,65 mm de diamètre), et une lame pointue de 35°. La vitesse de sollicitation est de 100 mm/min dans les trois cas. Les valeurs présentées pour la sonde conique et l'aiguille ont été tirées de Vu-Khanh et coll. [15].

Les résultats obtenus montrent que les valeurs de la force de pénétration complète de l'aiguille et de la lame pointue sont plus faibles que celles de la sonde conique (Figure 20). La valeur du déplacement de l'agresseur mécanique est également réduite d'environ 70 % pour l'aiguille et la lame pointue. La force de pénétration complète par la lame pointue est approximativement le double de celle obtenue avec l'aiguille médicale. Cependant, les déplacements correspondants de l'aiguille et de la lame sont très proches. Ces résultats suggèrent que les mécanismes de perforation/coupure par une lame pointue sont différents de ceux de la perforation par une sonde conique ou par une aiguille médicale.

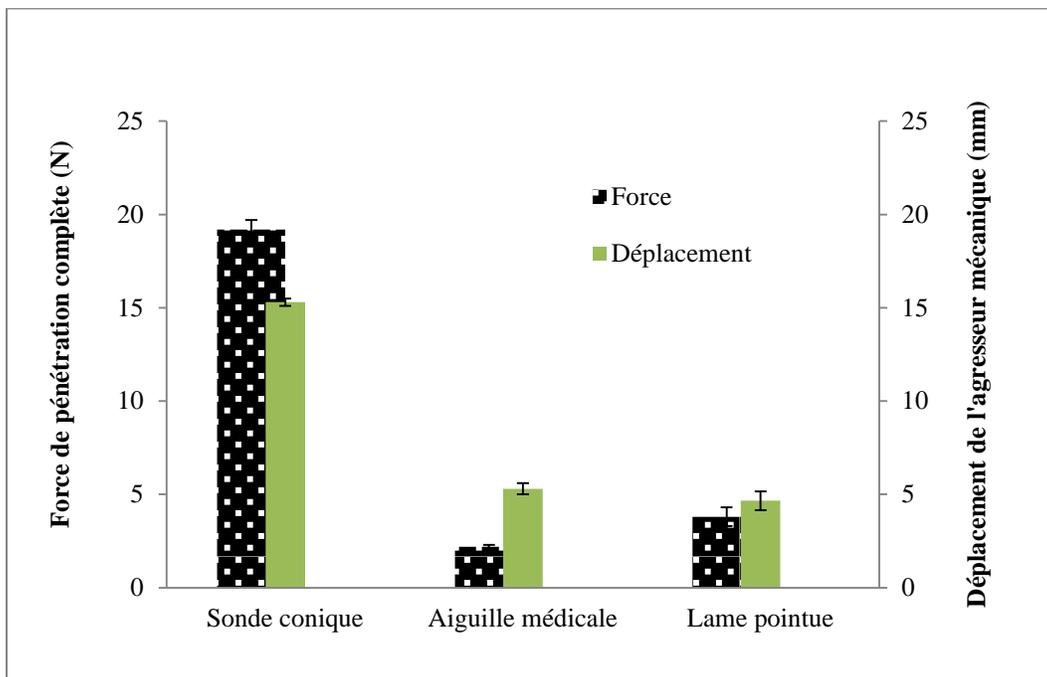


Figure 20 Valeurs de la force de pénétration complète et du déplacement correspondant, mesurées selon les méthodes de perforation par une sonde, une aiguille médicale et une lame pointue, néoprène de 1,6 mm d'épaisseur, vitesse de déplacement de 100 mm/min.

Ces écarts de résultats peuvent s'expliquer en partie par les mécanismes différents de perforation entre ces trois types d'agresseurs mécaniques. En effet, il a été démontré que la perforation par des sondes coniques se manifeste par une importante déformation locale du matériau à la pointe de la sonde avant sa rupture brutale [14], ce qui entraîne un important déplacement de la sonde pour atteindre la force maximale. Dans le cas des aiguilles médicales, comme dans celui de la lame pointue, la création d'une fissure se produit rapidement à la pointe de l'aiguille [15] et de la lame. La déformation du matériau est donc plus faible et la propagation de la fissure créée conduit à la rupture totale.

Même s'il est possible de faire des rapprochements entre les résistances à la perforation par l'aiguille médicale et par la lame pointue, il faut souligner une différence importante dans les processus de pénétration pour chacun de ces deux agresseurs mécaniques. Contrairement à la perforation par une aiguille médicale, celle par une lame pointue demande une forte contribution de la friction entre la lame et le matériau, ce qui explique en partie la force de perforation plus élevée pour la lame. D'autre part, la géométrie de la lame pointue indique que la fissure se propage sous un mode mixte avec différentes contributions du Mode I (par contrainte normale au plan de fissure) et du Mode III (par contrainte de cisaillement parallèle au plan de fissure et au front de fissure) décrits dans la mécanique de la rupture. Ces paramètres seront analysés en détail plus loin.

3.4 Comportement à la perforation/coupure des élastomères

Les mécanismes de perforation/coupure ont été étudiés avec des membranes de nitrile, de néoprène et de butyle de 1,6 mm d'épaisseur. La Figure 21 montre que, quelle que soit la géométrie de la lame, la membrane de butyle offre la meilleure résistance à la perforation par une lame pointue, vient ensuite la membrane de nitrile dont la résistance est légèrement supérieure à celle de la membrane de néoprène. Il est intéressant de noter que l'augmentation de la force de pénétration complète en fonction de l'angle de la pointe est beaucoup plus faible dans le cas du néoprène, que dans le cas du nitrile et du butyle. En effet, la contribution des mécanismes de rupture dans le cas du néoprène, particulièrement son comportement viscoélastique, semble être similaire durant le processus de perforation/coupure par les trois lames, comme cela a été observé à la Figure 17 où, quelle que soit la vitesse appliquée, la première partie linéaire des courbes est quasiment identique pour les trois vitesses de sollicitation. De plus, la résistance du néoprène est plus grande que celle du nitrile avec la lame de 22,5°, mais devient plus faible avec celles de 35° et 56°. Comme toutes les membranes ont la même épaisseur (1,6 mm), les augmentations de la surface de contact entre le matériau et la lame sont identiques. Si l'on considère que la friction contribue significativement à la résistance à la perforation/coupure, et que le néoprène montre une meilleure résistance que le nitrile lorsqu'une lame de 22,5° est utilisée, il est contradictoire de constater que le néoprène devient moins résistant quand les surfaces de contact augmentent avec les lames de 35° et 56°. La friction seule ne peut donc pas être le paramètre principal qui contrôle la résistance à la perforation/coupure. Avec ce type d'agresseur mécanique, les deux modes de rupture I (contrainte normale au plan de fissure) et III (contrainte de cisaillement parallèle au plan de fissure et au front de fissure), décrits par la mécanique de la rupture [25], doivent être considérés. La Figure 22 montre la distribution des forces dues à la perforation par une lame pointue qui illustre ces contraintes mécaniques élémentaires. Entre la lame de 22,5° et celle de 35°, outre l'augmentation de la surface de contact, la contribution du Mode I de rupture augmente et celle du Mode III diminue. Les effets

observés dans ces résultats pourraient être reliés aux contributions différentes des énergies de rupture (permettant la création de la surface de rupture) de ces deux modes en l'absence de la friction.

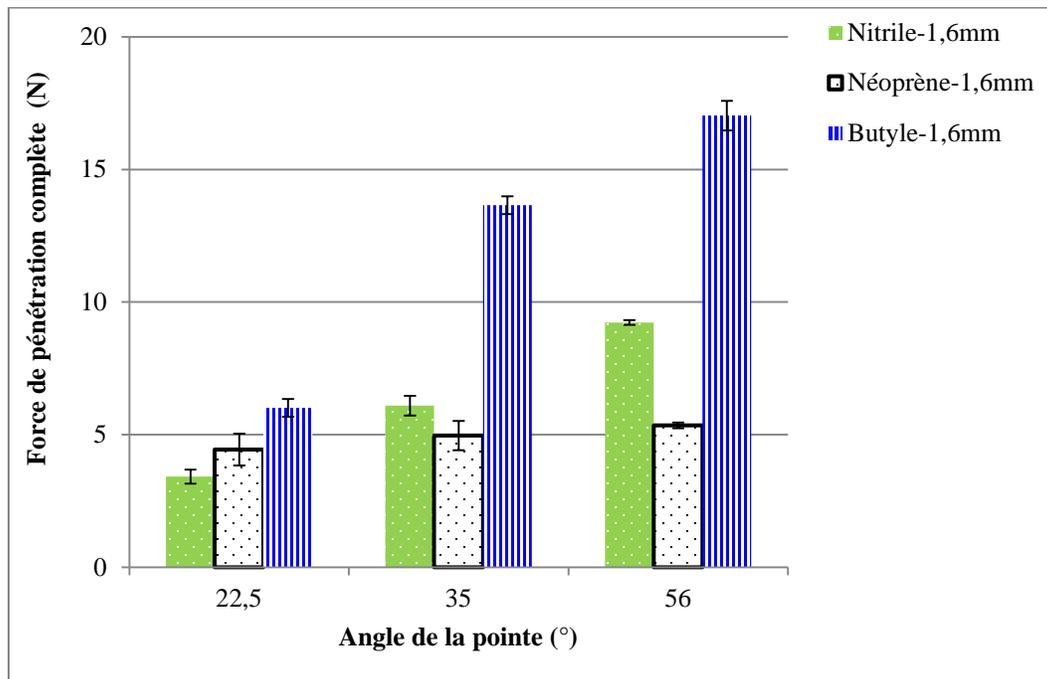


Figure 21 Variation de la force de pénétration complète par trois lames pointues (22,5°, 35° et 56°) avec une vitesse de déplacement de 250 mm/min dans trois élastomères.

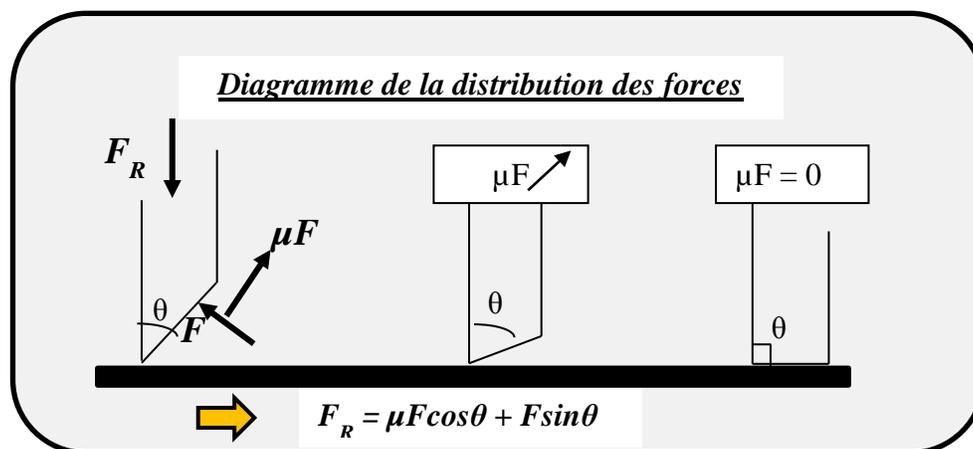


Figure 22 Diagramme de la distribution des forces dues à la perforation par une lame pointue.

3.5 Influence de la géométrie de la lame pointue et de l'épaisseur de l'échantillon

Les effets de l'angle de la pointe de la lame et de l'épaisseur de l'échantillon sur la force de pénétration complète sont illustrés aux Figures 23 et 24 pour des membranes de nitrile, de néoprène et de butyle. Un accroissement de l'angle de la pointe se traduit par une augmentation de la force de pénétration complète pour toutes les épaisseurs d'échantillons. Cet accroissement peut être attribué en partie à la friction entre la lame et le matériau. Effectivement, l'augmentation de l'angle de la pointe (de 22,5° à 56°) conduit à une augmentation de la surface de rupture quand la pointe de la lame atteint la face inférieure de l'échantillon. Il faut souligner que le changement de cet angle conduit aussi à une modification du mode de rupture (I et III) du matériau [25] qui peut affecter également la force de pénétration de la lame. Il est à noter également que les écarts-types sur la force de pénétration complète moyenne pour les élastomères sont faibles, donnant des coefficients de variation généralement inférieurs à 10%.

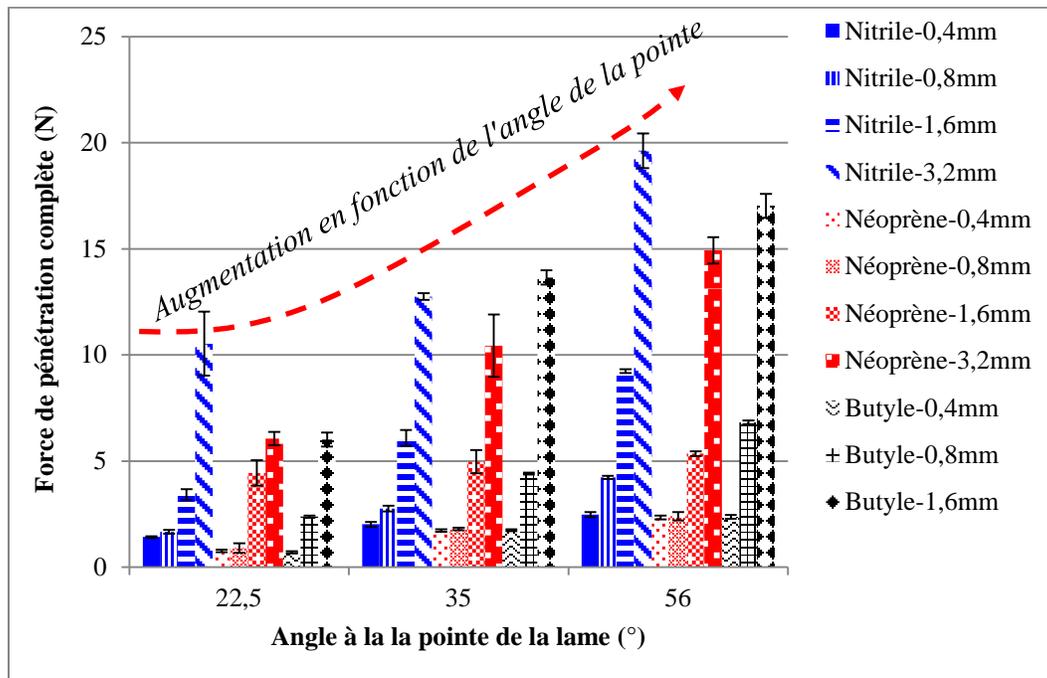


Figure 23 Force de pénétration complète en fonction de l'angle à la pointe de la lame pour différentes membranes d'élastomère de différentes épaisseurs, vitesse de déplacement de 250 mm/min.

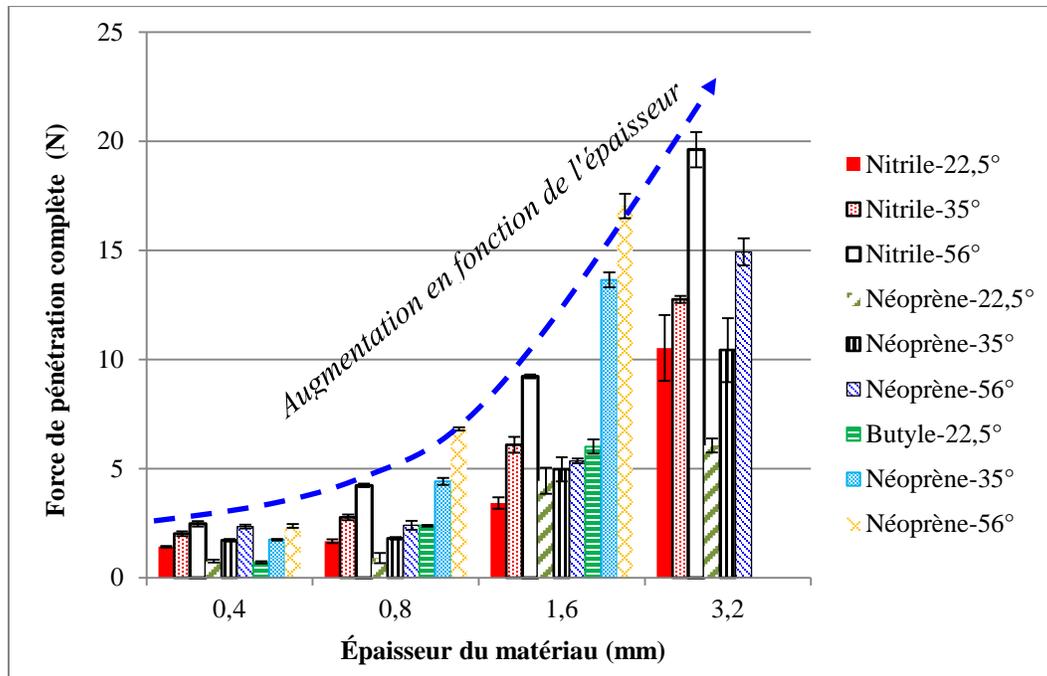


Figure 24 Force de pénétration complète par les lames pointues de 22,5°, 35° et 56°, en fonction de l'épaisseur de l'échantillon pour différentes membranes d'élastomère, vitesse de déplacement de 250 mm/min.

3.6 Influence des conditions d'utilisation en service

3.6.1 Effet de la présence de lubrifiant

Pour évaluer l'effet de la présence de lubrifiant, des tests ont été réalisés sur quelques échantillons avec une lame de 35° (qui représente une surface de contact intermédiaire parmi les trois lames), préalablement immergée dans une huile de coupe (Figure 3). Les résultats ont été comparés avec ceux obtenus lors de la perforation/coupure sans lubrification.

La Figure 25 indique que la valeur de la force de pénétration complète, obtenue pour des échantillons en néoprène de 1,6 mm et de 3,2 mm d'épaisseur et en nitrile de 1,6 mm d'épaisseur, diminue lors de la présence de lubrifiant. Ce résultat confirme l'importance de la friction dans le processus de rupture. Les mêmes effets ont été observés lors de la piqure par une aiguille médicale [15] et lors de la coupure par une lame tranchante [13]. Ce paramètre doit donc être pris en considération lors du choix des gants de protection contre les agresseurs multiples pour différents milieux de travail.

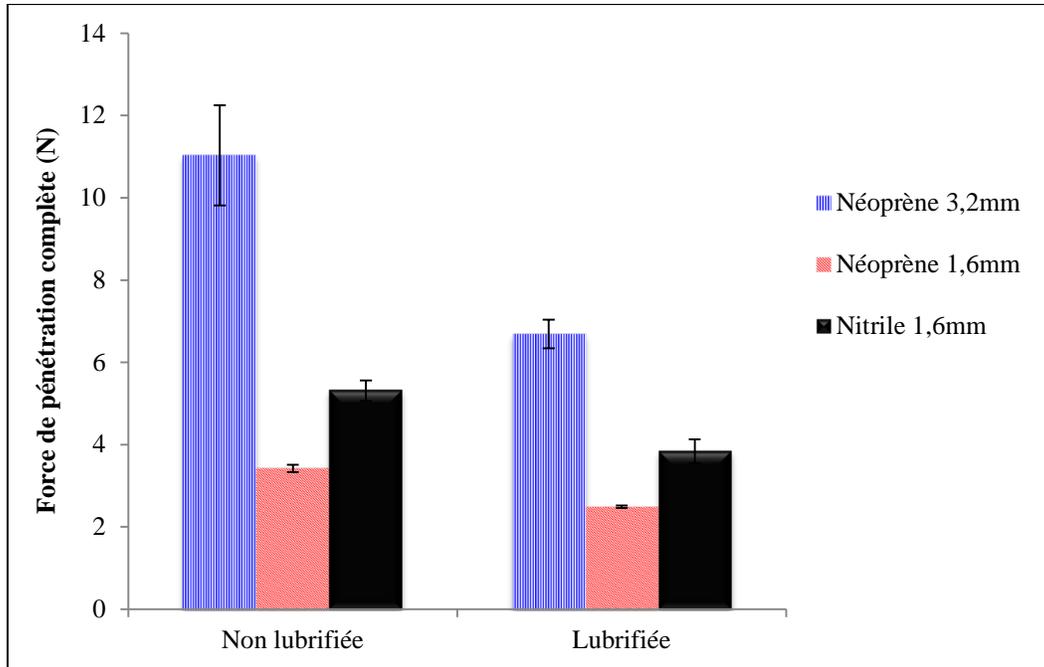


Figure 25 Force de pénétration complète avec et sans lubrifiant pour deux membranes de néoprène (1,6 et 3,2 mm) et une membrane de nitrile (1,6 mm), lame pointue de 35°, vitesse de déplacement de 50 mm/min.

3.6.2 Effet d'une préextension

L'effet d'une préextension a été évalué en utilisant le montage de la Figure 5 avec des échantillons de nitrile de différentes épaisseurs et des lames de 35°. La Figure 26 présente la variation de la force de pénétration complète en fonction du taux de déformation, allant de 0 à 200%, appliqué aux membranes de nitrile de 0,4 mm, 0,8 mm, et 1,6 mm d'épaisseur. Les résultats montrent que cette force diminue continuellement avec le taux de déformation. En effet, entre 0 et 200 %, la force de pénétration diminue de 2,0 à 1,0 N, de 2,8 à 1,7 N et de 6,0 à 5,0 N pour les membranes de nitrile de 0,4, 0,8 et 1,6 mm d'épaisseur, respectivement. Cette tendance est similaire à celle observée lors de la piqûre par des aiguilles médicales [15]. Il s'agit donc des principes proposés par Lake et Yeoh [44,45] en présence d'une préextension (voir équation 4 à la section 3.8.2). Ces principes indiquent que le taux de restitution d'énergie total est donné par la somme de l'énergie de perforation/coupure et de l'énergie associée à l'application de la préextension. À des valeurs de préextension telles que celles appliquées ici (0 à 200 %), ce taux de restitution d'énergie total devrait conserver une valeur constante. Ainsi, une augmentation de l'énergie d'extension correspond à une diminution de l'énergie de perforation/coupure.

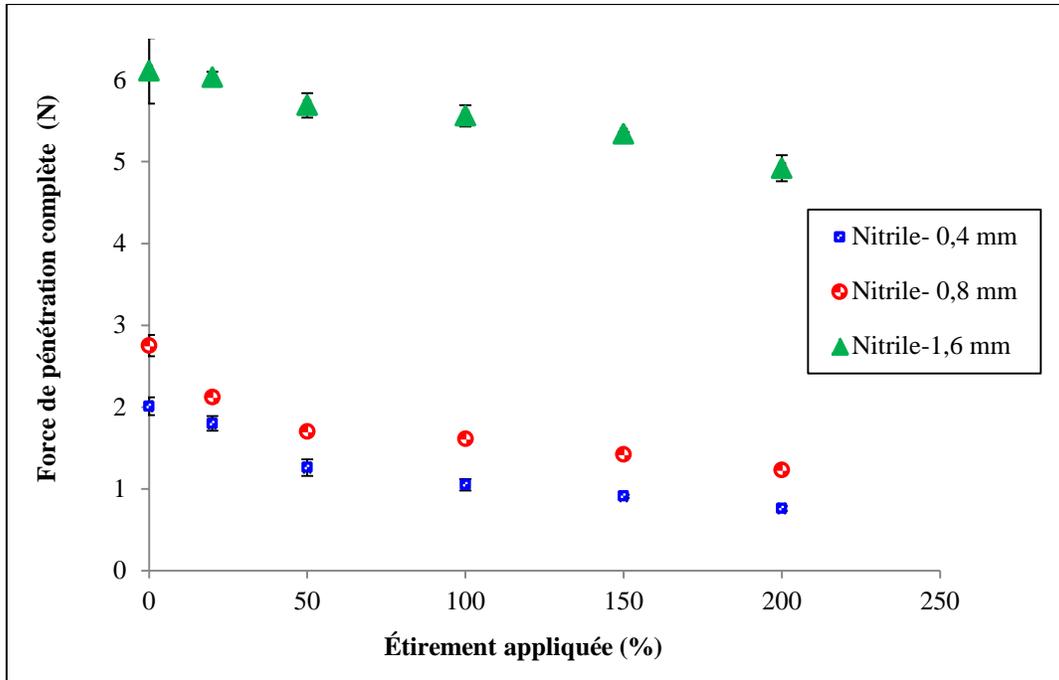


Figure 26 Variation de la force de pénétration complète en fonction de l'étirement des membranes de nitrile de 0,4, 0,8 et 1,6 mm d'épaisseur, lame pointue de 35°, vitesse de déplacement de 250 mm/min.

3.6.3 Effet de la vitesse de déplacement de la lame pointue

L'effet viscoélastique des élastomères sur leurs propriétés mécaniques a été largement étudié. En ce qui concerne les matériaux de protection, les investigations précédentes sur la coupure par tranchage ont montré que l'énergie de coupure d'un échantillon en élastomère augmente pour des vitesses de la lame entre 1 et 100 mm/min, puis se stabilise dans la gamme de 100 à 900 mm/min [13]. D'autre part, il a été établi que la force maximale obtenue lors de la piqûre par une aiguille et lors de la perforation par une sonde augmente linéairement en fonction du logarithme de la vitesse de déplacement [14, 15].

Dans la présente étude, la même tendance a été observée. Les Figures 27 et 28 illustrent quelques exemples de l'influence de la vitesse de déplacement sur la force de pénétration complète du nitrile et du néoprène. Pour de faibles vitesses de déplacement, on remarque que la force augmente rapidement en fonction de la vitesse de déplacement de la lame. Cependant, cette hausse de la force devient de plus en plus faible lorsque la vitesse continue à augmenter et elle semble se stabiliser pour une vitesse au-dessus de 250 mm/min. Ces résultats suggèrent que l'effet de la vitesse est le même que dans le cas de la coupure par une lame tranchante [13]. Cette variation pourrait donc indiquer que, bien que les mécanismes responsables de la perforation/coupure soient présents dans toute la gamme des vitesses étudiées, leurs contributions respectives varient lorsque les vitesses de déplacement sont inférieures à 250 mm/min, mais sont les mêmes lorsque les vitesses de déplacement sont entre 250 et 500 mm/min.

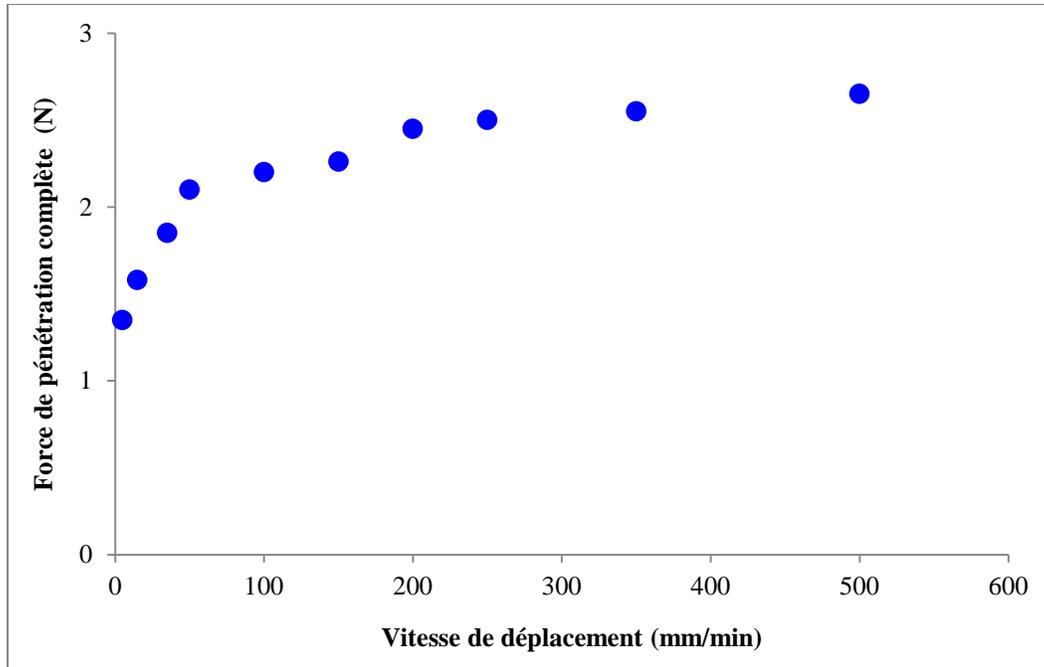


Figure 27 Variation de la force de pénétration complète dans une membrane de nitrile de 1,6 mm, en fonction de la vitesse de déplacement d'une lame pointue lubrifiée de 22,5°.

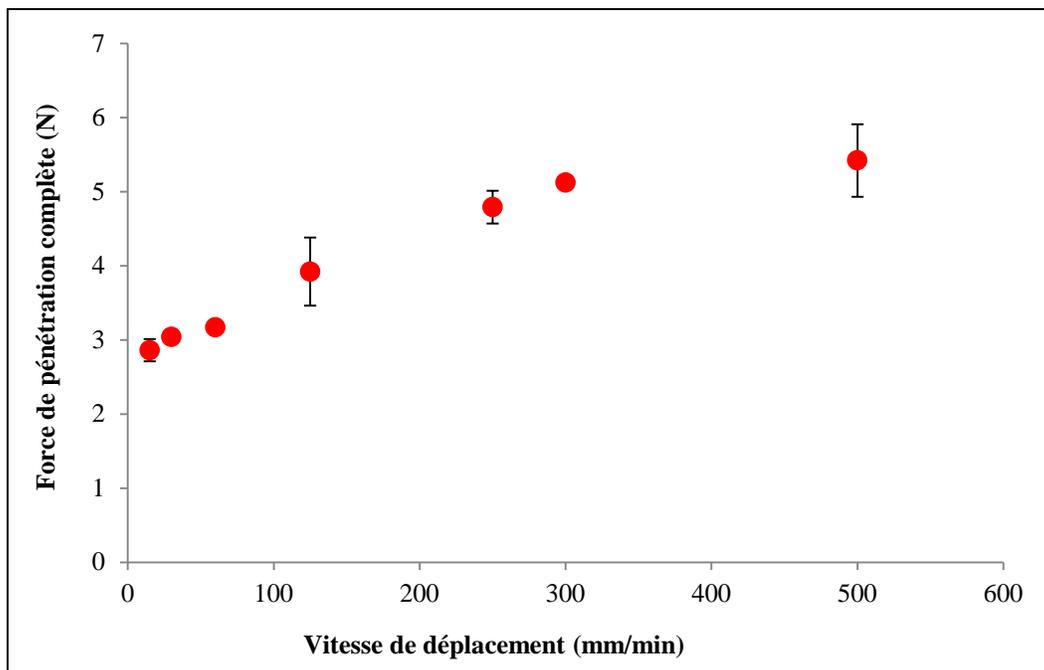


Figure 28 Variation de la force de pénétration complète dans une membrane de néoprène de 1,6 mm, en fonction de la vitesse de déplacement d'une lame pointue non lubrifiée de 35°.

3.6.4 Effet de l'angle d'attaque de la lame pointue

Les tests de perforation/coupure selon différents angles d'attaque ont été réalisés sur des membranes de néoprène de 1,6 mm d'épaisseur avec la lame de 35° à une vitesse de 250 mm/min. Les résultats présentés à la Figure 29 montrent que l'orientation du matériau selon la direction -X occasionne une réduction de la force de pénétration complète, car l'angle entre le tranchant de la lame et la surface de l'échantillon augmente (voir Figure 7b). Par contre, dans la direction X, l'inclinaison de l'échantillon engendre une diminution de l'angle entre le tranchant et la surface de l'échantillon (voir Figure 7a), et par conséquent, une augmentation de la force. Ces résultats sont en accord avec l'effet de l'angle de la pointe de la lame discuté à la section 3.5. Dans la direction Z (voir Figure 7c), l'inclinaison de l'échantillon n'a aucun effet sur la résistance à la pénétration/coupure. Ce résultat s'explique également par le fait que, dans cette orientation de la lame, l'inclinaison de l'échantillon n'affecte pas l'angle du tranchant de la lame par rapport à la surface de l'échantillon (l'échantillon est incliné autour de l'axe Z). On peut également observer que, pour une inclinaison de l'échantillon à 0°, la force de pénétration complète est plus faible lorsque la lame est orientée en direction Z par rapport aux directions X ou -X, probablement dû à l'anisotropie du matériau, induite lors de sa mise en œuvre.

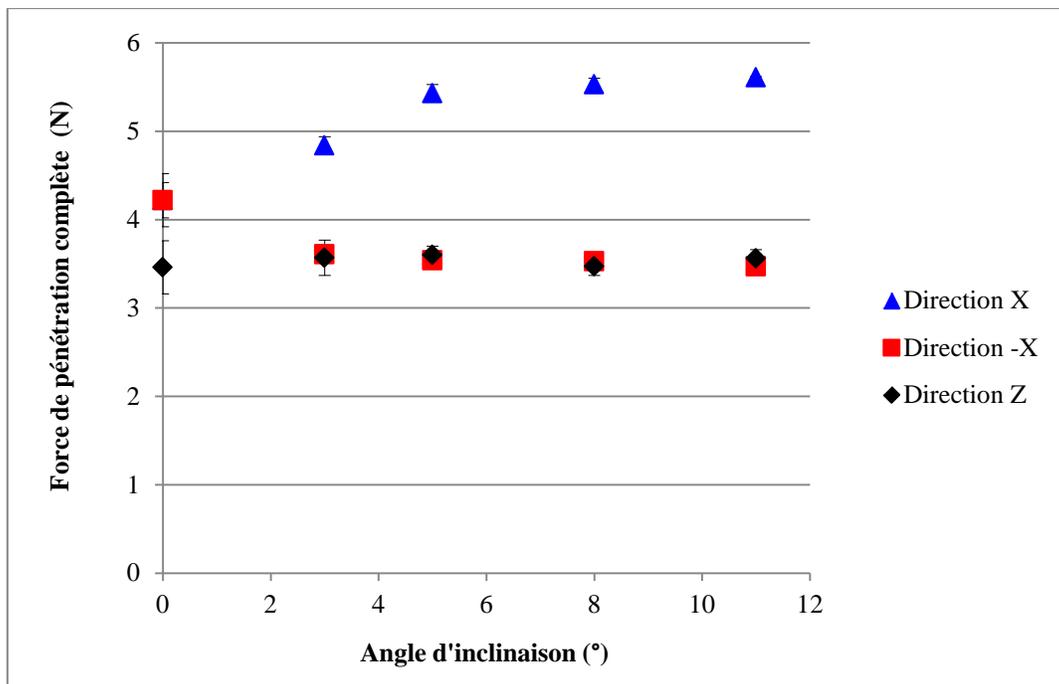


Figure 29 Force de pénétration complète en fonction de l'angle d'inclinaison du matériau pour des orientations du tranchant de la lame dans les directions X, -X et Z, néoprène de 1,6 mm d'épaisseur, lame pointue de 35°, vitesse de déplacement de 250 mm/min.

Les résultats de la Figure 30 mettent en évidence la variation de la résistance à une lame pointue en fonction de l'angle d'attaque. Les tests ont été effectués avec des lames de 35° et de 56° sur deux membranes de néoprène de différentes épaisseurs. Selon l'inclinaison du porte-échantillon et la direction (X ou -X) du tranchant de la lame, des angles d'attaque variant entre 23° et 66° ont

pu être obtenus. Les valeurs de la force de pénétration complète obtenues se superposent en une courbe maîtresse pour chaque épaisseur de néoprène. L'augmentation de l'angle d'attaque engendre une diminution de la surface de contact avec l'échantillon lorsque la pointe de la lame atteint la face inférieure, ce qui est en accord avec la diminution de la force de pénétration complète.

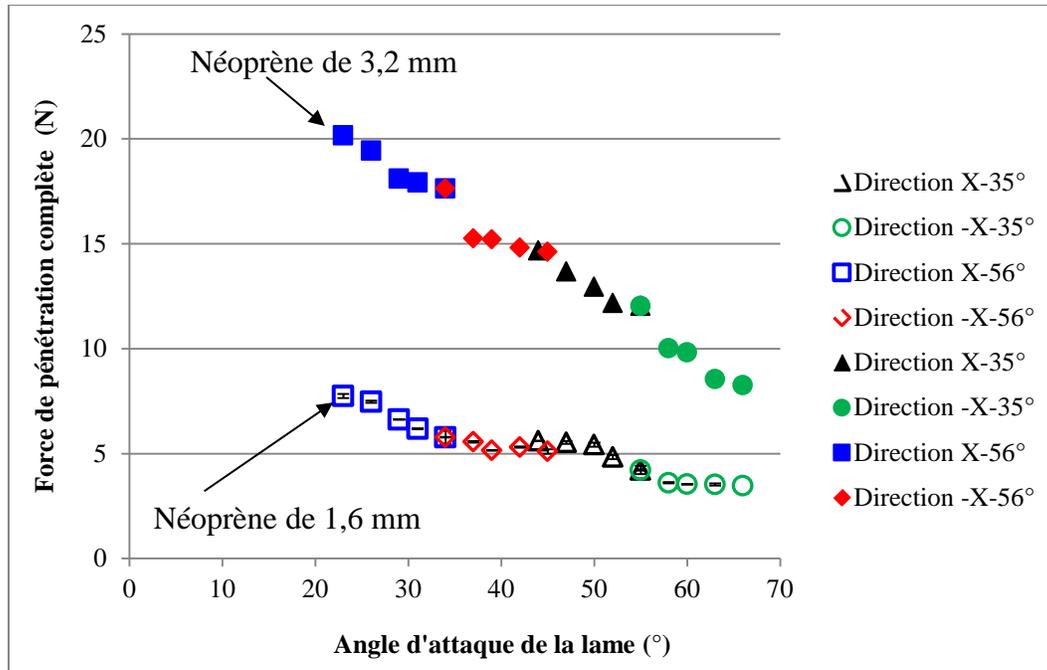


Figure 30 Variation de la force de pénétration complète en fonction de l'angle d'attaque, obtenu avec des lames pointues de 35° et de 56° orientées selon les directions X et -X, pour des membranes de néoprène d'épaisseur 1,6 et 3,2 mm, vitesse de déplacement de 250 mm/min.

3.6.5 Effet d'un support simulant la main

Afin d'évaluer de manière préliminaire l'effet de la présence de la main sur la force de perforation par une lame pointue, des tests de perforation/coupure avec la présence d'un support ont été réalisés (voir Figure 8). Ces essais ont été effectués sur des membranes de néoprène (épaisseur de 0,4, 1,6 et 3,2 mm), ainsi que sur des membranes de nitrile et de butyle (épaisseur de 1,6 mm).

Les Figures 31 et 32 présentent la variation de la force de pénétration complète en fonction de la dureté du matériau du support. La dureté nulle correspond à la configuration en déformation libre décrite à la section 2.1. Les résultats montrent que la présence d'un support sous l'échantillon change relativement peu la force de pénétration complète. Cet effet est similaire au résultat observé dans le cas de la piqure par des aiguilles médicales [15].

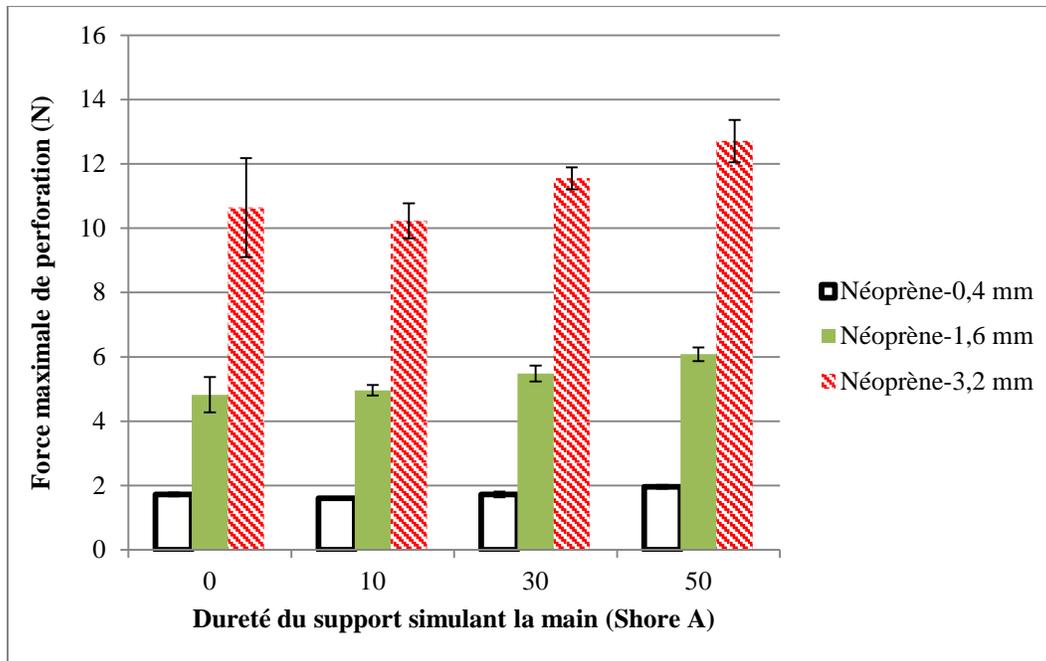


Figure 31 Force de pénétration complète en fonction de la dureté du support simulant la main, membranes de néoprène de 0,4, 1,6 et 3,2 mm d'épaisseur, lame pointue de 35°, vitesse de déplacement de 250 mm/min.

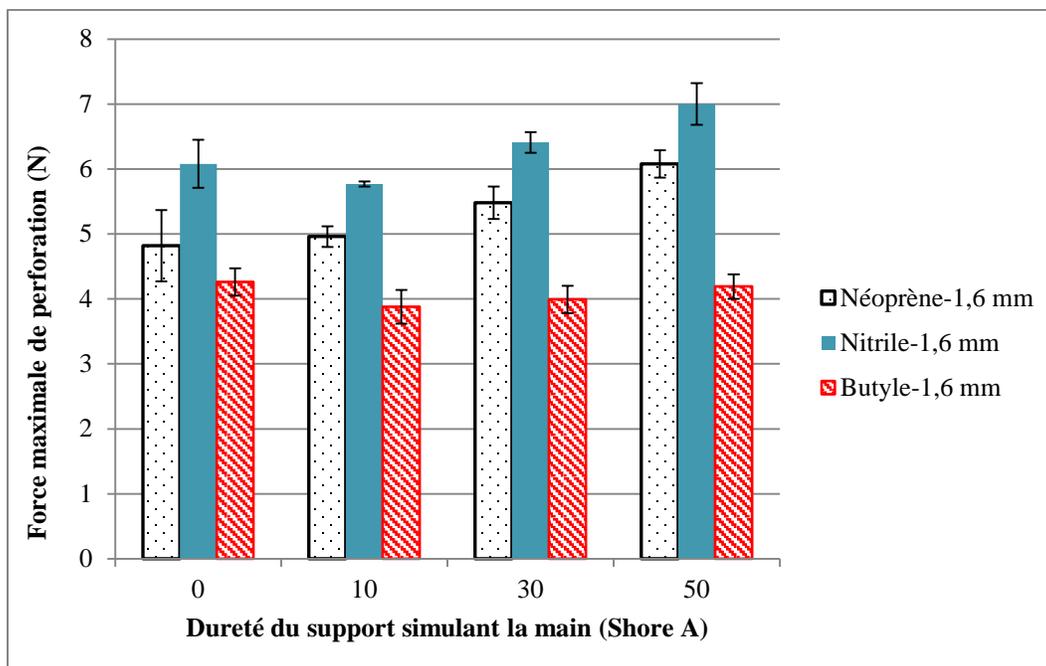


Figure 32 Force de pénétration complète en fonction de la dureté du support simulant la main, pour les trois membranes d'élastomère de 1,6 mm d'épaisseur, lame pointue de 35°, vitesse de déplacement de 250 mm/min.

3.7 Tests de perforation/coupure de certains gants de protection

3.7.1 Mesures en déformation libre et avec support

Les résultats des tests de perforation en mode déformation libre (sans support) et en mode avec support (en néoprène de dureté 10 Shore A) ont été comparés pour différents exemples de gants de protection, de matériaux et d'épaisseurs variées, sélectionnés parmi les gants du Tableau 2 (Figure 33). Les valeurs obtenues selon la méthode de perforation/coupure avec et sans support sont très semblables; elles se trouvent à l'intérieur de l'intervalle de dispersion des mesures, qui ne dépasse pas une valeur de 20% de la valeur moyenne de la force.

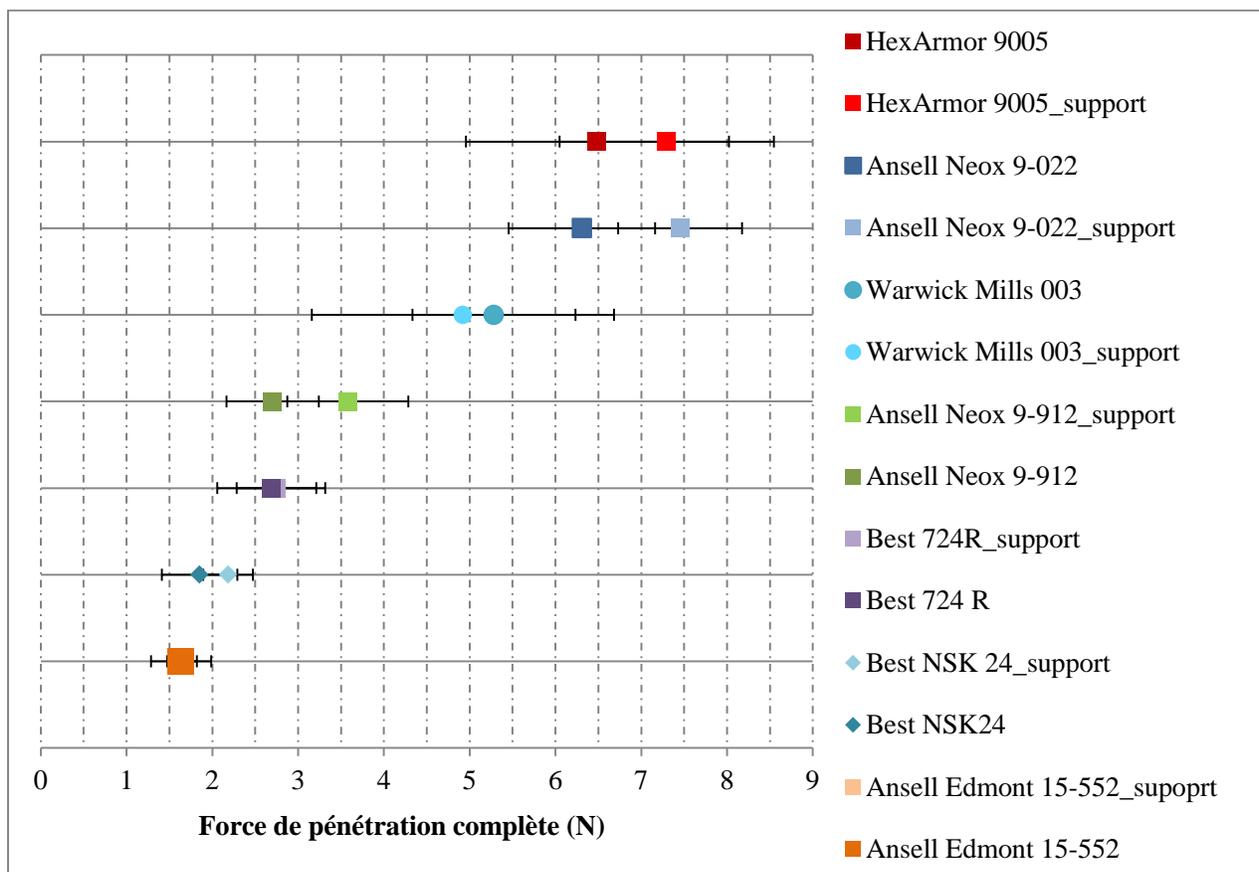


Figure 33 Forces de pénétration complète obtenues avec et sans support pour une sélection de gants de protection, lame pointue de 35°, vitesse de déplacement de 250 mm/min.

3.7.2 Comparaison des résultats de perforation obtenus avec une lame pointue, une sonde et une aiguille médicale

Les valeurs de la force de perforation par une lame pointue de 35° (force de pénétration complète, avec support de dureté 10 Shore A) sont comparées ici avec celles obtenues selon les

méthodes de perforation par une sonde cylindrique à bout arrondi (force maximale, suivant la méthode ASTM F1342-05 [18] avec la sonde B), par une aiguille médicale de calibre 25G (force de pénétration complète, suivant une méthode en déformation libre avec détection de contact [41]) pour les 10 modèles de gants de protection sélectionnés (Tableau 4).

Tableau 4 Forces de perforation complète (F) par une sonde (sonde B de la méthode ASTM F1342-05), par une aiguille médicale 25G, et par une lame pointue de 35°, pour une sélection de gants de protection.

Vitesse de déplacement	500 mm/min		250 mm/min			
	Sonde B		Aiguille médicale 25G		Lame pointue de 35°	
Gants de protection	F (N)	Écart-type	F (N)	Écart-type	F (N)	Écart-type
Ansell Hyflex 11-501	7	1,3	0,45	0,14	x	x
Ansell Hyflex 11-900	15	2,5	0,38	0,06	1,1	0,25
Ansell Neox 9-022	31	3,1	1,84	0,31	7,45	0,72
Ansell Neox 9-912	17	2, 3	0,75	0,20	3,58	0,70
Ansell Edmont 15-552	32	2,9	0,83	0,20	1,65	0,17
Best NSK 24	31	3,1	0,76	0,19	2,18	0,29
Best 724R	23	2,1	1,02	0,17	2,75	0,46
Best 4811	x	x	0,62	0,22	2,53	0,78
Warwick Mill OPS 003	x	x	4,63	1,54	4,92	1,77
HexArmor 9005	x	x	2,23	0,76	7,23	1,25

Remarque : «x» données non disponibles

Les résultats présentés au Tableau 4 révèlent que la résistance à la perforation des gants varie d'un agresseur mécanique à l'autre. Comme pour le cas des membranes d'élastomère montré plus haut, ces gants présentent une résistance plus élevée à la perforation par une sonde que celle par une aiguille ou une lame. Leur résistance à la perforation par une lame pointue est aussi supérieure à celle obtenue avec l'aiguille médicale.

Comme discuté plus haut, du point de vue théorique, la perforation par une lame pointue comprend deux modes de rupture : Mode I par contrainte normale au plan de fissure, et Mode III par contrainte de cisaillement agissant parallèlement au plan de la fissure et parallèlement au front de fissure. Ces deux modes sont présents et varient avec l'angle entre le tranchant et la surface du gant. Une caractérisation théorique rigoureuse implique donc des études et calculs complexes. Ce mode mixte de rupture a lieu aussi dans le cas de la piqûre par une aiguille

médicale, avec un angle entre le tranchant et la surface du gant nettement plus grand en raison de la forme de la pointe de l'aiguille [25]. Le Mode III est plus important dans le cas de la piqûre que dans celui de la lame pointue. Dans le cas de la coupure par une lame tranchante, seulement le Mode II (par contrainte de cisaillement agissant parallèlement au plan et perpendiculaire au front de la fissure) est présent. Ces résultats semblent indiquer que le Mode III de rupture par contrainte de cisaillement est le plus critique et diminue la résistance à la perforation. Les protections pour ces différents types d'agresseur mécanique dépendent donc de plusieurs paramètres intrinsèques du matériau choisi. D'autre part, il est aussi bien connu que l'amélioration d'une propriété s'obtient souvent au détriment d'autres caractéristiques. Par exemple, une grande rigidité et une grande résistance mécanique sont souvent accompagnées par une perte de ténacité. Il serait donc pertinent de classer les gants de protection en fonction du type de sollicitation le plus fréquemment rencontré pour un milieu de travail donné. Même si la lame pointue, la lame tranchante et l'aiguille médicale ont toutes un point commun en ce qui a trait à la partie tranchante, les contributions du Mode III sont très différentes.

3.8 Développement d'une méthode de caractérisation quantitative à la perforation/coupure par une lame pointue

3.8.1 Faiblesse des méthodes existantes

Comme mentionné plus haut, dans toutes les méthodes d'essai normalisées actuelles [18-21], la force maximale de pénétration est généralement utilisée comme critère de performance. Or, cette valeur dépend de l'épaisseur de l'échantillon et de la géométrie de la pointe pénétrante, et ne représente pas une propriété intrinsèque du matériau de protection. Par exemple, un gant fait d'un matériau moins performant, mais plus épais, peut montrer un meilleur résultat selon les méthodes actuelles. La comparaison des performances des gants ne se fait donc pas toujours sur une base objective. Des gants plus épais impliquent une perte de dextérité et n'offrent pas nécessairement une protection adéquate. Un paramètre objectif de caractérisation de performance devrait être indépendant de l'épaisseur du matériau. Dans le cas des lames pointues, la mesure de la force de pénétration complète, qui correspond au moment où la pointe de la lame atteint la surface inférieure de l'échantillon, ne peut pas non plus être une méthode objective, car cette valeur augmente également avec l'épaisseur de l'échantillon. Par ailleurs, les résultats présentés plus haut démontrent que, outre l'épaisseur de l'échantillon, l'angle de la pointe de la lame affecte considérablement la force de pénétration complète. Cette force n'est donc pas une indication de la résistance du matériau aux lames pointues.

En résumé, les mesures de la force de pénétration dans toutes les méthodes d'essai normalisées actuelles, bien que quantitatives, ne représentent pas des propriétés intrinsèques du matériau. Ces méthodes ne permettent donc pas une caractérisation objective de performance pour les gants de protection. Dans cette partie, nous présentons une nouvelle approche visant à déterminer les propriétés intrinsèques du matériau qui contrôlent sa résistance à la perforation/coupure.

3.8.2 Méthode de mesure en éliminant la friction

Dans l'exemple de la Figure 11, l'énergie sous la courbe force-déplacement comprend à la fois l'énergie élastique et l'énergie de friction entre la lame et l'échantillon. Afin de déterminer l'énergie de création de surface (énergie de rupture) d'un matériau coupé verticalement en Mode I pur par une lame, Lake et Yeoh [44,45] ont proposé une approche consistant à étirer graduellement l'échantillon dans le sens perpendiculaire à la surface de la fissure afin de réduire la friction. Dans cette situation, ces auteurs ont exprimé le taux de restitution d'énergie totale (G) pour la création d'une unité de surface par :

$$G = P + T \quad \text{Équation 5}$$

où P est l'énergie de rupture (l'énergie de perforation/coupure dans le cas des lames pointues) par unité de surface apparente de l'échantillon, et T est le taux d'énergie d'étirement (ou de préextension) de l'échantillon par unité de surface, décrit par la mécanique de la rupture [43].

Par ailleurs, Rivlin et Thomas [43] ont établi que, lorsqu'une petite entaille est réalisée dans un échantillon déformé en tension pure, le changement dans l'énergie totale emmagasinée est donné par :

$$W_t - W = \frac{\beta A^2 S_e}{4t} \quad \text{Équation 6}$$

où W_t et W sont les énergies totales emmagasinées respectivement avant et après que l'entaille soit réalisée. A est la surface de l'entaille, t est l'épaisseur de l'échantillon, S_e est la densité d'énergie emmagasinée correspondant à l'allongement λ dans la zone de tension pure et β est un facteur numérique qui varie avec λ . L'allongement λ est égal à l/l_o , où l_o est la longueur initiale de l'échantillon, et l sa longueur après étirement.

Le taux d'énergie de préextension T par unité de surface peut alors être exprimé par :

$$T = -\left(\frac{\partial W}{\partial A}\right) = \frac{\partial(\beta A^2 S_e / 4t)}{\partial A} = \frac{2\beta A S_e}{4t} \quad \text{Équation 7}$$

Rivlin et Thomas [43] et Greensmith [46] ont montré que le changement dans la valeur de la densité d'énergie S_e , emmagasinée de manière élastique à la suite de la présence de l'entaille, est mineur. Par conséquent, S_e peut être exprimée en fonction de λ selon la relation suivante pour une sollicitation en tension pure [43] :

$$S_e = C_1 \left(\lambda^2 + \frac{2}{\lambda} - 3 \right) + C_2 \left(\frac{1}{\lambda^2} + 2\lambda - 3 \right) \quad \text{Équation 8}$$

dans laquelle C_1 et C_2 sont les coefficients élastiques de Mooney-Rivlin des élastomères [47] qui peuvent être déterminés à partir de tests de traction, et λ est l'allongement de l'échantillon déformé en tension.

Pour calculer T dans l'équation 7, Nguyen et coll. [27] ont développé une méthode pour déterminer β dans le cas de la perforation par une aiguille médicale, qui crée une fissure de forme elliptique dans l'échantillon. Le changement dans l'énergie totale de l'échantillon s'exprime par :

$$W_t - W = \int_{l_0}^l (F_t - F) dl \quad \text{Équation 9}$$

et, en exprimant cette équation en fonction de l'allongement $\lambda = l/l_0$:

$$W_t - W = \int_1^{\lambda} l_0 (F_t - F) d\lambda \quad \text{Équation 10}$$

où F_t et F sont respectivement les forces s'exerçant sur l'échantillon en absence et en présence d'une préentaille.

Par ailleurs, la densité d'énergie emmagasinée S_e peut être obtenue par [43] :

$$S_e = \int_1^{\lambda} (F_t / A_0) d\lambda \quad \text{Équation 11}$$

β peut alors être déterminé par l'équation 6.

En suivant la même approche, les valeurs de T ont été calculées pour différentes déformations de l'échantillon, en présence d'une préentaille de forme triangulaire comme celle de la pointe des lames utilisées. Les mesures de l'énergie de perforation/coupure, selon l'exemple de la Figure 34, ont également été effectuées sur les échantillons déformés (perpendiculairement à la surface de la lame). La Figure 34 montre la relation entre les énergies de perforation/coupure par unité de surface mesurées (voir équation 1) sur ces échantillons étirés, en fonction du taux d'énergie de déformation par unité de surface de l'échantillon T , déterminé selon l'approche proposée [27].

Ces résultats indiquent que l'énergie de perforation/coupure diminue continuellement avec la tension appliquée à l'échantillon (perpendiculairement à la surface de la lame). En principe, cette déformation en tension réduit la friction entre la lame et l'échantillon. Lorsque $T = 0$ (sans déformation en tension de l'échantillon), l'énergie de perforation/coupure comprend l'énergie de rupture (de création de surface) et l'énergie de friction de la lame avec un échantillon non déformé. Théoriquement, en l'absence de toute friction, Lake et Yeoh [44,45] (équation 5) suggèrent que, comme l'énergie de création d'une unité de surface de rupture est une constante du matériau, P doit varier linéairement avec T (car $P = G - T$). Pour de faibles valeurs de T (petits étirements), la friction est présente et contribue à l'énergie totale de perforation. Les valeurs de P mesurées expérimentalement sont donc plus grandes que celles de la droite théorique de l'équation 5, présentées par la ligne discontinue de la Figure 34. Ces auteurs suggèrent également que, lorsque T s'accroît (étirement augmente), il existe une région où la friction latérale entre le matériau et la lame pointue est nulle et P varie linéairement avec T avec

une pente de -1 selon l'équation 5. L'intersection de cette droite avec l'axe P est alors l'énergie de rupture du matériau en l'absence de friction, qui est proposée comme une propriété intrinsèque du matériau. Pour des étirements encore plus importants de l'échantillon, ces auteurs suggèrent que le processus de rupture devient complexe et implique aussi un mécanisme de déchirement de l'échantillon, et ne représente plus l'énergie associée à une coupure.

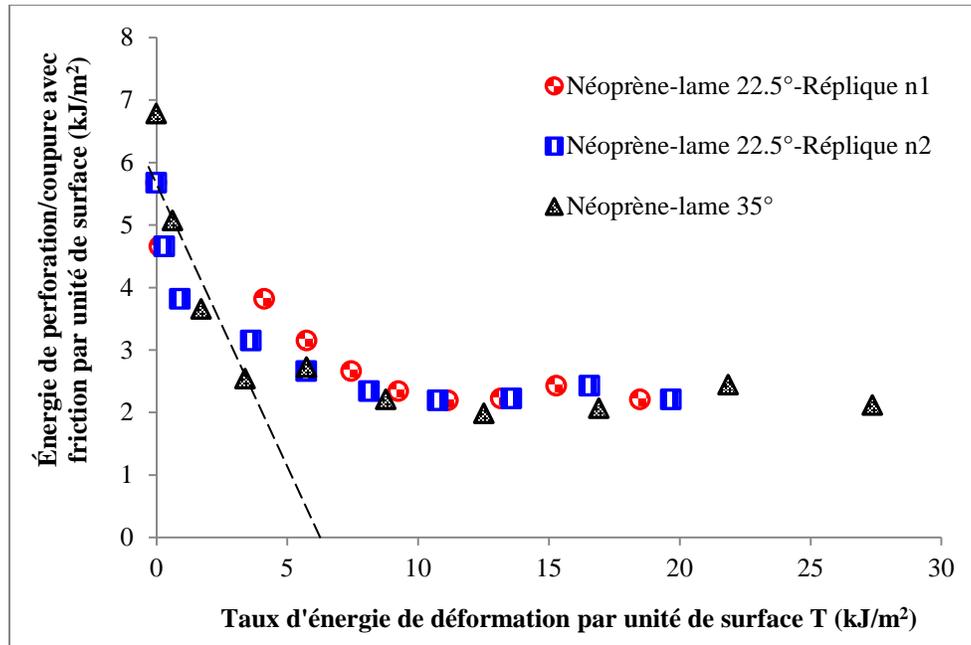


Figure 34 Variation de l'énergie de perforation/coupure par unité de surface P en fonction du taux d'énergie de déformation par unité de surface T , membranes de néoprène de 1,6 mm d'épaisseur, lames pointues de 22,5° et 35°, vitesse de déplacement de 100 mm/min.

Les résultats de la Figure 34 montrent que, dans ce cas de perforation/coupure par une lame pointue, la région linéaire est presque inexistante. L'absence de la partie linéaire suggère qu'il n'existe pas de zone où la friction latérale entre la lame et l'échantillon est complètement éliminée et que le processus de rupture par déchirure a lieu très tôt, avant l'élimination complète de la friction. Par conséquent, l'intersection de la droite théorique de l'équation 5 (ligne discontinue) avec l'ordonnée ne représente pas la valeur réelle de l'énergie de rupture du matériau. D'autre part, les dispersions des résultats de mesure sont grandes, ce qui rend la caractérisation encore plus imprécise. Il est donc très difficile d'utiliser cette approche pour déterminer l'énergie de perforation/coupure du matériau en l'absence de friction.

3.8.3 Nouvelle approche de caractérisation avec des énergies de rupture et de friction

3.8.3.1 Description de la méthode expérimentale

Une autre approche a par la suite été explorée pour évaluer l'énergie de rupture du matériau et l'énergie de friction entre la lame et le matériau pendant la perforation/coupure. Cette approche consiste non seulement à réaliser des tests de chargement/déchargement de la lame pointue afin de mesurer la variation de l'énergie dissipée en fonction du déplacement de la lame (voir Figure 10), mais aussi de réinsérer la lame dans la fissure déjà créée pour déterminer l'énergie de sa friction avec le matériau. Ainsi, après une première perforation/coupure de l'échantillon jusqu'à un certain déplacement (Figure 35a et b), la lame est remontée à sa position 0 (Figure 35c), et ensuite redescendue à la même profondeur (Figure 35d et e). Plusieurs tests peuvent être réalisés jusqu'à différents déplacements, c.-à-d. jusqu'à différentes profondeurs de pénétration dans l'épaisseur de l'échantillon.

Cette approche repose sur l'hypothèse que la force enregistrée durant la réinsertion de la lame dans la fissure (Figure 35d) représente la friction pure entre la lame et le matériau, sans faire intervenir d'autres phénomènes liés à la nature viscoélastique du matériau. Les aires sous les courbes force-déplacement enregistrées lors des tests de chargement/déchargement (étapes a, b et c de la Figure 35) et de friction (étapes d et e de la Figure 35) peuvent ensuite être déterminées par l'intégration de ces courbes selon l'équation 3 afin de calculer les énergies en présence. La Figure 36 illustre les énergies de rupture globale et de friction globale calculées à partir de la nouvelle approche proposée.

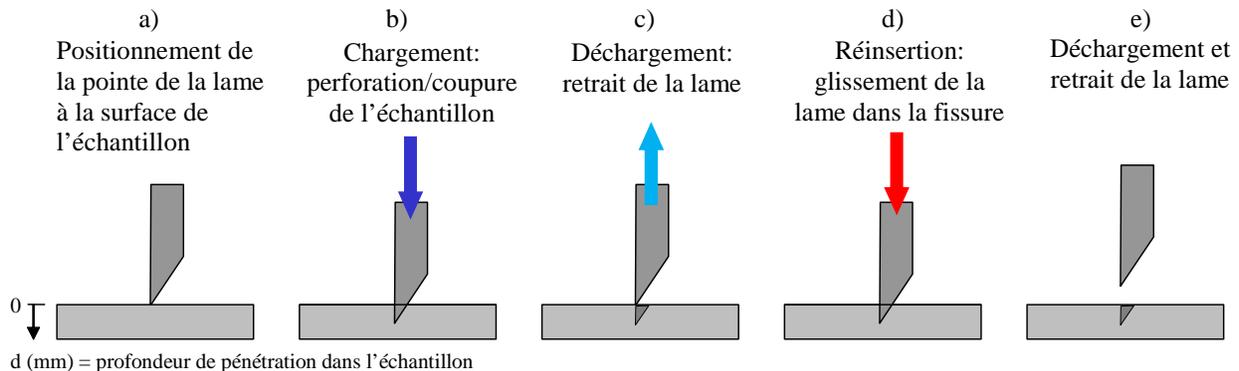


Figure 35 Représentation schématique de la nouvelle approche pour caractériser la rupture du matériau et la friction entre la lame et le matériau pendant la perforation/coupure : a) positionnement de la lame à la surface de l'échantillon; b) et c) test de chargement/déchargement; d) et e) test de friction par la réinsertion de la lame dans la surface de rupture créée.

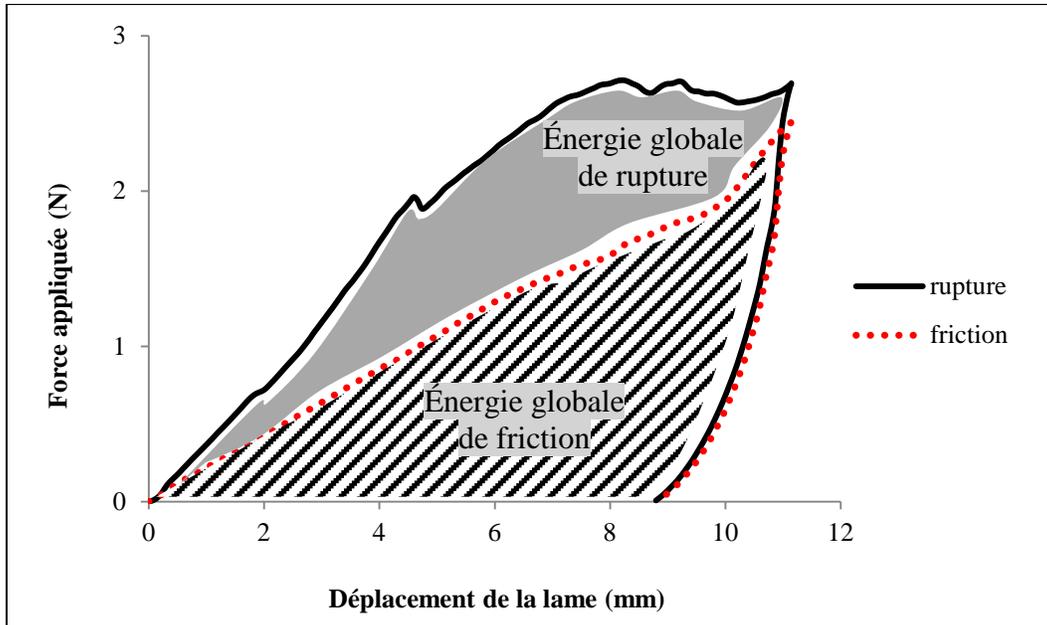


Figure 36 Exemple des courbes force-déplacement issues d'un test de chargement/déchargement, suivi d'un test de friction sur une membrane de néoprène avec une lame pointue de 22,5°.

3.8.3.2 Analyse selon le déplacement de la lame

Les Figures 37 et 38 illustrent les résultats de mesure des énergies globales de rupture et de friction en fonction du déplacement de la lame pointue ayant différents angles à la pointe, à 100 mm/min, sur une membrane de néoprène de 1,6 mm d'épaisseur. On peut constater que pour chaque niveau de déplacement de la lame, les énergies globales de rupture et de friction augmentent avec l'angle à la pointe de la lame. Ces résultats confirment la contribution plus importante de la friction quand cet angle augmente. Les variations de ces énergies avec le déplacement de la lame semblent relativement linéaires. Cependant, les droites de linéarité montrent des ordonnées à l'origine négatives, ce qui est physiquement impossible, car cette relation linéaire suggérerait que, pour de très faibles déplacements de la lame, les énergies de rupture et de friction seraient négatives. Une interprétation de ces résultats peut être donnée par la géométrie de la lame. En effet, la surface de rupture A à la pointe des lames utilisées, et illustrée à la Figure 39, est une fonction quadratique de la profondeur de la pénétration d , laquelle augmente avec le déplacement de la lame. Les relations hypothétiques linéaire et quadratique sont schématiquement illustrées aux Figures 37 et 38. L'hypothèse d'une relation quadratique entre les énergies globales et le déplacement de la lame sera également discutée à la section 3.8.3.3.

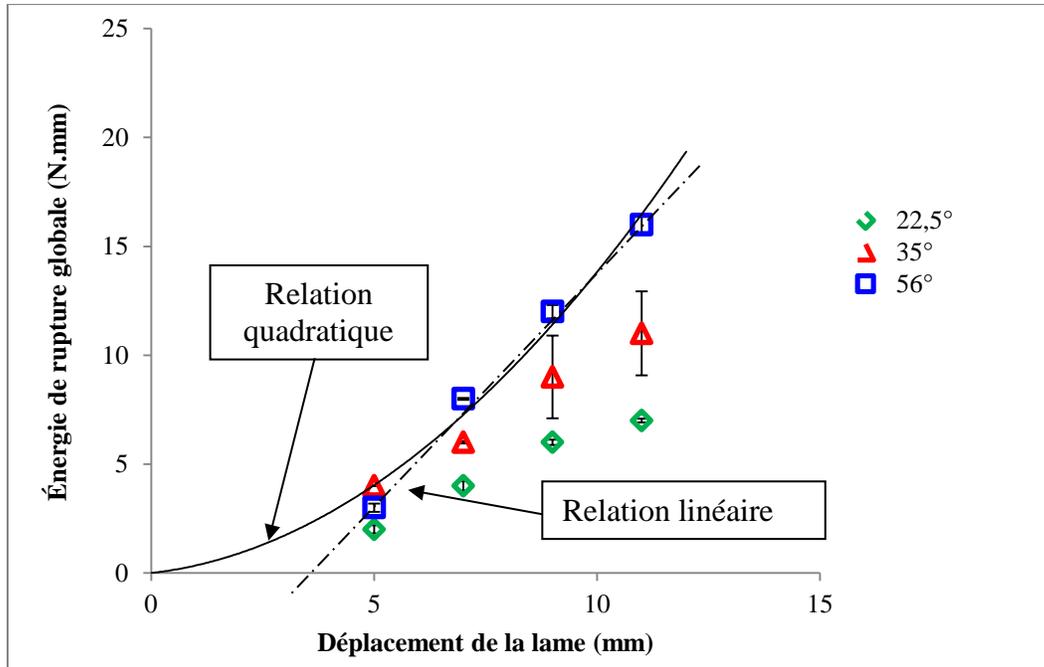


Figure 37 Variation de l'énergie de rupture globale en fonction du déplacement d'une lame pointue de 22,5°, 35° et 56°, membrane de néoprène de 1,6 mm d'épaisseur, vitesse de déplacement de 100 mm/min.

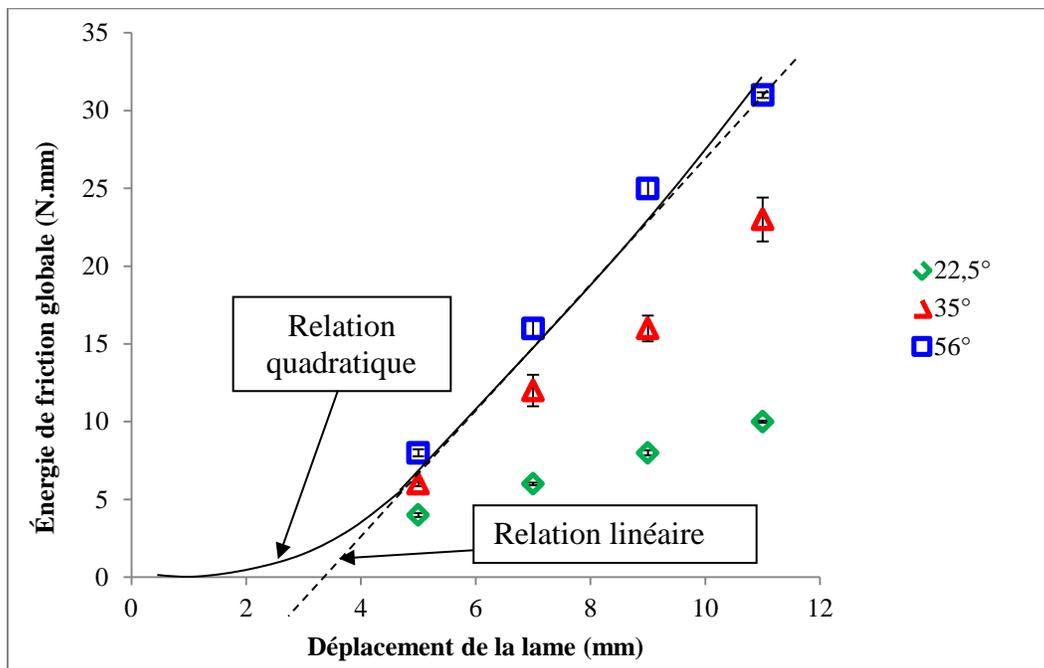


Figure 38 Variation de l'énergie de friction globale en fonction du déplacement d'une lame pointue de 22,5°, 35° et 56°, membrane de néoprène de 1,6 mm d'épaisseur, vitesse de déplacement de 100 mm/min.

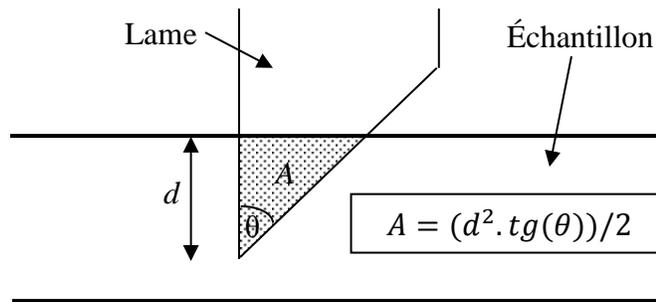


Figure 39 Relation quadratique de la surface de rupture A avec la profondeur de pénétration de la lame d dans la membrane.

Afin de vérifier la validité de la mesure de l'énergie de friction par la nouvelle approche proposée, des essais ont été réalisés en présence d'un lubrifiant et les résultats sont illustrés aux Figures 40 et 41. Quand la friction diminue en présence du lubrifiant, les résultats montrent que l'énergie de rupture globale (Figure 40) change très peu et ne semble pas être affectée par la friction. Par contre, l'énergie de friction globale diminue significativement avec la pénétration de la lame dans l'échantillon. Ces résultats confirment la possibilité d'obtenir une mesure valide de l'énergie de friction seule dans un test de perforation/coupure. L'énergie de rupture globale représente donc le travail dissipé par la perforation/coupure seule, sans friction. Il est également intéressant de noter que ces résultats sont en accord avec les mesures de l'énergie de rupture sans friction des matériaux élastomères sous pénétration par des aiguilles médicales (tirées de [15]), présentées au Tableau 5 ci-dessous. Les énergies de rupture par unité de surface mesurées avec et sans lubrifiant, en tenant compte des dispersions des mesures, sont les mêmes pour le néoprène et le nitrile. Les résultats de la présente étude confirment la validité de la méthode de détermination de l'énergie de rupture globale et son caractère intrinsèque pour la caractérisation de la rupture du matériau sous perforation/coupure en l'absence de friction. Il est à noter que les résultats en présence de lubrifiant présentent le même type de relation quadratique entre les énergies et le déplacement de la lame que celle présentée aux Figures 37 et 38.

Tableau 5 Énergies de rupture par la piqûre avec et sans lubrifiant, pour trois diamètres d'aiguilles médicales (23G, 25G et 28G) et deux matériaux (membrane de néoprène 1,6 mm et gant en nitrile 0,8 mm) (vitesse de déplacement de la sonde de 50 mm/min, écart-type entre parenthèses) [15].

Énergies de rupture par unité de surface (kJ/m ²)		Diamètre de l'aiguille		
		28G (0,35 mm)	25G (0,50 mm)	23G (0,65 mm)
Néoprène (1,6 mm)	Sans lubrifiant	1,8 (0,3)	1,7 (0,2)	1,7 (0,4)
	Avec lubrifiant	1,6 (0,2)	1,6 (0,3)	1,5 (0,3)
Gant en nitrile (0,8 mm)	Sans lubrifiant	3,8 (0,7)	4,1 (0,6)	4,2 (0,8)
	Avec lubrifiant	3,6 (0,6)	3,7 (0,5)	4,0 (0,7)

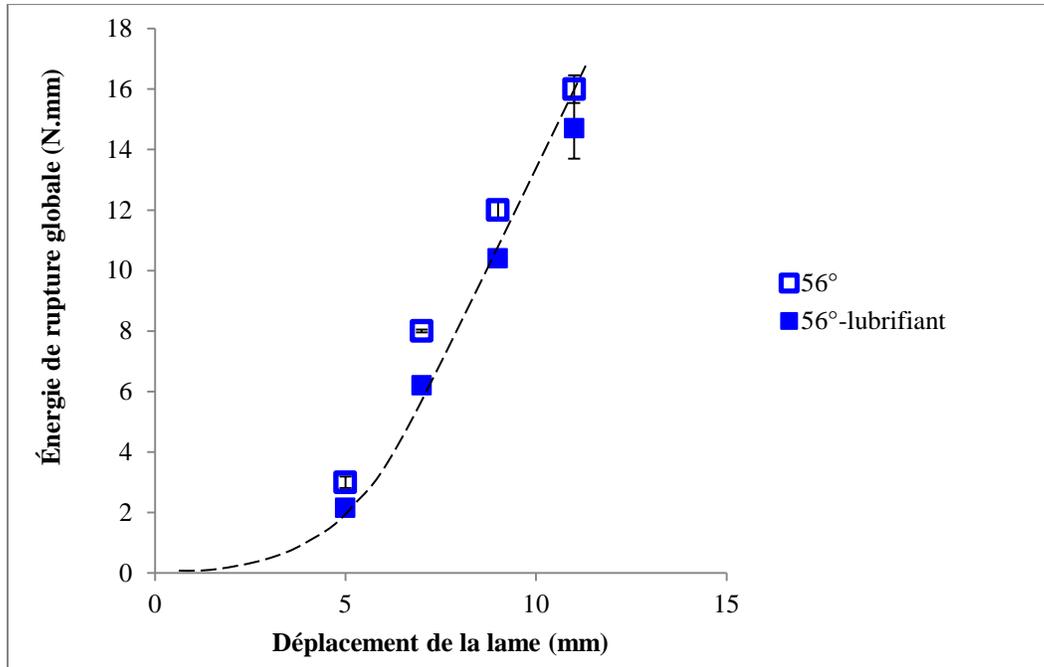


Figure 40 Variation de l'énergie de rupture globale en fonction du déplacement de la lame pointue de 56°, avec et sans présence d'un lubrifiant, membrane de néoprène de 1,6 mm d'épaisseur, vitesse de déplacement de 100 mm/min.

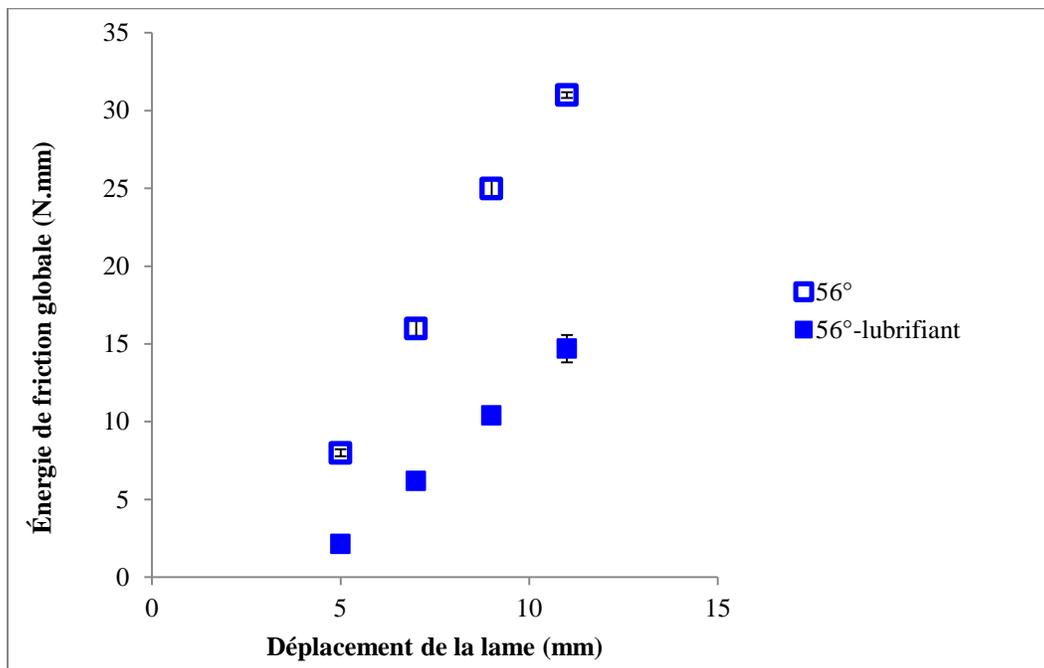


Figure 41 Variation de l'énergie de friction globale en fonction du déplacement de la lame pointue de 56°, avec et sans présence d'un lubrifiant, membrane de néoprène de 1,6 mm d'épaisseur, vitesse de déplacement de 100 mm/min.

3.8.3.3 Analyse selon la surface de rupture

La Figure 39 montre que la surface de rupture créée peut être déterminée par une fonction quadratique de la profondeur de pénétration de la lame. Cependant, comme le déplacement de la lame comprend à la fois la déformation de la membrane et la pénétration de sa pointe dans l'échantillon, il est très difficile de déterminer la profondeur de pénétration pour chaque déplacement, en tenant compte aussi des incertitudes des mesures expérimentales. Il a donc été décidé de mesurer directement la surface de rupture dans l'échantillon pour chaque déplacement suivant la méthode présentée à la section 2.5. Après chaque pénétration (déplacement de la lame), l'échantillon a été démonté, puis coupé en deux suivant le plan de la fissure créée (voir Figure 12). Facilement déterminable au microscope optique, la surface de rupture créée par la lame a été mesurée directement sur l'échantillon testé.

Les Figures 42 et 43 exposent les variations des énergies globales de rupture et de friction en fonction de la surface de rupture dans l'échantillon, mesurées par cette méthode, pour les trois types de lame. Il est très intéressant de constater que, contrairement à la méthode de mesure par la force de pénétration, toutes les lames donnent la même corrélation entre l'énergie globale de rupture et la surface de rupture (Figure 42). Une seule corrélation avec la surface de rupture pour les trois lames est aussi observée pour l'énergie globale de friction (Figure 43). Ces relations sont par ailleurs linéaires et passent par l'origine du repère. Elles confirment l'hypothèse d'une relation quadratique entre les énergies globales de rupture et de friction avec la profondeur de pénétration de la lame, expliquant ainsi la cause des valeurs négatives de ces énergies qui seraient obtenues pour les faibles profondeurs, si une relation linéaire était considérée.

Les pentes des droites des Figures 42 et 43 représentent respectivement l'énergie de rupture par unité de surface du matériau et l'énergie de friction par unité de surface entre la lame et le matériau. L'énergie de rupture par unité de surface est indépendante de la géométrie de la lame, et représente la performance du matériau en perforation/coupure. L'énergie de friction par unité de surface est aussi indépendante de la géométrie de la lame, mais varie en fonction du milieu environnant. Cette valeur permet de caractériser la friction entre la lame et le matériau dans un environnement spécifique. Comme la friction augmente la force de pénétration de la lame dans le matériau, elle contribue aussi à la performance de protection du matériau et pourrait être considérée comme une propriété semi-intrinsèque qui représente la condition en service de la perforation/coupure. Plus cette valeur est faible, plus le milieu est agressif et plus un niveau de protection élevé (avec des matériaux plus performants) devrait être considéré.

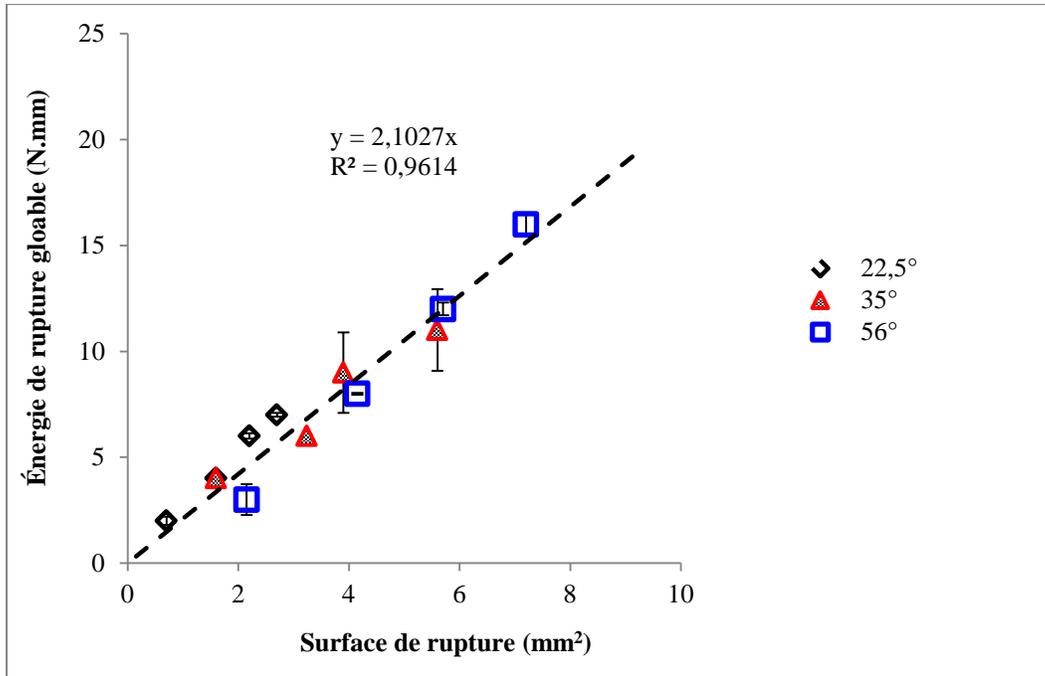


Figure 42 Variation de l'énergie de rupture globale en fonction de la surface de rupture, membrane de néoprène de 1,6 mm d'épaisseur, lames pointues de 22,5°, 35° et 56°, vitesse de déplacement de 100 mm/min.

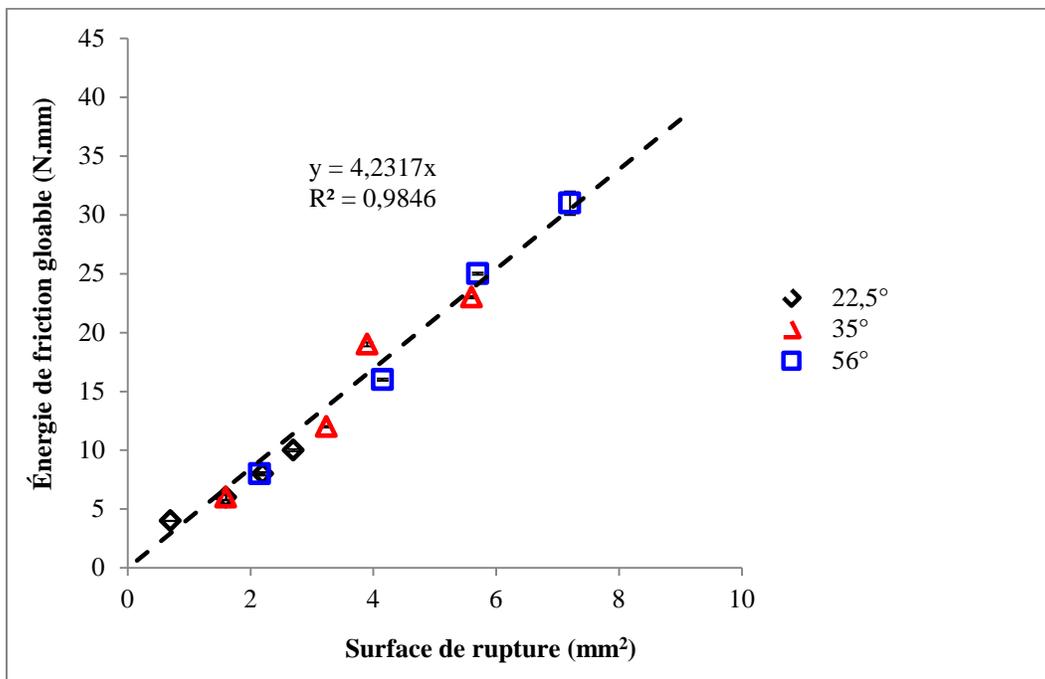


Figure 43 Variation de l'énergie de friction globale en fonction de la surface de rupture, membrane de néoprène de 1,6 mm d'épaisseur, lames pointues de 22,5°, 35° et 56°, vitesse de déplacement de 100 mm/min.

Une propriété intrinsèque caractérisant le matériau doit aussi être indépendante de la géométrie de l'échantillon testé. Afin de vérifier la validité de ces énergies de rupture et de friction par unité de surface pour caractériser la résistance à la perforation/coupure, des essais ont été réalisés suivant la même méthode utilisée pour les échantillons de nitrile de différentes épaisseurs. Les Figures 44 et 45 indiquent les variations des énergies globales de rupture et de friction mesurées en fonction de la surface de rupture pour deux épaisseurs de nitrile. Les deux épaisseurs donnent les mêmes résultats. Ces corrélations sont également linéaires et passent par l'origine du repère, confirmant la validité des énergies de rupture et de friction par unité de surface comme propriétés propres au matériau pour la caractérisation de la résistance à la perforation/coupure. Les pentes de ces droites donnent les valeurs de l'énergie de rupture du matériau et de l'énergie de friction par unité de surface avec la lame. Il faut souligner que cette friction dépend des propriétés tribologiques du matériau et de la lame. Par conséquent, l'énergie de friction par unité de surface doit être caractérisée pour chaque situation de travail.

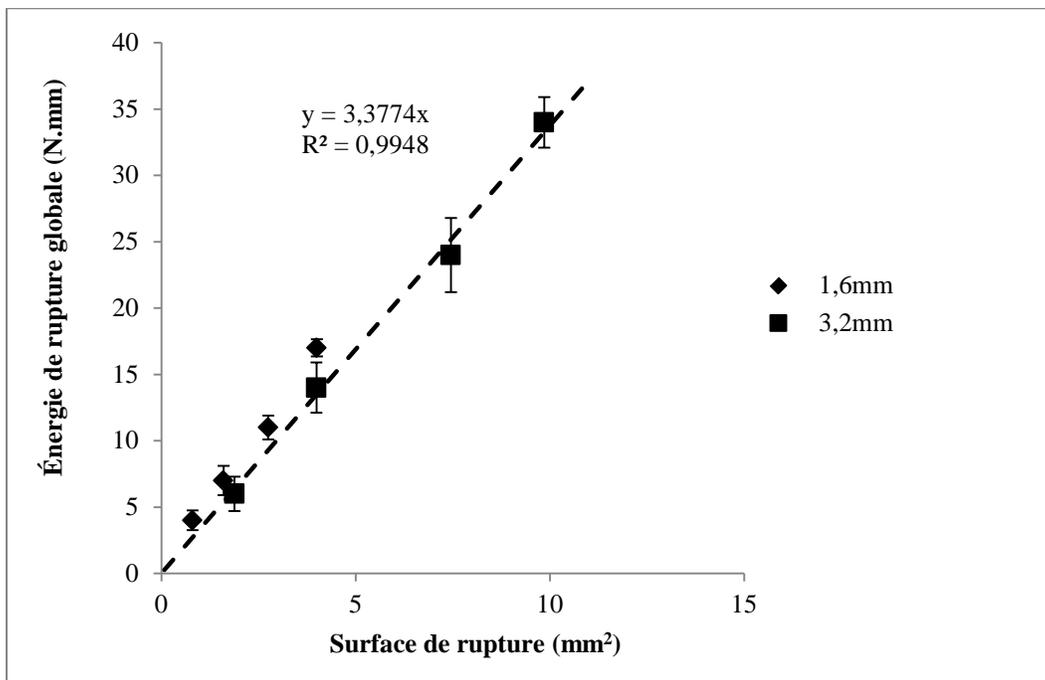


Figure 44 Variation de l'énergie de rupture globale en fonction de la surface de rupture, membranes de nitrile de 1,6 et 3,2 mm d'épaisseur, lame pointue de 35°, vitesse de déplacement de 100 mm/min.

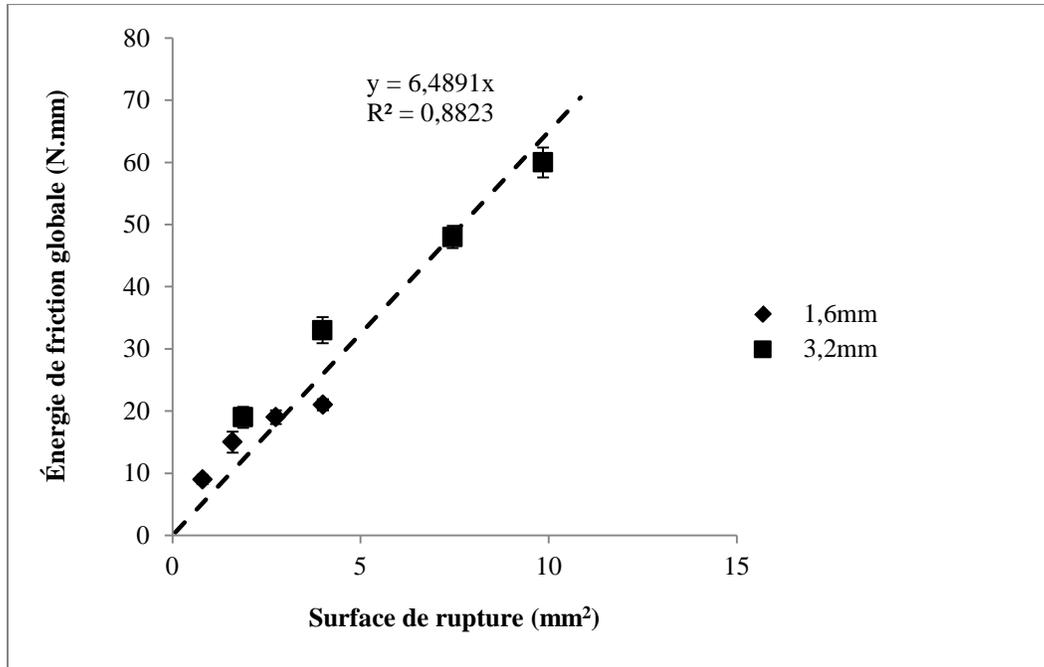


Figure 45 Variation de l'énergie de friction globale en fonction de la surface de rupture, membranes de nitrile de 1,6 et 3,2 mm d'épaisseur, lame pointue de 35°, vitesse de déplacement de 100 mm/min.

Le Tableau 6 résume les énergies de rupture et de friction par unité de surface du néoprène et du nitrile (tirées des Figures 41 à 45). On peut voir que ces énergies sont plus élevées pour le nitrile, expliquant la force de pénétration complète plus importante pour ce matériau, comme montrée plus haut (Figure 21). Il est intéressant de souligner que ces résultats concordent aussi avec ceux présentés au Tableau 5 pour les aiguilles médicales. Dans le cas de celles-ci, l'énergie de rupture est approximativement deux fois plus élevée pour le nitrile que pour le néoprène. Dans le cas des lames pointues, cette énergie est environ 60 % plus élevée pour le nitrile. Cette différence pourrait être due à la présence prédominante du Mode III (par contrainte de cisaillement agissant parallèlement au plan de la fissure et parallèlement au front de fissure) lors de la rupture par piqure.

Tableau 6 Énergies de rupture et de friction par unité de surface du néoprène et du nitrile.

	Énergie de rupture par unité de surface (kJ/m ²)	Énergie de friction par unité de surface (kJ/m ²)
Néoprène	2,1	4,2
Nitrile	3,4	6,5

Les résultats du Tableau 6 montrent également que l'énergie de friction est environ deux fois plus élevée que l'énergie de rupture par unité de surface pour ces deux matériaux. La friction contribue ainsi fortement à la force de pénétration d'une lame pointue. Lorsque le gant est étiré par le mouvement de la main (voir Figure 4), la friction diminue de même que la force de pénétration complète, comme le montre la Figure 26. Une autre situation où la friction peut être réduite est celle où il y a présence de lubrifiant. Afin de simuler cette situation, des tests ont été

réalisés avec et sans présence de lubrifiant, sur une membrane de néoprène de 1,6 mm d'épaisseur, pour les trois lames pointues. La Figure 46 signale que la relation entre l'énergie globale de rupture et la surface de rupture ne change pas en présence du lubrifiant, indiquant que cette énergie, déterminée selon la méthode proposée, est indépendante de la friction. D'autre part, toutes les lames montrent la même corrélation, confirmant l'unicité de l'énergie de rupture par unité de surface, qui est une propriété intrinsèque du matériau, quelle que soit la géométrie de la lame. Il faut souligner que les résultats de perforation par différentes aiguilles médicales avec et sans présence de lubrifiant (voir Tableau 5) ont également attesté que les énergies de rupture du néoprène et du nitrile ne sont pas affectées par la présence de lubrifiant ni par le diamètre de l'aiguille. La Figure 47 montre que l'énergie globale de friction diminue en présence du lubrifiant, en accord avec l'hypothèse formulée plus haut sur la contribution de cette énergie durant la perforation/coupure. Le Tableau 7 expose les valeurs des énergies de rupture et de friction par unité de surface du néoprène en perforation/coupure avec et sans présence de lubrifiant. Le lubrifiant n'affecte pas l'énergie de rupture, mais réduit d'environ 50 % l'énergie de friction du néoprène. Ceci confirme donc, que l'énergie de friction dépend des propriétés tribologiques du matériau et de la lame pointue.

Tableau 7 Énergies de rupture et de friction par unité de surface du néoprène de 1,6 mm d'épaisseur, avec et sans présence de lubrifiant.

	Énergie de rupture par unité de surface (kJ/m ²)	Énergie de friction par unité de surface (kJ/m ²)
Sans lubrifiant	2,3	4,1
Avec lubrifiant	2,2	2,2

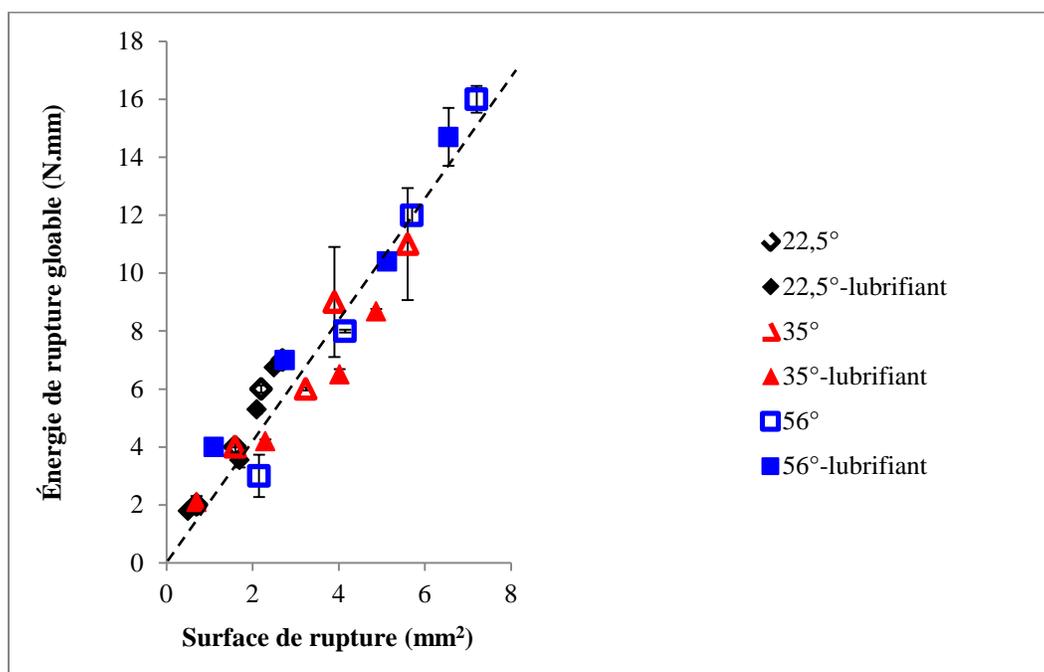


Figure 46 Variation de l'énergie de rupture globale en fonction de la surface de rupture avec et sans présence d'un lubrifiant, néoprène de 1,6 mm d'épaisseur, lames pointues de 22,5°, 35° et 56°, vitesse de déplacement de 100 mm/min.

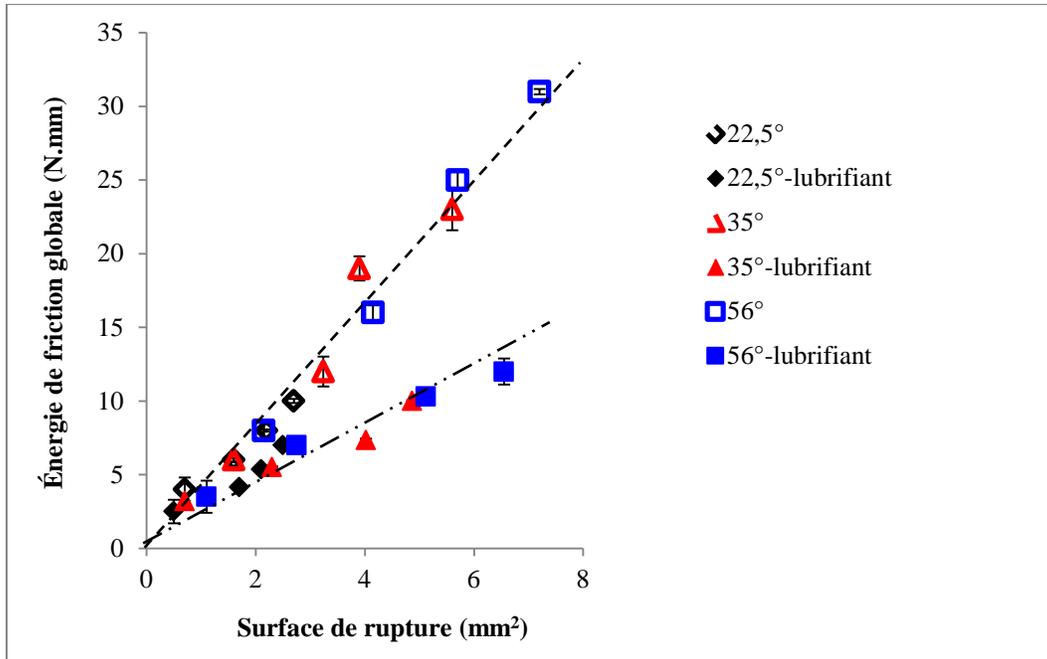


Figure 47 Variation de l'énergie de friction globale en fonction de la surface de rupture avec et sans présence d'un lubrifiant, néoprène de 1,6 mm d'épaisseur, lames pointues de 22,5°, 35° et 56°, vitesse de déplacement de 100 mm/min.

Le Tableau 8 compare les énergies de rupture par unité de surface associées à la perforation par une lame pointue, à la piqûre par une aiguille médicale, et à la coupure par une lame tranchante, pour une membrane de néoprène de 1,6 mm d'épaisseur [13, 15]. La valeur de l'énergie de rupture de la perforation par la lame pointue est la plus importante. Cette valeur est environ trois fois plus grande que la valeur de la coupure par la lame tranchante et supérieure à celle de la piqûre par l'aiguille médicale. Comme discuté plus haut, les modes de rupture de ces trois cas sont différents. La coupure par une lame tranchante est un Mode II pur de rupture par une contrainte de cisaillement, tandis que la perforation par une aiguille médicale et par une lame pointue implique un mode de rupture mixte : Mode I (par contrainte normale) et Mode III (par une contrainte de cisaillement). Considérant les géométries de ces deux agresseurs mécaniques, on peut facilement déduire que le Mode I est plus prépondérant dans le cas de la lame pointue. Cette observation pourrait expliquer en partie les valeurs plus faibles de l'énergie de rupture observées pour les aiguilles médicales. Plus le Mode III est important, plus l'énergie de rupture est faible. La valeur de l'énergie de rupture associée à la lame tranchante est la plus faible à cause du faible diamètre de l'ouverture à l'extrémité de la fissure [27,43].

Tableau 8 Énergies de rupture associées à la perforation par une lame pointue, à la piqûre par une aiguille et à la coupure par une lame tranchante, pour du néoprène de 1,6 mm d'épaisseur.

Type d'agresseur mécanique	Énergie de rupture par unité de surface (kJ/m²)
Lame pointue	~2,15
Aiguille médicale	~1,8
Lame tranchante	~0,7

3.8.4 Application de la méthode proposée sur les gants de protection

Les compositions et structures des gants de protection sont très diversifiées. Souvent, les gants sont constitués d'une combinaison de plusieurs matériaux ayant des propriétés particulières pour répondre à différents types d'utilisation. Dans cette section, quelques gants de protection ont été caractérisés suivant la méthode proposée, soit d'évaluer les énergies globales de rupture et de friction par unité de surface, en réalisant des tests de chargement/déchargement et réinsertion de la lame, présentés à la section 3.8.3.1, et en mesurant les surfaces de rupture par microscopie optique. Deux caractéristiques majeures différencient les gants des membranes d'élastomère analysées plus haut, soit la composition hétérogène des gants et leur épaisseur plus mince. Les mesures des énergies de rupture et de friction ont été réalisées sur deux modèles de gants : 1) Ansell Hycron 27-805, composés entièrement d'un enduit de nitrile sur un renfort en jersey coton, 2) Mapa Chem-Ply 414, faits avec la superposition de deux couches de néoprène (voir Tableau 2). Le premier modèle est de composition hétérogène. Il possède une épaisseur assez grande pour pouvoir effectuer trois tests à trois différentes profondeurs de pénétration à l'intérieur de l'échantillon, permettant ainsi de réaliser trois mesures de surface de rupture et d'énergies globales de rupture et de friction. Le deuxième modèle étant très mince, un seul test a pu être réalisé, jusqu'à la pénétration complète de l'échantillon, donnant ainsi une seule mesure de ces paramètres.

3.8.4.1 Matériaux hétérogènes

La Figure 48 montre les corrélations entre les énergies globales de rupture et de friction avec la surface de rupture pour le gant Ansell Hycron 27-805, pour les trois lames pointues. On peut constater qu'il y a une unique corrélation pour chaque énergie avec la surface de rupture, quel que soit l'angle à la pointe de la lame. Ces résultats confirment la validité de l'approche proposée pour déterminer les énergies de rupture et de friction par unité de surface dans les matériaux hétérogènes. Ces énergies étant des paramètres intrinsèques pour la caractérisation de la résistance à la perforation/coupure par les lames pointues comme discuté plus haut.

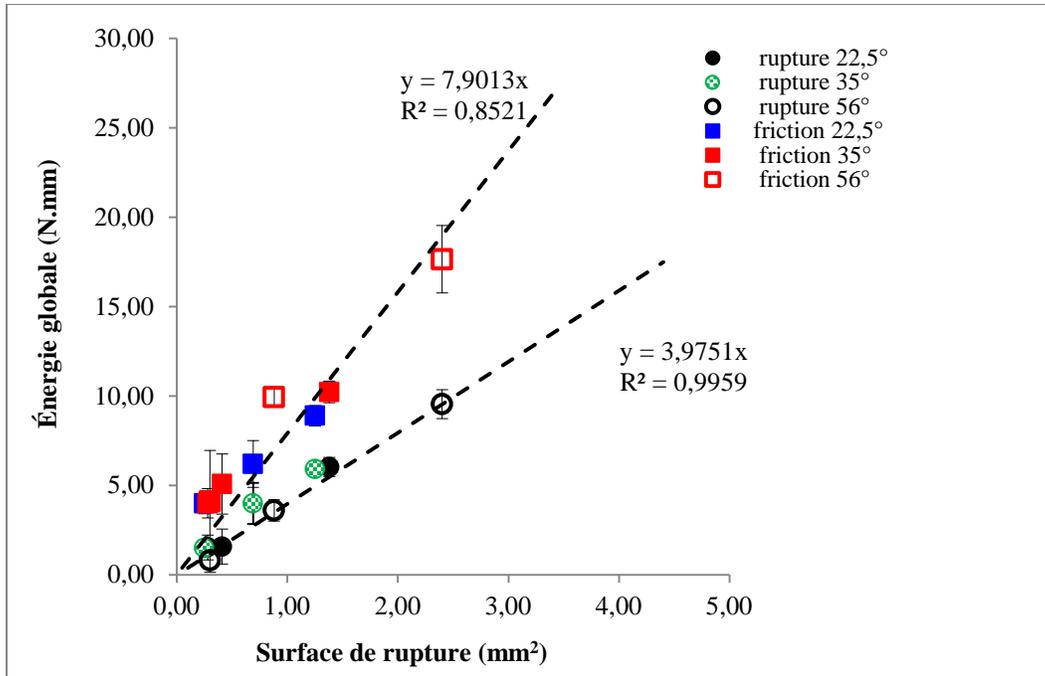


Figure 48 Variations des énergies globales de rupture et de friction en fonction de la surface de rupture, lames pointues de 22,5°, 35° et 56°, vitesse de sollicitation de 100 mm/min, gants de protection Ansell Hycron 27-805.

3.8.4.2 Gants de faible épaisseur

Pour les utilisations qui nécessitent une grande dextérité, les gants sont souvent de faible épaisseur et fabriqués avec des matériaux plus performants. Pour ces gants, il est très difficile, voire impossible, de créer des pénétrations de différentes profondeurs dans l'épaisseur. À la place, la surface de rupture a été variée en changeant l'angle à la pointe de la lame (voir Figure 39). La Figure 49 indique les énergies globales de rupture et de friction des gants de protection Mapa Chem-Ply 414, de 0,75 mm d'épaisseur, avec les trois lames utilisées dans cette étude. Les résultats confirment les relations linéaires entre les énergies globales de rupture et de friction et la surface de rupture. Il est donc possible d'effectuer une seule mesure dans le cas des gants de faible épaisseur. Les énergies globales de rupture et de friction peuvent être déterminées en réalisant un test de perforation/coupe jusqu'à la pénétration complète du matériau (c.-à-d. en détectant le contact de la pointe de la lame avec la face inférieure de l'échantillon, à l'aide d'une feuille d'aluminium, comme présenté à la section 2.4.5). La surface de rupture peut être calculée à partir de l'épaisseur de l'échantillon (comme étant égale à la profondeur de pénétration) et de l'angle de la lame, selon la relation indiquée à la Figure 39. Le Tableau 9 résume les valeurs des énergies globales de rupture et de friction par unité de surface de ces gants. Les énergies de rupture et de friction par unité de surface sont équivalentes quel que soit l'angle de la lame, confirmant de nouveau la validité de la méthode.

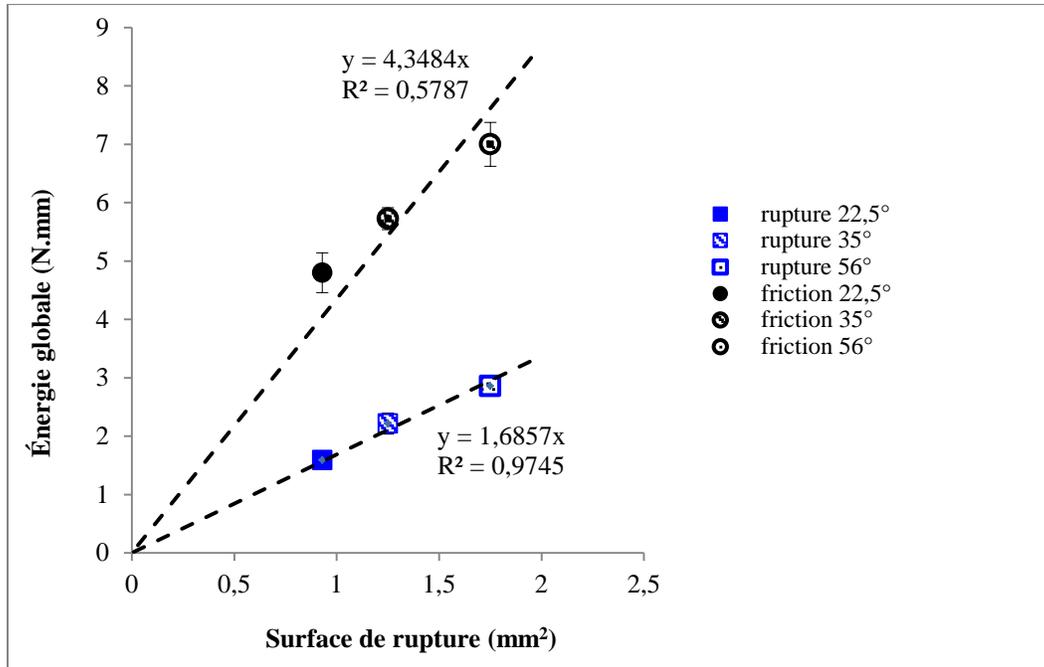


Figure 49 Variations des énergies globales de rupture et de friction en fonction de la surface de rupture, trois types de lame pointue, vitesse de sollicitation de 100 mm/min, gants Mapa Chem-Ply 414, 0,75 mm d'épaisseur.

Tableau 9 Moyennes (écarts-type) des énergies globales de rupture et de friction par unité de surface des gants Mapa Chem-Ply 414, 0,75 mm d'épaisseur.

Angle de la pointe (°)	Énergie globale de friction (N.mm)	Énergie globale de rupture (N.mm)	Énergie de friction (kJ/m²)	Énergie de rupture (kJ/m²)
22,5	4,80 (0,18)	1,59 (0,03)	5,16 (0,19)	1,71 (0,03)
35	5,73 (0,33)	2,22 (0,16)	4,58 (0,26)	1,77 (0,13)
56	7,00 (0,37)	2,86 (0,35)	4,00 (0,21)	1,63 (0,2)

3.8.4.3 Méthode simplifiée

Il est important de souligner qu'il est assez laborieux de réaliser des pénétrations de différentes profondeurs dans une épaisseur relativement faible des gants de protection, et de mesurer ensuite la surface de pénétration à l'aide d'un microscope. D'autre part, pour des échantillons très minces, il est particulièrement difficile de déterminer avec précision les énergies de rupture et de friction séparément, car elles sont très faibles. Comme il a été discuté plus haut, l'énergie de friction par unité de surface contribue à augmenter la force de pénétration de la lame dans le matériau et peut être considérée comme un paramètre semi-intrinsèque pour la caractérisation de la résistance à la perforation/coupure des gants de protection. Ce paramètre est indépendant des géométries de l'échantillon et de la lame et reflète leurs propriétés tribologiques. Celles-ci sont fortement affectées par le milieu dans lequel les gants sont utilisés, comme lorsque des

lubrifiants sont présents tels que des huiles, des graisses, des liquides, etc. Plus la friction est réduite, plus le milieu est agressif, et plus il est nécessaire que les gants soient performants en termes d'énergie de rupture par unité de surface, soit le paramètre intrinsèque qui caractérise la résistance du matériau à la perforation/coupure. Les énergies de rupture et de friction sont toujours présentes et contrôlent ensemble la force de pénétration de la lame pointue dans le matériau. Dans la pratique, pour caractériser les gants de protection, il faut déterminer simultanément ces deux énergies. La somme de ces valeurs reflète ainsi la performance du gant dans un milieu de travail donné. Il est donc plus simple d'utiliser l'énergie totale de pénétration par unité de surface pour la classification des gants de protection. Pour illustrer cette méthode simplifiée, des mesures ont été effectuées sur deux modèles de gants différents en tricot enduit, choisis comme exemples de gants de protection souvent rencontrés dans les secteurs de la fabrication de machines, de meubles ou de produits métalliques :

- **Ansell Hyflex 11-601** : Paume enduite de polyuréthane, doublure en tricot de nylon, 0,7 mm d'épaisseur.
- **Ansell Hyflex 11-900** : Paume enduite de nitrile, doublure en tricot de nylon, 1 mm d'épaisseur.

Le Tableau 10 montre les énergies totales de pénétration par unité de surface de ces deux modèles de gants, mesurées avec les trois lames utilisées dans cette étude. Des tests de perforation/coupure ont été réalisés, en déformation libre, jusqu'à la perforation complète de l'échantillon. Pour le modèle Ansell Hyflex 11-601, la déchirure de la double feuille d'aluminium a été observée pour certaines répliques, ce qui a empêché d'avoir le contact électrique. De fait, des tests supplémentaires ont dû être faits afin d'assurer un minimum de 12 répliques. Ces résultats démontrent que l'énergie totale par unité de surface est indépendante de la géométrie de la lame. Cette approche plus simple peut donc aussi être utilisée pour effectuer rapidement une caractérisation quantitative et objective de la résistance à la perforation/coupure des gants de protection dans un milieu de travail donné, avec sa propre condition de friction.

Tableau 10 Moyenne (écart-type) de l'énergie totale, de la surface de rupture et de l'énergie totale par unité de surface, gants Ansell Hyflex 11-601 et 11-900, vitesse de sollicitation de 100 mm/min.

Angle de la pointe (°)	U_{Totale} (N.mm)	A (mm ²)	U_{Totale}/A (kJ/m ²)
Ansell Hyflex 11-601			
22,5	0,85	0,19	4,48 (1,84)
35	1,84	0,32	5,68 (1,01)
56	3,83	0,68	5,60 (1,02)
Ansell Hyflex 11-900			
22,5	6,87	0,42	16,23 (0,47)
35	9,49	0,72	13,13 (2,38)
56	23,38	1,53	15,30 (3,31)

4. CONCLUSION

Ces travaux de recherche ont permis de mieux comprendre les mécanismes combinés de perforation et de coupure engendrés par la perforation par une lame pointue de membranes d'élastomère. Ils ont démontré les paramètres mécaniques fondamentaux qui gouvernent la perforation/coupure par des lames pointues. En effet, la fissure se propage sous un mode mixte avec différentes contributions du Mode I (par contrainte normale au plan de fissure) et du Mode III (par contrainte de cisaillement parallèle au plan de la fissure et au front de fissure). L'étude a également mis en évidence l'importance du phénomène de friction entre la lame et le matériau. Les influences des conditions en service sur les résultats de perforation par des lames pointues ont aussi été examinées. Plusieurs tests ont été réalisés sur des membranes d'élastomère, ainsi que sur quelques matériaux de gants de protection.

Contrairement aux méthodes d'essai normalisées actuelles qui utilisent la force maximale pour caractériser la résistance à la pénétration, il est essentiel, dans le cas des lames pointues, de mesurer la force correspondant au moment où la pointe de la lame touche la face inférieure de la membrane de protection. Cette force, appelée « force de pénétration complète », est beaucoup plus faible que la force maximale de pénétration. Le point où la lame touche la face inférieure de l'échantillon a été déterminé par un contact électrique, en fixant sous l'échantillon une feuille d'aluminium reliée à la lame par un circuit électrique. Les résultats montrent que la force de pénétration complète, bien qu'étant une mesure quantitative de la performance du matériau en perforation/coupure, est fortement dépendante de la géométrie de la lame et de l'épaisseur de l'échantillon. Une caractérisation objective de la performance d'un matériau nécessite généralement l'évaluation de paramètres intrinsèques du matériau, qui ne dépendent pas des géométries de l'agresseur mécanique ou de l'échantillon utilisé.

Pour obtenir cette caractérisation objective de la performance du matériau, une méthode connue de travaux précédents, consistant à éliminer la friction par un étirement progressif de l'échantillon avant la perforation, a été appliquée au cas des lames pointues. Les résultats indiquent, qu'en augmentant l'étirement, il n'existe pas de zone où la friction latérale entre la lame et l'échantillon est complètement éliminée. La rupture par déchirement se produit avant l'élimination de la friction latérale. L'énergie de rupture mesurée, qui comprend à la fois l'énergie de rupture et l'énergie de friction, est donc surestimée par cette approche.

Une autre approche a donc été proposée dans cette étude pour caractériser la résistance à la perforation/coupure en termes d'énergies de rupture et de friction par unité de surface. Cette méthode porte sur la soustraction de la contribution de la friction de l'énergie de perforation/coupure totale afin de déterminer l'énergie de rupture globale dans un test de perforation par une lame pointue. La surface de rupture peut être mesurée par la microscopie optique afin de calculer l'énergie de rupture par unité de surface du matériau.

L'énergie de rupture par unité de surface est constante, quelles que soient les géométries de la lame et de l'échantillon, permettant ainsi une caractérisation objective et intrinsèque de la résistance à la perforation/coupure par des lames pointues. L'énergie de friction par unité de surface est aussi indépendante des géométries de la lame et de l'échantillon, mais varie en fonction du milieu environnant. Cette valeur caractérise la friction entre la lame et le matériau dans un environnement spécifique. Les résultats montrent que la lubrification des lames pointues

n'affecte pas l'énergie de rupture, mais réduit d'environ 50 % l'énergie de friction du matériau. Cette friction contribue à augmenter la force de pénétration de la lame dans le matériau. Elle joue un rôle important dans la performance de protection du matériau et pourrait être considérée comme une propriété semi-intrinsèque qui représente la condition en service de la perforation/coupure. Plus la friction est faible, plus le milieu est agressif, et plus un niveau de protection élevé (avec des matériaux plus performants) devrait être considéré. Cette énergie de friction est environ deux fois plus élevée que l'énergie de rupture par unité de surface.

Cette approche, développée avec des membranes d'élastomère, a été vérifiée sur quelques modèles de gants de protection. Les résultats confirment son applicabilité pour le cas des matériaux hétérogènes, qui sont largement utilisés dans les gants de protection. Pour des gants de très faible épaisseur, utilisés souvent dans les applications exigeant une grande dextérité, une méthode simplifiée a aussi été proposée. Elle consiste à mesurer l'énergie nécessaire pour une pénétration complète de la lame à travers l'épaisseur du gant. En divisant par une estimation de la surface de rupture créée (calculée à partir de la géométrie de la lame et l'épaisseur de l'échantillon), l'énergie totale par unité de surface est aussi indépendante des géométries de la lame et de l'échantillon. Cette méthode simplifiée, plus rapide, pourrait être utilisée pour la caractérisation quantitative des gants de protection contre la perforation et la coupure combinées. Pour l'appliquer à tous les types de gants de protection, il est recommandé d'améliorer la technique permettant d'obtenir la force de pénétration complète. En effet, la feuille d'aluminium utilisée sous l'échantillon, pour avoir un contact électrique avec la lame, est difficile à manipuler et à fixer. De plus, elle se déchire parfois prématurément, nécessitant ainsi la réalisation de tests supplémentaires pour avoir un nombre de répliques adéquat.

Les connaissances générées dans ces travaux de recherche permettront aux fabricants de gants et de vêtements de protection de développer des matériaux plus performants aux agresseurs mécaniques multiples.

BIBLIOGRAPHIE

1. Lamarche D., D. Robitaille, A. Barbeau, S. Blouin et A. Perreault. « La CSST en bref 2012 ». Rapport des statistiques annuelles 2012. Commission de la santé et de la sécurité du travail du Québec, 2012, 25 pages. Disponible en ligne : http://www.csst.qc.ca/publications/200/Documents/DC200_1047_6web.pdf. [Dernière consultation : 2 octobre 2015].
2. Commission de la santé et de la sécurité du travail. « Dépôt de données central et régional (DDCR) ». Données de 2009 à 2011 mises à jour au 1er juillet de l'année x+3, Traitement des données par l'IRSST, Montréal, QC, 16 octobre 2014.
3. Sorock, G.S., D.A. Lombardi, R. Hauser, E.A. Eisen, R.F. Herrick et M.A. Mittleman. « A case-crossover study of transient risk factors for occupational acute hand injury ». *Occupational Environmental Medicine*, vol. 61, n° 4, 2004, p. 305-311.
4. Sorock, G.S., D.A. Lombardi, D.K. Peng, R. Hauser, E.A. Eisen, R.F. Herrick et M.A. Mittleman. « Glove use and the relative risk of acute hand injury: A case-crossover study ». *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, vol. 1, n° 3, 2004, p.182-190.
5. Caple, D. « Evaluation of cut resistance gloves in the south Australian meat industry ». *South Australia WorkCover Corporation*, Adelaide, Australia, 2000, p. 25.
6. Enforcement Liaison Committee. (2000). « Hand knife accidents in the meat industry ». First-Aid (No. LAC 31/5): Health and Safety Executive / Local Authorities. Disponible en ligne: <http://products.ihc.com/Ohsis-SEO/313808.html>. [Dernière consultation : 2 octobre 2015].
7. Nag, P. K. et A. Nag. « Hazards and health complaints associated with fish. Processing activities in India-Evaluation of a low-cost intervention ». *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 37, n°2, 2007, p. 125-132.
8. Lipsky, J. « Hand Protection 101: On the production line, time equals money. Selecting the proper protective glove can reduce the amount of time lost on the line from hand-related injuries ». *The National Provisioner*. 1 avril 2004. Disponible en ligne: <http://www.provisioneronline.com/articles/94293-hand-protection-101-1>. [Dernière consultation : 2 octobre 2015].
9. Vézina, N. « Protection des mains dans l'industrie de la viande et de la volaille ». IRSST, Profil-Recherche, Document PR-110, 1990. Disponible en ligne: <http://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/PR-110.pdf>. [Dernière consultation : 2 octobre 2015].

10. Vu-Khanh, T., P. I. Dolez, L. Harrabi, J. Lara, C. Larivière, G. Tremblay et S. Nadeau. « Caractérisation de la souplesse des gants de protection par des méthodes mécaniques et biomécaniques ». IRSST, Études et recherches, Rapport R-506, 2007, 90 pages. Disponible en ligne: <http://www.irsst.qc.ca/media/documents/pubirsst/r-506.pdf>. [Dernière consultation : 2 octobre 2015].
11. Harrabi, L., P. I. Dolez, T. Vu-Khanh et J. Lara. « Optimization in the selection of protective gloves for resistance to mechanical risks ». Proceeding of the 2nd International Conference of Applied Research on Textile, Monastir, Tunisia, 30 Nov–2 Dec 2006, p. 4.
12. Lara, J., D. Turcot, R. Daigle et J. Boutin. « La résistance des gants de protection à la coupure - Développement d'une méthode d'essai ». IRSST, Études et recherches, Rapport R-103, 1995, 28 pages. Disponible en ligne: <http://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-103.pdf>. [Dernière consultation : 2 octobre 2015].
13. Vu-Khanh, T., T. B. N. Vu, C. T. Nguyen et J. Lara. « Gants de protection : étude sur la résistance des gants aux agresseurs mécaniques multiples ». IRSST, Études et recherches, Rapport R-424, 2005, 86 pages. Disponible en ligne: <http://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-424.pdf> [Dernière consultation : 2 octobre 2015].
14. Lara, J. « Développement d'une méthode d'évaluation de la résistance à la perforation des gants de protection ». IRSST, Études et recherches, Rapport R-059, 1992, 40 pages. Disponible en ligne: <http://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-059.pdf>. [Dernière consultation : 2 octobre 2015].
15. Vu-Khanh, T., P. I. Dolez, C. T. Nguyen, C. Gauvin et J. Lara. « Caractérisation de la résistance des gants à la piqûre par les aiguilles. Mise au point d'une méthode d'essai ». IRSST, Études et recherches, Rapport R-711, 2011, 123 pages. Disponible en ligne: <http://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-711.pdf>. [Dernière consultation : 2 octobre 2015].
16. ASTM F1790-05. « Standard test method for measuring cut resistance of materials used in protective clothing ». ASTM International, Philadelphia, 2005.
17. ISO : 13997 (1999). « Protective clothing – Mechanical properties - Determination of resistance to cutting by sharp objects ». International Organization for Standardization, 1999.
18. ASTM F1342-05. « Standard test method for protective clothing material resistance to puncture ». ASTM International, Philadelphia, 2005.
19. ISO : 13996 (1999). « Protective clothing – Mechanical properties – Determination of resistance to puncture ». International Organization for Standardization, 1999.
20. EN : 388 (2004). « Gants de protection contre les risques mécaniques ». Comité européen de normalisation, 2004.

21. ASTM F2878-10. « Standard test method for protective clothing material resistance to hypodermic needle puncture ». ASTM International, Philadelphia, 2010.
22. Gauvin, C. et J. Lara. « Gants résistant aux piqûres d'aiguilles - Évaluation de la dextérité manuelle, de la sensibilité tactile et du confort pour les travailleurs - Étude exploratoire ». IRSST, Études et recherches, Rapport R-783, 2013, 72 pages. Disponible en ligne: <http://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-783.pdf>. [Dernière consultation : 2 octobre 2015].
23. Tellier, C., J. Lara et R. Daigle. « La sélection et le développement de gants de protection contre les lacérations dans le secteur de la fabrication des produits en métal ». IRSST, Études et recherches, Rapport R-234, 1999, 68 pages. Disponible en ligne: <http://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-234.pdf>. [Dernière consultation : 2 octobre 2015].
24. Vu, T. B. N., T. Vu-Khanh et J. Lara. « Effects of Friction on Cutting Resistance of Protective Materials ». *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 18, n° 1, 2005, p. 23-36.
25. Nguyen, C. T., T. Vu-Khanh et J. Lara. « Puncture characterization of rubber membranes ». *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 42, n° 1, 2004, p. 25-33.
26. Nguyen, C., T. Vu-Khanh, P. I. Dolez et J. Lara. « Puncture of elastomer membranes by medical needles. Part I: Mechanisms ». *International Journal of Fracture*, vol. 155, n° 1, 2009, p. 75-81.
27. Nguyen, C. T., T. Vu-Khanh, P. I. Dolez et J. Lara. « Puncture of elastomer membranes by medical needles. Part II: Mechanics ». *International Journal of Fracture*, vol. 155, n°1, 2009, p. 83-91.
28. Xinglong, G., Y. Xu, W. Zhu, S. Xuan, W. Jiang et W. Jiang. « Study of the knife stab and puncture-resistant performance for shear thickening fluid enhanced fabric ». *Journal of Composite Materials*, vol. 48, n°6, 2014, p.641-657.
29. Wang, L., S. Zhang, W. M. Gao et X. Wang. « FEM analysis of knife penetration through woven fabrics ». *Computer Modelling in Engineering & Science*, vol. 20, n°11, 2007, p. 11-20.
30. Ankersen, J. « Quantifying the forces in stabbing incidents ». Scotland, University of Glasgow, College of Science and Engineering, Ballistics and Impact Group, Department of Mechanical Engineering, 1999, 192 pages. Ph.D. thesis. Disponible en ligne: <http://theses.gla.ac.uk/2798/1/1999ankersenphd.pdf>. [Dernière consultation : 2 octobre 2015].
31. Dolez, P. I., M. Azaiez et T. Vu-Khanh. « Characterization of the resistance of protective gloves to pointed blades ». Dans: *Performance of Protective Clothing and Equipment: Emerging Issues and Technologies STP 1544-EB*, 2012, p. 354-370, DOI:10.1520/STP104087.

32. Vu-Khanh, T. « Determination of the impact fracture parameters in ductile polymers ». *Polymer*, vol. 29, n° 11, 1988, p. 1979-1984.
33. Vu-Khanh, T. « Impact Fracture Characterization of Polymer with Ductile Behavior ». *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 21, n°2, 1994, pp. 83-90.
34. Vu-Khanh, T. « The Impact Fracture of Polymer: Unanswered Questions ». *Trends in Polymer Science*, Vol. 5, n° 11, 1997, pp.356-360.
35. Vu-Khanh, T. et Z. Yu. « Mechanisms of brittle–ductile transition in toughened thermoplastics ». *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 26, n° 3, 1997, pp. 177-183.
36. Massé, S., J. Lara, C. Sirard et R. Daigle. « Basic principle used in the development of a new cut-test apparatus for standardization ». Dans: *Performance of Protective Clothing: ASTM STP 1273*, vol. 6, 1997, p. 66-83.
37. Payot, F. « Measurement and control method for cutting resistance of protective clothing ». Dans: *Performance of Protective Clothing: ASTM STP 1133*, James P. McBriarty and Norman W. Henry, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, vol. 4, 1992, p. 17-25.
38. Turner, R. H. et D. M. Smith. « Development of a new cut test for protective gloves against machine-driven knives ». Dans: *Performance of Protective Clothing: ASTM STP 1273*, Jeffrey O. Stull and Arthur D. Schwope, Eds., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, vol. 6, 1997, p. 126-139.
39. Lara, J., N. F. Nélisse, S. Côté et H. J. Nélisse. « Development of a method to evaluate the puncture resistance of protective clothing materials ». Dans: *Performance of Protective Clothing: ASTM STP 1133*, James P. McBriarty and Norman W. Henry. Eds. American Society for testing and Materials, Philadelphia, vol.4. 1992, p. 26-37.
40. Kuwahara, Y., Y. Shima, D. Shirayama, M. Kawai, K. Hagihara, T. Hirano, J. Arimitsu, A. Ogata, T. Tanaka et I. Kawase. « Quantification of hardness, elasticity and viscosity of the skin of patients with systemic sclerosis using a novel sensing device (Vesmeter): a proposal for a new outcome measurement procedure ». *Rheumatology* (Oxford, England), vol. 47, n° 7, 2008, p. 1018-1024.
41. Gauvin, C., O. Darveau, C. Robin et J. Lara. « Analysis of test parameters and criteria for characterizing and comparing puncture resistance of protective gloves to needles ». Dans: *Performance of Protective Clothing and Equipment: Emerging Issues and Technologies*, Shepherd, A.M., Anaheim, ASTM, STP 1544, 2012, 9th volume, p. 340-353.
42. Nguyen, C. T., T. Vu-Khanh et J. Lara. « A study on the puncture resistance of rubber materials used in protective clothing ». *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 42, n° 1, 2004, p. 25-33.

43. Rivlin, R. S. et A. G. Thomas. « Rupture of rubber: I. Characteristic energy for tearing ». *Journal of Polymer Science*, vol. 10, n° 3, 1953, p. 291–318.
44. Lake, G. J. et O. H. Yeoh. « Measurement of rubber cutting resistance in the absence of friction ». *International Journal of Fracture*, vol. 14, n° 5, 1978, p. 509–526.
45. Lake, G. J. et O. H. Yeoh. « Effect of crack tip sharpness on the strength of vulcanized rubbers ». *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, vol. 25, n° 6, 1987, p. 1157–1190.
46. Greensmith, H. W. « Rupture of rubber: X. The change in stored energy on making a small cut in a test piece held in simple extension ». *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 7, n° 3, 1963, p. 993–1002.
47. Mooney, M. « A theory of large elastic deformation ». *Journal of Applied Physics* vol. 11, 1940, p. 582-592.

ANNEXE A : EFFET DE L'USURE DE LA LAME SUR LA PERFORATION DES GANTS DE PROTECTION

Pour maximiser l'usage des lames, la possibilité d'utiliser la même pour plus d'un test a été examinée. Pour ce faire, des tests de perforation/coupure ont été réalisés sur trois matériaux différents (Tableau 11), en utilisant, pour chaque matériau, la même lame.

Tableau 11 Caractéristiques des gants de protection utilisés pour évaluer l'effet de l'usure de la lame sur la perforation.

Modèle	Image	Description
Gant Ansell 8-352		Doublure en interlock/enduit de néoprène
Gant Superior Touch S13SXPUQ		Tricot de Dyneema/enduit de polyuréthane
3 couches de textile SuperFabric® (HDM Inc., Oakdale, MN)		3 couches d'un matériau composé de plaques dures juxtaposées sur un renfort textile

Les résultats de la Figure 50 illustrent que, à l'exception du matériau SuperFabric®, chaque lame peut être utilisée sans usure progressive notable pour 12 tests successifs. Aucun changement de la valeur de la force de pénétration complète n'a été observé pour les deux gants, Superior Touch S13SXPUQ et Ansell 8-352. Pour assurer la validité des résultats de l'étude, il a été recommandé de ne pas utiliser chaque lame plus de cinq fois. Les lames ont également été nettoyées avant leur utilisation pour retirer la couche d'huile de protection qui les recouvrait.

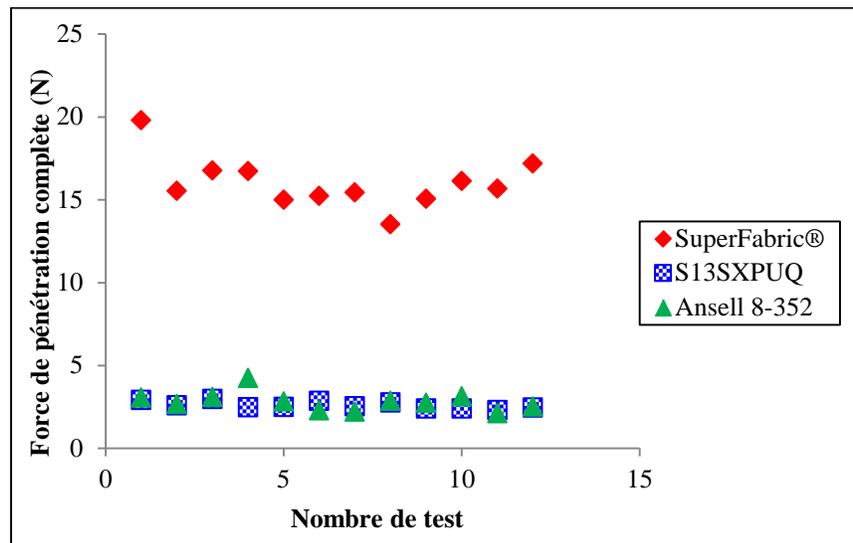


Figure 50 Effet de l'usure de la lame sur la force de pénétration complète pour trois matériaux : Gant Superior Touch S13SXPUQ, Gant Ansell 8-352 et trois couches de SuperFabric®, lame pointue de 35°, vitesse de déplacement de 250 mm/min.