

É

Équipements de protection

Études et recherches

RAPPORT R-559



Mise au point de méthodes pour mesurer l'adhérence des gants de protection

Étude préliminaire

*Chantal Gauvin
Patricia Dolez
Lotfi Harrabi
Jérôme Boutin
Yvan Petit
Toan Vu-Khanh
Jaime Lara*



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

Mission *travaillent pour vous !*

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.

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

Assurer la diffusion des connaissances, jouer un rôle de référence scientifique et d'expert.

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 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 CSST.
Abonnement : 1-877-221-7046

Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales
2008

ISBN : 978-2-89631-261-0 (version imprimée)

ISBN : 978-2-89631-262-7 (PDF)

ISSN : 0820-8395

IRSST - Direction des communications
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : 514 288-1551
Télécopieur : 514 288-7636
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca
Institut de recherche Robert-Sauvé
en santé et en sécurité du travail,
avril 2008



Équipements de protection

Études et recherches

RAPPORT R-559

Mise au point de méthodes pour mesurer l'adhérence des gants de protection

Étude préliminaire

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.

*Chantal Gauvin¹, Patricia Dolez², Lotfi Harrab², Jérôme Boutin¹,
Yvan Petit², Toan Vu-Khanh², Jaime Lara³*

¹Service soutien à la recherche et à l'expertise, IRSST

²Département de génie mécanique, École de technologie supérieure

³Service de la recherche, IRSST

Cliquez recherche
www.irsst.qc.ca



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

CONFORMÉMENT AUX POLITIQUES DE L'IRSS

Les résultats des travaux de recherche publiés dans ce document
ont fait l'objet d'une évaluation par des pairs.

SOMMAIRE

L'utilisation de gants peu adhérents force le travailleur à appliquer un effort musculaire supplémentaire pour retenir l'objet manipulé, pouvant conduire à une sensation d'inconfort, de douleur ou même à des problèmes musculo-squelettiques des membres supérieurs. L'objectif principal de cette étude préliminaire était d'explorer différentes approches pour caractériser le niveau d'adhérence des gants de protection.

L'un des moyens pour y arriver a été de modifier une méthode biomécanique mise au point lors d'une étude précédente à l'IRSSST (Larivière et al., 2004), afin d'obtenir des mesures plus fiables de l'adhérence des gants tenant compte de l'interaction main/gant/objet. La méthode modifiée consiste à déplacer à vitesse constante un dynamomètre sur lequel un sujet applique une force de préhension constante. Elle a été utilisée pour mesurer le coefficient de friction à l'interface entre le gant et la surface en acier du dynamomètre dans une tâche de pincement impliquant tous les doigts de la main, ainsi que le coefficient de friction à l'interface entre la main et la surface interne des gants. Étant donné qu'il ne s'agit que d'une étude préliminaire, cette méthode a été testée avec un nombre restreint de six volontaires et de trois modèles de gants. Les sujets ont aussi répondu à un questionnaire sur leur perception du niveau d'adhérence des gants. Un dispositif mécanique permettant d'appliquer une force en pincement sur le dynamomètre sans l'intervention de sujets humains a également permis d'obtenir des informations pour interpréter les résultats obtenus avec la méthode biomécanique.

Par ailleurs, une méthode de laboratoire consistant à faire glisser une butée plate en acier à une vitesse constante sur une pièce de gant fixée sur un porte-échantillon a été développée et utilisée pour mesurer les coefficients de friction de 27 modèles de gants. Les résultats obtenus avec cette méthode ont permis d'identifier les trois modèles de gants utilisés dans les essais biomécaniques, sélectionnés pour leurs niveaux d'adhérence différents.

Cette étude a montré que les coefficients de friction dynamiques à l'interface gant/acier obtenues par les trois méthodes (méthode mécanique, méthode biomécanique avec les sujets et montage biomécanique sans sujets) sont équivalents pour deux types de gants sélectionnés. Pour le troisième type de gant, le coefficient de friction statique étant beaucoup plus élevé que le coefficient dynamique, les sujets n'ont pas pu laisser glisser le dynamomètre de manière uniforme, rendant les données expérimentales issues de la méthode biomécanique inutilisables. En effet, ce gant était beaucoup plus adhérent au niveau de sa surface externe avec l'acier qu'il ne l'était au niveau de sa surface interne avec la main.

La méthode biomécanique a permis d'observer que les caractéristiques différentes de l'un des modèles de gants par rapport aux deux autres ont eu un effet majeur sur le comportement du gant lorsqu'il est porté. Les tests de perception ont révélé que la sensation d'adhérence que les sujets perçoivent est davantage dominée par l'interface gant/acier que par l'interface main/intérieur du gant. Quant à la méthode mécanique, elle est la seule à avoir pu mesurer, en plus du coefficient de friction dynamique, le coefficient de friction statique de la plupart des gants. Cette méthode, bien que perfectible selon certaines recommandations proposées, présente l'avantage de faciliter le contrôle des variables affectant les mesures d'adhérence. C'est une méthode d'essai simple, reproductible, peu coûteuse et accessible aux fabricants de gants.

REMERCIEMENTS

Nous tenons tout d'abord à remercier toutes les personnes qui nous ont aidés dans la réalisation de ce projet, par ordre alphabétique : Jean-François Bernard, Bernard Caron, Renaud Daigle, Pierre Drouin, Thierry Petitjean-Roget et Christian Sirard, de l'IRSST, de même que Jean-Sébastien Mérette de l'ÉTS.

Nous voulons également remercier les personnes de l'IRSST qui se sont portées volontaires pour participer à cette étude.

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE.....	i
REMERCIEMENTS.....	iii
TABLE DES MATIÈRES	v
Liste des tableaux.....	vii
Liste des figures	viii
1. INTRODUCTION	1
1.1 Problématique santé et sécurité du travail	1
1.2 L'adhérence des gants.....	2
1.3 Objectifs de l'étude	3
1.4 Principes généraux de l'adhérence.....	4
1.5 Méthodes de caractérisation de l'adhérence	6
1.5.1 Méthodes mécaniques	6
1.5.2 Méthodes biomécaniques	7
2. MÉTHODES EXPÉRIMENTALES	11
2.1 Description de la méthode mécanique	11
2.1.1 Instrumentation	11
2.1.2 Procédure expérimentale	12
2.1.3 Matériaux	13
2.1.4 Analyse des données	13
2.2 Description de la méthode biomécanique	14
2.2.1 Montage expérimental.....	14
2.2.2 Sujets.....	16
2.2.3 Gants	17
2.2.4 Procédure expérimentale	18
2.2.5 Analyse des données	19
2.3 Dispositif de pincement mécanique appliqué au montage de la méthode biomécanique	20
2.3.1 Montage et procédure expérimentale	20
2.3.2 Analyse des données	21
2.4 Tests de perception	21
3. RÉSULTATS	23
3.1 Tests mécaniques	23
3.1.1 Validation de la méthode mécanique	23
3.1.2 Forme typique des courbes force-déplacement.....	25
3.1.3 Variabilité inter- et intra-gant.....	26
3.1.4 Classification des gants selon leur adhérence	27
3.2 Méthode biomécanique.....	28

3.2.1	Pincement mécanique appliqué au montage de la méthode biomécanique.....	28
3.2.2	Tests biomécaniques	29
3.2.3	Effet de la configuration du montage et de la répartition des forces de chaque côté du dynamomètre.....	32
3.3	Tests de perception	34
4.	DISCUSSION.....	37
4.1	Partie mécanique.....	37
4.2	Partie biomécanique.....	38
4.3	Comparaison des méthodes mécaniques et biomécanique	39
4.4	Comparaison entre les tests de perception et biomécanique.....	42
4.4.1	Interface main/acier et gants/acier.....	43
4.4.2	Interface main/intérieur gants.....	44
5.	CONCLUSION.....	45
6.	RECOMMANDATIONS	47
7.	RÉFÉRENCES	49
ANNEXE A :	Dessins techniques de la butée et du porte-échantillon	55
ANNEXE B :	Instructions d'utilisation du TDM-100 modifié pour l'adhérence.....	57
ANNEXE C :	Caractéristiques des 27 modèles de gants.....	59
ANNEXE D :	Formulaire de consentement.....	61
ANNEXE E :	Questionnaire du test de perception.....	67
ANNEXE F :	Tableaux de résultats des tests mécaniques	69
ANNEXE G :	Particularités des courbes force-déplacement.....	73

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1	Caractéristiques des sujets et tailles des gants	17
Tableau 2.2	Gants sélectionnés pour les tests biomécaniques.....	17
Tableau 3.1	Résultat des tests sur du néoprène pour la détermination de la variabilité de la mesure	24
Tableau 3.2	Coefficients de friction dynamiques des gants G1, G2 et G3 avec l'acier obtenus avec le dispositif de pincement mécanique	29
Tableau 3.3	Valeurs des coefficients de friction dynamique μ_d pour les différentes interfaces.....	31
Tableau 3.4	Coefficients de friction dynamique (μ_d) selon la configuration du montage et la répartition des forces sur les côtés du dynamomètre.	33
Tableau 3.5	Résultats des tests de perception des gants.....	34
Tableau 3.6	Niveaux moyens de fatigue et de difficulté perçus par les sujets	35
Tableau - C.1	Caractéristiques des 27 modèles de gants testés.....	59
Tableau - F.1	Forme des courbes force-déplacement pour les 27 modèles de gants et les trois séries de mesure (s-d avec pic statique, d sans pic statique).....	69
Tableau - F.2	Coefficients de friction statique et dynamique pour les trois séries de mesure de chaque modèle de gant (valeurs moyennes et CV en pourcentage).....	70
Tableau - F.3	Coefficients de friction statique et dynamique et matériau de surface pour chaque modèle de gant (valeurs moyennes et CV en pourcentage).....	71

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Montage mis au point lors de l'activité précédente qui visait la caractérisation de l'adhérence des gants à partir des coefficients de friction statique : (a) Dynamomètre, (b) Montage expérimental (tiré de [28])	3
Figure 1.2	Mesure de l'adhérence par la méthode d'étirage avec masses ajoutées [23].....	6
Figure 1.3	Mesure de l'adhérence par la méthode d'étirage avec machine de traction [30].....	6
Figure 1.4	Forces impliquées dans la mesure du coefficient de friction par des méthodes biomécaniques employant un dynamomètre.....	8
Figure 2.1	Photo du TDM-100 modifié pour la mesure de la friction	12
Figure 2.2	Principe de fonctionnement du TDM modifié.....	12
Figure 2.3	Variation de la force de friction en fonction du déplacement de la butée de friction pour le cas du néoprène pour une $F_{normale}$ de 5 N	14
Figure 2.4	Dynamomètre de type pince (forme plate) pour l'évaluation biomécanique de l'adhérence des gants	15
Figure 2.5	Montage expérimental pour l'évaluation biomécanique de l'adhérence des gants	16
Figure 2.6	Système de positionnement du bras pour la méthode biomécanique d'évaluation de l'adhérence des gants	16
Figure 2.7	Schéma simplifié des forces impliquées dans la prise en pincement du dynamomètre.....	19
Figure 2.8	Dispositif de pincement mécanique appliqué au montage de la méthode biomécanique	20
Figure 3.1	Influence de la valeur de la force normale sur les coefficients de friction statique et dynamique	23
Figure 3.2	Forme typique des courbes force-déplacement de type s-d (avec pic statique) et d (sans pic statique).....	25
Figure 3.3	Classification des gants selon leur niveau d'adhérence.....	27
Figure 3.4	Exemple de variation du coefficient de friction des gants G1, G2 et G3 avec l'acier, obtenu avec le dispositif de pincement mécanique.....	28
Figure 3.5	Variation du coefficient de friction de la surface externe des gants G1, G2 et G3 avec l'acier, obtenue pour un sujet avec la méthode biomécanique	30
Figure 3.6	Variation du coefficient de friction de la main nue avec l'acier et avec la surface interne des gants G1, G2 et G3, obtenue pour un sujet avec la méthode biomécanique	30
Figure 3.7	Histogramme des coefficients de friction dynamique μ_d pour les différentes interfaces	31
Figure 3.8	Schéma des configurations 1 et 2 pour les essais biomécaniques	33

Figure 4.1	Comparaison des coefficients de friction dynamiques obtenus par les différentes méthodes	40
Figure 4.2	Variation du coefficient de friction pour le gant G3 (nitrile) avec l'acier obtenue par les différentes méthodes	42
Figure 4.3	Comparaison du coefficient de friction mesuré par la méthode biomécanique et de la perception des sujets pour (a) les interfaces main/acier et gants/acier, et (b) les interfaces main/intérieur gants	43
Figure - G.1	Variation de la force horizontale en fonction du déplacement de la butée avec comportement de type s-d montrant la présence d'un décalage dans le déplacement initial de la butée (gant Best 7000P).....	73
Figure - G.2	Variation de la force maximale en fonction de la valeur du déplacement de la butée correspondant pour les trois échantillons du modèle Best 7000P	74
Figure - G.3	Oscillations dans la variation de la force horizontale en fonction du déplacement de la butée (Gant Best 6780-R)	75
Figure - G.4	Variation de la force horizontale en fonction du déplacement de la butée montrant l'absence d'atteinte d'un plateau (Gant Ansell 16-300).....	76

1. INTRODUCTION

1.1 Problématique santé et sécurité du travail

Les blessures aux mains représentent environ 20% des lésions indemnisées par la Commission de la santé et de la sécurité du travail (CSST) [1]. Ces lésions sont principalement causées par des agresseurs mécaniques comme des objets coupants ou pointus, des agresseurs chimiques (causant des brûlures, dermatites, etc.) ou des agresseurs physiques tels que le feu et les températures extrêmes. Le port de gants de protection adaptés au type de risque peut diminuer le nombre et la gravité de ces lésions. Cependant, la difficulté que les travailleurs éprouvent à exécuter certaines tâches avec des gants de protection peut les amener à refuser d'en porter. Il a été effectivement démontré que le port de gants de protection a un effet sur le confort, la dextérité, la fatigue musculaire et la performance manuelle [2-10].

Des études sur la coordination de la force de préhension de la main [11, 12] ont révélé que pour soulever et tenir un objet, les individus appliquent de manière naturelle une force de préhension plus grande que ne le demande la condition adhérente de l'objet. La différence entre la force de préhension plus élevée que nécessaire appliquée par un individu, et la force de préhension minimale pour éviter que l'objet ne glisse représente une marge de sécurité pour prévenir le glissement (« safety margin » [12]). Or, l'ampleur de cette marge de sécurité peut être grandement modifiée lorsque l'individu porte des gants de protection [13-16].

Des études ont montré que la souplesse, l'adhérence, l'ajustement et l'épaisseur des gants sont parmi les paramètres ayant un effet important sur la performance manuelle [17] et sur la force de préhension, pouvant mener à la fatigue musculaire [5, 7, 14, 15, 18-20]. L'épaisseur des gants change la perception tactile du poids ou de l'adhérence d'un objet incitant l'individu à appliquer une force de préhension plus élevée que nécessaire [5, 15, 20]. La rigidité d'un gant force l'individu à exercer un effort supplémentaire pour plier le matériau au niveau des doigts [18, 19]. Un projet antérieur, réalisé dans une collaboration entre l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST) et l'École de technologie supérieure (ÉTS), a permis le développement d'une méthode mécanique de caractérisation de la souplesse des gants de protection [21].

Le facteur déterminant dans l'effort qu'applique un individu pour tenir un objet sans qu'il ne glisse est sans aucun doute l'adhérence des gants, qui fait l'objet de cette étude préliminaire [2]. Des recherches [7, 14] ont montré que le manque d'adhérence entre l'objet et le gant (l'objet glisse), ou entre la main et le gant, oblige l'individu à appliquer un effort musculaire supplémentaire des muscles fléchisseurs des doigts pour retenir les pièces manipulées. Cet effort supplémentaire implique inévitablement des tensions additionnelles et potentiellement de la fatigue musculaire localisée pouvant être à l'origine de certains problèmes musculo-squelettiques. Cette fatigue musculaire conduit à une sensation d'inconfort, de malaise et de douleur selon le degré de fatigue. Le tout est susceptible d'interférer avec la précision des gestes professionnels et la coordination motrice, augmentant ainsi la probabilité de gestes manqués. La fatigue musculaire peut également affecter à la baisse la perception du poids des objets [22]. Ceci entraîne la diminution de l'effort exercé par les travailleurs pour lever ou pousser des objets, ce qui peut mener à des accidents de travail.

1.2 L'adhérence des gants

L'adhérence des gants aux pièces manipulées dépend du coefficient de friction entre le matériau du gant et la pièce. Plus ce coefficient est élevé, plus le niveau d'adhérence sera élevé.

Une revue de la littérature a montré qu'il n'existe pas de méthode normalisée permettant de caractériser le niveau d'adhérence des gants de protection. Certaines normes ont été identifiées dans la littérature concernant les mesures de friction pour d'autres types d'applications : ASTM D1894 [23] « Standard Test Method of Static and Kinetic Coefficients of Friction of Plastic Films and Sheeting- 2001 », ASTM D3412 -01 [24] « Standard Test Method for Coefficient of Friction, Yarn to Yarn, 2001 » et ASTM D 3108-01 [25] « Standard Test Method for Coefficient of Friction Yarn to Solid Material, 2001 ». Mais aucune de ces méthodes normalisées n'est applicable aux gants. Des travaux réalisés spécifiquement sur les gants, avec le développement d'une méthode de caractérisation du coefficient de friction statique de matériaux de gants sur un volant de voiture, peuvent néanmoins être mentionnés [26]. Cependant, la méthode utilisée ne donne accès qu'au coefficient de friction statique et fait appel à une géométrie trop spécifique par rapport aux conditions générales d'utilisation des gants de protection.

Des méthodes biomécaniques impliquant des tâches de préhension fonctionnelles avec des sujets humains ont été développées pour étudier l'effet des gants sur les efforts musculaires de préhension [5, 7, 13-16, 18-20, 27]. Toutefois, ces méthodes biomécaniques ne permettent généralement que de mesurer que le coefficient de friction statique. À notre connaissance, aucune étude n'a développé ou utilisé de méthode biomécanique impliquant des tâches fonctionnelles pour mesurer le coefficient de friction dynamique des gants.

Le principe de fonctionnement de l'une de ces méthodes biomécaniques a été utilisé dans une activité précédente à l'IRSST (considérée comme la phase I de la présente étude préliminaire [28]), pour caractériser le niveau d'adhérence des gants tenant compte de l'interaction main/gant. Ce système de mesure biomécanique était basé sur la méthode du « laisser tomber » (méthode précisée à la section 1.5.2). Il était constitué d'un dynamomètre de forme plate permettant de mesurer la force de préhension lors d'une prise digitale en pincement impliquant tous les doigts de la main (voir Figure 1.1). Dans cette étude précédente, le niveau d'adhérence de la main nue et de deux modèles de gants (un en nitrile lisse et l'autre en caoutchouc naturel rugueux) avait été évalué sur des pièces en Téflon et des pièces en aluminium et en acier contaminées avec de l'huile, avec 30 sujets volontaires. L'analyse des résultats avait confirmé la présence d'une différence significative entre un gant rugueux dit « adhérent » et les deux autres conditions, soit la main nue et avec le gant lisse, pour le Téflon. Cependant, l'analyse de fidélité avait révélé des erreurs standards de mesure très élevées, entre 26% et 76%, ce qui rendait très difficile la discrimination du niveau d'adhérence dans les conditions étudiées. Le manque de fidélité des résultats avait été attribué à la technique de mesure de la friction qui avait été adoptée, dans laquelle les sujets, de leur propre initiative, faisaient glisser le dynamomètre au lieu d'exercer une force externe d'une manière continue jusqu'à ce que le dynamomètre glisse. Cette grande variabilité et le manque de fiabilité de cette méthode de mesure a également été rapporté dans une autre étude [29].

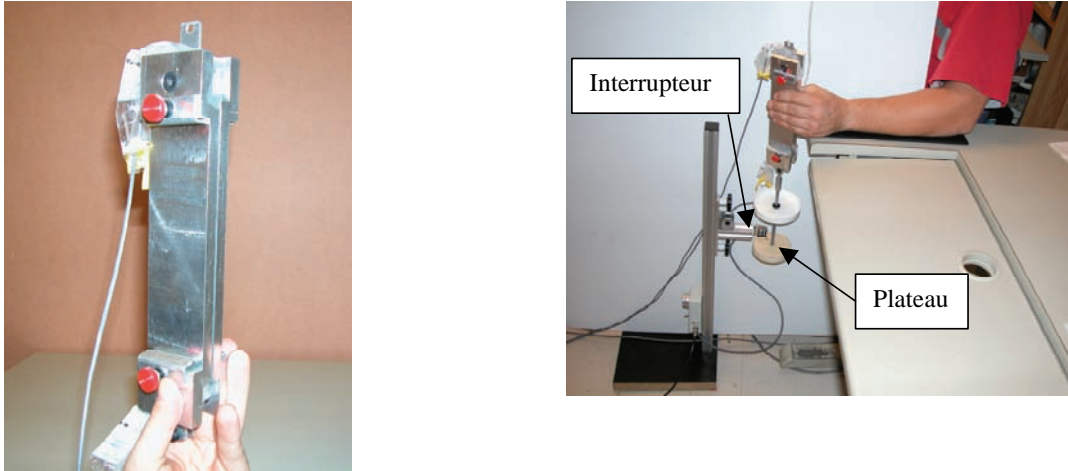


Figure 1.1 Montage mis au point lors de l'activité précédente qui visait la caractérisation de l'adhérence des gants à partir des coefficients de friction statique : (a) Dynamomètre, (b) Montage expérimental (tiré de [28])

L'adhérence compte parmi les propriétés recherchées par les utilisateurs de gants de protection. Cependant, faute d'une méthode d'essai fiable permettant de caractériser cette propriété, les utilisateurs doivent faire appel à la méthode essais-erreurs pour choisir les gants les mieux adaptés au type d'usage et offrant la meilleure adhérence.

1.3 Objectifs de l'étude

Ce projet est préliminaire et avait comme objectif principal d'explorer différentes approches pour caractériser le niveau d'adhérence des gants de protection, en vue de faire des recommandations pour orienter les recherches futures dans le développement d'une méthode d'essai fiable et adéquate.

Les moyens utilisés ont été de modifier la méthode d'essai biomécanique mise au point lors d'une étude précédente et de valider cette méthode de manière préliminaire auprès d'un nombre restreint de sujets et avec un nombre réduit de modèles de gants. Ces modèles de gants ont été sélectionnés suite à la caractérisation des coefficients de friction de plusieurs gants par une méthode mécanique de laboratoire développée également dans le cadre de ce projet. Des essais de perception auprès des sujets ont aussi été réalisés et les résultats comparés avec ceux des méthodes biomécanique et mécanique.

Les objectifs spécifiques de cette étude étaient les suivants :

- 1) Caractériser les coefficients de friction de gants composés de matériaux différents par une méthode mécanique de laboratoire développée en modifiant l'appareil TDM-100 de mesure de la résistance à la coupure. À partir de ces résultats, sélectionner trois modèles de gants ayant des coefficients de friction différents pour les mesures dynamométriques.
- 2) Modifier le protocole de mesures avec le dynamomètre, développé lors d'une activité précédente [28], pour obtenir de l'information sur le coefficient de friction dynamique des gants. Caractériser le niveau d'adhérence à l'interface main/gant/objet des gants sélectionnés

auprès d'un nombre restreint des sujets étant donné la portée limitée de l'étude. Obtenir des informations sur la perception des sujets concernant l'adhérence des gants pour examiner la validité des résultats obtenus par les mesures dynamométriques.

- 3) Comparer les résultats obtenus par la méthode mécanique de laboratoire, la méthode biomécanique avec le dynamomètre et le test de perception des sujets concernant le niveau d'adhérence des gants.

1.4 Principes généraux de l'adhérence

Dans le cas qui concerne l'utilisation des gants de protection, le terme adhérence est utilisé pour décrire le phénomène de friction qui se développe entre les matériaux de gants et les pièces manipulées. Cette friction est caractérisée par la force entre les deux surfaces en contact qui s'oppose à leur mouvement tangentiel relatif [30]. Il a été démontré expérimentalement en 1699 par Amonton que la force de friction est proportionnelle à la force normale appliquée et indépendante de la surface apparente de contact [31]. Ces approximations classiques restent généralement vraies dans des conditions de pression appliquée modérée [32]. Cependant, pour les fibres textiles de même que pour la peau, la force de friction F dépend de la force normale N . Saville [33] et Comaish et Bottoms [34] ont montré, respectivement, qu'un meilleur accord avec les données expérimentales est obtenu en utilisant la relation : $F = a.N^n$ avec des valeurs de l'index de friction n comprises entre 0.67 et 1.0 pour les textiles et inférieures à 1.0 pour la peau.

Au milieu du XVIIIème siècle, Euler définit le coefficient de friction μ comme le rapport entre la force de friction et la force normale appliquée, et établit la distinction entre les coefficients de friction statique μ_s et dynamique μ_k [31]. Le coefficient de friction statique caractérise la condition pour laquelle les deux surfaces quittent leur état de repos relatif et se mettent en mouvement l'une par rapport à l'autre, alors que le coefficient de friction dynamique est mesuré dans le cas d'un déplacement relatif des deux surfaces [32]. Généralement, le coefficient de friction dynamique est plus petit que le coefficient de friction statique [35].

Au niveau microscopique, plusieurs phénomènes contribuent à la friction [31]. En ce qui concerne les métaux, de loin les plus étudiés, cinq processus entrent en jeu : l'adhésion entre des aspérités des deux surfaces qui forment des liaisons atomiques intimes sous la forme d'un soudage à froid, les interactions mécaniques entre les aspérités de surface, le labourage d'une surface par les aspérités de l'autre, la déformation et/ou la fracture des couches de surfaces, et l'action de matière externe, principalement des débris d'usure, emprisonnée entre les deux surfaces en mouvement relatif.

De manière générale, la friction entre deux matériaux fait entrer en jeu les contributions de différents paramètres [36-41] :

- La composition et les propriétés des matériaux,
- Le fini de surface de chaque matériau (présence ou non de lubrifiants, contaminants, etc.),
- La nature de l'environnement ambiant,
- La force maintenant les solides en contact,
- La vitesse du mouvement relatif,

- La nature du déplacement,
- La nature du contact (surfaces conformes),
- La géométrie de contact et la topographie de surface,
- La température de la zone interfaciale,
- L'histoire antérieure de glissement de ces matériaux, et éventuellement
- Les caractéristiques des appareils appliquant les forces de déplacement.

Pour les polymères, d'autres paramètres s'ajoutent à cause des propriétés particulières de ceux-ci, en particulier la viscoélasticité, la sensibilité au taux de déformation et la faible conductivité thermique [31]. La friction des polymères inclut donc les contributions additionnelles du cisaillement de la zone interfaciale et de la déformation élastique du matériau.

Dans le cas des élastomères, qui sont fréquemment utilisés dans les gants de protection, les processus contrôlant le phénomène de la friction sont complexes et encore mal connus. En particulier, la friction dans les élastomères augmente avec la vitesse de déplacement, et diminue avec la charge et la rugosité [42]. Il a également été montré que la friction interfaciale joue un rôle important, avec la génération, lors du glissement des surfaces l'une par rapport à l'autre, d'ondes de Schallamach, qui, comme des dislocations géantes, se forment sur le côté en compression de la membrane élastomère et se déplacent à travers la zone de contact vers le côté en tension [31].

De manière générale, il a été établi que, de même que pour les métaux, la friction dans les élastomères peut être analysée comme la somme de contributions d'adhésion et de déformation [42]. Étant donné que ce terme de déformation inclut la contribution de l'hystérésis du matériau, il devient significatif dans le cas des élastomères présentant un caractère viscoélastique important. Par exemple, des auteurs ont établi que la relation entre le coefficient de friction μ d'échantillons de caoutchoucs styrène-butadiène de compositions différentes et ce avec différentes particules de renfort, mesuré par la méthode de la résistance au patin mouillé (wet skid) en utilisant des feuilles de carbure de silice de différentes rugosités, et les propriétés viscoélastiques du matériau [43], est:

$$\mu = a + b \frac{\tan \delta}{E'}$$

où E' et $\tan \delta$ sont respectivement le module et la tangente de l'angle δ de perte du matériau, et a et b sont des constantes.

1.5 Méthodes de caractérisation de l'adhérence

1.5.1 Méthodes mécaniques

Un certain nombre de techniques, identifiées dans la littérature, ont été mises au point afin de permettre la caractérisation mécanique de l'adhérence de matériaux similaires à ceux utilisés pour la confection des gants de protection, c'est-à-dire les textiles et les caoutchoucs.

1.5.1.1 Méthodes d'étirage

Le principe des méthodes d'étirage est simple : il s'agit de faire glisser un bloc de masse M sur une surface rigide recouverte du matériau à tester, par exemple une étoffe textile [33]. Le bloc est muni d'un câble inséré dans une poulie sans friction. Selon la configuration choisie, la force horizontale F peut être appliquée sur le bloc par l'ajout incrémentiel de poids W à l'extrémité du câble (voir Figure 1.2) ou par une machine de traction équipée d'une cellule de charge (voir Figure 1.3). Le coefficient de friction μ est représenté par :

$$\mu = \frac{F \text{ ou } W}{Mg}$$

Ces méthodes de mesure de l'adhérence par étirage donnent accès à la fois au coefficient de friction statique, alors que la masse se met en mouvement, et dynamique, lorsqu'elle se déplace. Elles sont utilisées dans le cadre de la norme ASTM 1894 [23].

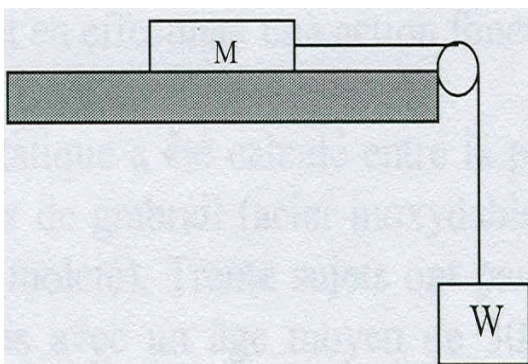


Figure 1.2 Mesure de l'adhérence par la méthode d'étirage avec masses ajoutées [23]



Figure 1.3 Mesure de l'adhérence par la méthode d'étirage avec machine de traction [30]

1.5.1.2 Le système Kawabata

Le système d'évaluation Kawabata pour les textiles permet la caractérisation des propriétés mécaniques et de surface des textiles [44]. Entre autres, le testeur de surface détermine le coefficient de friction dynamique du matériau à l'aide d'un palpeur fait de dix tiges d'acier accolées et appliquant une force normale de 50 grammes [33]. La force nécessaire pour faire glisser le tissu sous le palpeur est enregistrée.

1.5.1.3 Description sommaire de la méthode mécanique

La méthode d'essai de laboratoire mise au point dans le cadre de ce projet pour caractériser l'adhérence des gants est basée sur le principe de la « méthode de l'étirage » présentée à la section 1.5.1.1. Cette méthode consiste à faire glisser à une vitesse contrôlée une surface en acier lisse sur un échantillon de gant qui est fixé sur un porte-échantillon. Le montage est décrit en détail à la section 2.1 de ce rapport.

1.5.2 Méthodes biomécaniques

Il existe certaines méthodes biomécaniques impliquant des tâches de préhension avec des sujets humains qui permettent d'évaluer l'effet de différents paramètres sur la force de préhension exercée par un sujet qui tient un objet, tels que le type de matériau, le fini de surface, l'adhérence, la présence de lubrifiant, etc. Ces méthodes permettent également de mesurer le coefficient de friction statique entre la main (gantée ou non) et un objet. Les études rapportant l'utilisation de telles méthodes sont notamment celles qui s'intéressent à l'influence du port de gants de protection sur les tâches de préhension [5, 7, 13-16, 20, 27], de même que celles qui s'intéressent à la capacité de préhension de la main sur différentes surfaces destinées aux poignées d'outils [45-47].

Dans le cas de l'adhérence de la main à différents types de surface, des méthodes autres que celles impliquant des tâches fonctionnelles existent pour mesurer le coefficient de friction de la peau [48]. Dans ces méthodes, *in vivo* mais non fonctionnelles, la peau est tout simplement mise en contact avec une sonde pouvant être de géométrie et de matériau variés, en mouvement rotatif ou linéaire, permettant la mesure du coefficient de friction dynamique. Bobjer et al. [37] ont utilisé ce type de méthode pour mesurer le coefficient de friction dynamique de la peau à des matériaux de différentes textures pour le design d'outils. Il a été mis en évidence que les propriétés de friction de la peau dépendent de l'âge, du site anatomique et de l'hydratation. La nature flexible et la capacité d'hydratation de la peau font que son comportement en friction peut dévier de la loi d'Amonton, i.e. que le coefficient de friction de la peau peut varier avec la force normale et l'aire de contact. Bien que cela fasse encore l'objet de débat [49, 50], il est toutefois généralement accepté que la loi d'Amonton peut quand même être utilisée pour calculer le coefficient de friction de la peau lorsque la force normale est suffisamment élevée (au moins 3 N) [34].

Par ailleurs, dans tout type de méthode d'essai biomécanique, il est essentiel que le conditionnement de l'état de la peau (humidité, hydratation, lavage et séchage, etc.) soit contrôlé le mieux possible pour obtenir des résultats fiables [51].

Les études qui évaluent l'effet de l'adhérence des gants sur la force de préhension par des méthodes biomécaniques font très peu état de ce qui se passe à l'interface main/gant, c'est à dire de l'adhérence de la main à l'intérieur du gant. Les travaux de A.D. Robert [52-56] relatifs aux gants utilisés dans le domaine médical sont pratiquement les seuls à s'être intéressés à l'interface main/gant, notamment dans la recherche de traitements de surface des gants pour diminuer l'adhérence entre la main et le gant. Cependant, les mesures de friction n'ont été effectuées que localement à l'aide de méthodes non fonctionnelles faites au niveau d'un doigt de la main.

Les méthodes biomécaniques impliquant des tâches avec des sujets humains utilisent un dynamomètre pour mesurer la force de préhension. Le dynamomètre est constitué de deux parties reliées entre elles par des cellules de charge qui permettent de mesurer la force de préhension. La forme du dynamomètre est essentiellement de trois types :

- 1) la forme de deux petits disques (ou plaquettes) permettant une prise en pincement entre le pouce et l'index;
- 2) la forme d'une poignée plate permettant une prise en pincement impliquant tous les doigts de la main;
- 3) la forme d'une poignée ronde ou elliptique permettant un serrage complet impliquant toute la main (doigts et paume).

La force de préhension mesurée par le dynamomètre constitue la force normale F_n , et la force générée ou mesurée par le glissement du dynamomètre constitue la force tangentielle F_t . La force de friction F_f de chaque côté du dynamomètre représente la moitié de la force F_t , tel qu'illustré à la Figure 1.4. Le coefficient de friction est alors calculé suivant la loi d'Amonton par l'équation suivante :

$$\mu = \frac{F_f}{F_n} = \frac{F_t/2}{F_n}$$

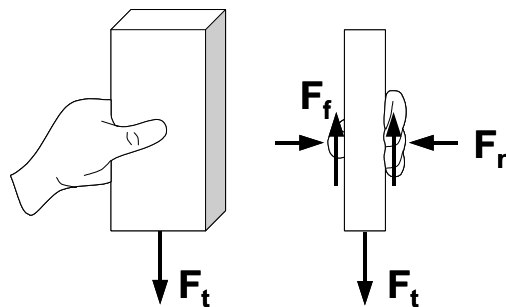


Figure 1.4 Forces impliquées dans la mesure du coefficient de friction par des méthodes biomécaniques employant un dynamomètre

De manière générale, que ce soit pour étudier l'effet de la main gantée ou de la main nue sur la force de préhension, trois types de méthodes biomécaniques avec sujets humains ont été répertoriées dans la littérature [5, 7, 13-16, 20, 28, 29, 45-47]. Cependant, ces méthodes ne

permettent de mesurer que le coefficient de friction statique. À notre connaissance, aucune méthode biomécanique n'a été développée pour mesurer le coefficient de friction dynamique.

1.5.2.1 Glissement à force contrôlée

Cette méthode requiert du sujet qu'il tienne un dynamomètre avec une force de préhension constante qui peut être contrôlée à l'aide d'un système de rétroaction visuelle. Un système de contrôle de la force est appliqué au dynamomètre dans la direction perpendiculaire à la force de préhension du sujet. Le dynamomètre est mis en mouvement par une augmentation graduelle de cette force jusqu'à ce qu'il glisse de la main du sujet. Cette méthode permet de mesurer le coefficient de friction statique entre la main et le dynamomètre par le rapport entre la force mesurée juste au moment du glissement et la force normale de préhension.

Cette méthode a principalement été utilisée pour mesurer l'adhérence de la main sur différents types de surface [45, 47].

1.5.2.2 Méthode du « laisser tomber »

Cette méthode, souvent appelée en anglais « Drop test », consiste, pour le sujet, à tenir un dynamomètre avec une force de préhension « naturelle » et à le laisser tomber graduellement. Dans ce cas, le coefficient de friction statique est calculé comme le rapport entre la force de pincement enregistrée juste au moment du glissement et le poids de l'objet.

Cette méthode a principalement été utilisée pour mesurer l'effet du port de gants sur la force de préhension [5, 7, 13-16, 20], mais aussi pour mesurer l'effet du syndrome du tunnel carpien sur la force de serrage d'outils à main [29]. Elle permet d'évaluer la « marge de sécurité » que les sujets appliquent en fonction de différentes conditions, mais peut dans certains cas générer de grande variabilité intra- et inter-sujets [28, 29].

1.5.2.3 Méthode du « Glissement volontaire »

Cette méthode requiert du sujet qu'il tienne un dynamomètre et qu'il provoque lui-même un mouvement perpendiculaire à la force de préhension afin de faire glisser sa main sur le dynamomètre. Ce mouvement génère une force de friction, laquelle est mesurée. Le coefficient de friction statique se calcule comme le rapport de la force mesurée juste au moment du glissement et de la force de préhension.

Cette méthode a été utilisée pour mesurer l'adhérence de la main sur différents types de surfaces [46].

1.5.2.4 Questionnaires de perception

Certaines études ont employé des questionnaires de perception pour connaître l'opinion des sujets sur l'utilisation des gants [9] ou sur le confort et l'inconfort ressentie par rapport à différentes textures [37].

1.5.2.5 Description sommaire de la méthode biomécanique

La méthode biomécanique mise au point dans cette étude se rapproche de la méthode de glissement à force contrôlée présentée à la section 1.5.2.1. Elle consiste à tenir un dynamomètre avec une force de préhension constante et à déplacer ce dynamomètre à vitesse constante (déplacement contrôlé plutôt que force contrôlée). La description du montage et de la méthode est présentée à la partie expérimentale de ce rapport (section 2.2). De plus, un questionnaire de perception a été utilisé pour connaître l'opinion des sujets sur les gants en général et sur leur niveau d'adhérence en particulier.

2. MÉTHODES EXPÉRIMENTALES

2.1 Description de la méthode mécanique

Dans le cadre du développement de la méthode mécanique de caractérisation de l'adhérence des gants de protection, une version modifiée de l'appareil TDM-100 servant à caractériser la résistance à la coupure a été utilisée. Cette section décrit dans un premier temps l'appareil utilisé, le TDM-100, et les modifications qui y ont été apportées. Ensuite, une description est donnée des différentes étapes du protocole expérimental.

2.1.1 Instrumentation

Le tomodynamomètre TDM-100 a été développé à l'IRSST afin de permettre la caractérisation de la résistance à la coupure des gants et vêtements de protection [57]. Il est proposé dans les normes ISO 13997 [58] et ASTM F 1790-05 [59]. Le TDM-100 permet un contrôle précis de la vitesse de déplacement de la lame et de la force normale appliquée. De plus, des capteurs de force peuvent être fixés sur le porte-lame et ainsi permettre une mesure de la force horizontale appliquée lors du déplacement de la lame.

Le TDM-100 a été modifié afin de permettre la mesure de la friction par une méthode mécanique (voir Figure 2.1). La configuration mise en place correspond aux principes des méthodes d'étrépage, comme l'illustre la Figure 2.2. Même si, en pratique, la pièce en mouvement est la butée métallique, la configuration correspondant au TDM modifié est équivalente à celle où une pièce échantillon se déplace sur une surface métallique, la même surface de l'échantillon étant en contact avec la butée durant tout le test. Cette configuration a été sélectionnée afin de correspondre au montage biomécanique avec lequel les résultats vont être comparés. La lame a été remplacée par une butée de friction en T de 70 mm de long et 10 mm de large avec des bords arrondis (rayon de 3,175 mm). Le porte-échantillon a lui aussi été modifié afin d'offrir une surface de contact plane de 101 mm de long par 20 mm de large. Ces deux pièces sont réalisées en acier inoxydable (304 cold rolled annealed) avec un fini de surface de 0,1 µmm. Les dessins techniques de ces deux pièces sont fournis en Annexe A. Une attention particulière a été portée lors de la conception et de la fabrication de la butée de friction et du nouveau porte-échantillon afin de s'assurer de l'exactitude du parallélisme des surfaces de contact, dont des tests préliminaires ont révélé l'importance.

Lors de la mesure, la butée de friction se déplace horizontalement à une vitesse constante de 150 mm/min perpendiculairement à l'axe du porte-échantillon : la surface de contact entre la butée et l'échantillon est égale à 10 x 20 mm. Une cellule de charge (Transducer Technique, Temecula, CA, modèle MLP-10-C0), d'une capacité maximale de 10 lb et positionnée sur le porte-butée, enregistre la force horizontale correspondant à la force de friction. La force normale s'exerçant sur la butée est appliquée à l'aide de masses étalonnées placées sur un plateau. L'acquisition de données sur la force horizontale et le déplacement de la butée se fait par le biais d'un ordinateur.

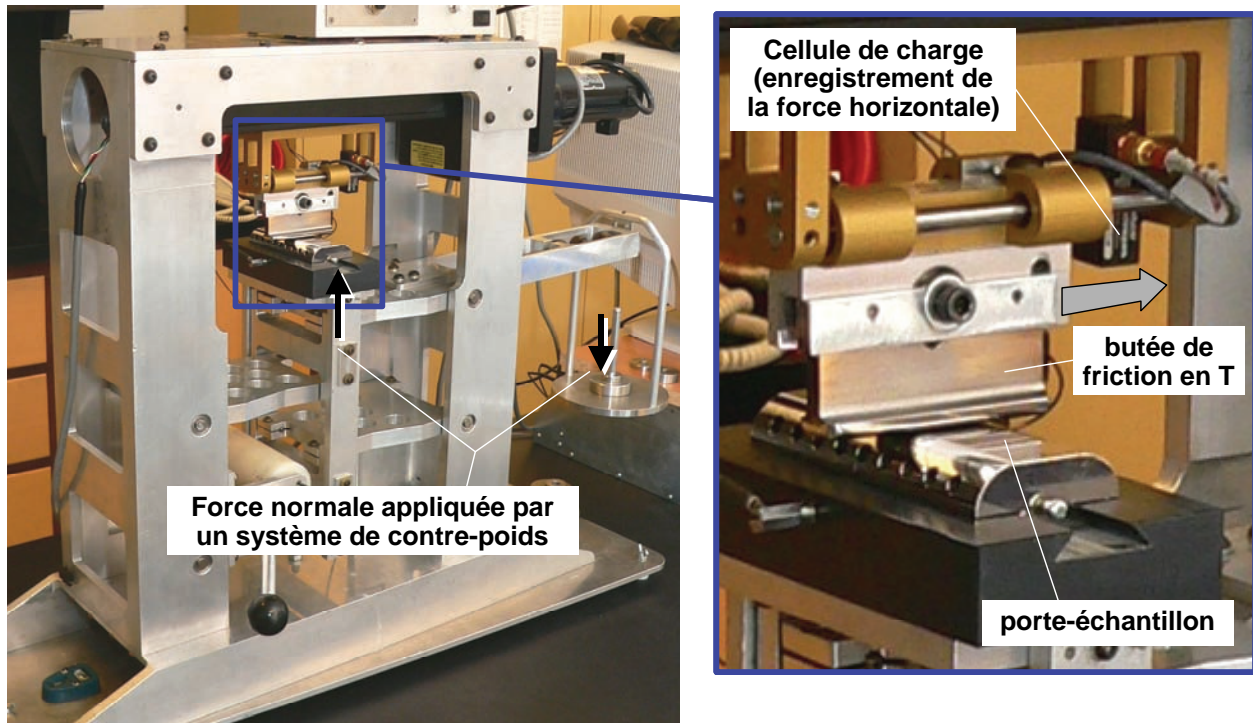


Figure 2.1 Photo du TDM-100 modifié pour la mesure de la friction

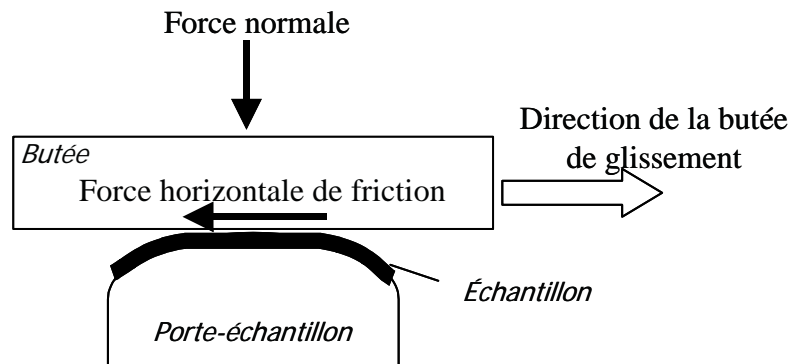


Figure 2.2 Principe de fonctionnement du TDM modifié

2.1.2 Procédure expérimentale

La caractérisation des propriétés d'adhérence pour les vingt sept modèles de gants sélectionnés a été effectuée en mesurant la variation de la force horizontale en fonction du déplacement de la butée sur la surface de l'échantillon à l'aide du TDM modifié. Des échantillons de 5 x 10 cm ont été prélevés dans la paume du gant qui présente une zone plane suffisamment grande. Les échantillons ont été découpés dans le sens de la largeur du gant, c'est-à-dire dans une orientation correspondant à la sollicitation exercée dans le cadre des tests de la méthode biomécanique. Pour chaque modèle de gant, les échantillons ont été prélevés sur trois gants différents pris au

hasard. Cinq mesures ont été réalisées sur chacun des 3 échantillons. Ceci représente donc un total de quinze mesures par modèle de gant.

Les échantillons de gant ont été fixés sur le porte-échantillon à l'aide d'un ruban adhésif double face. Certains modèles de gant ont nécessité une étape de préparation particulière comme par exemple l'enlèvement de la couche de mousse collée sur la surface intérieure du gant. De plus, des attaches en plastique de type tie-wrap ont été utilisées dans certains cas afin de mieux immobiliser l'échantillon.

Afin de limiter la présence de contaminants sur les surfaces de contact, la surface active de la butée de friction a été nettoyée entre chaque mesure. Le nettoyage comprend un essuyage avec un chiffon de type Kim-Wipes imbibé d'isopropanol, un essuyage avec un chiffon sec et un séchage à l'air de 2 minutes. De la même façon, la manipulation des échantillons a été faite avec des gants pour éviter leur contamination.

Il a été nécessaire de s'assurer du bon centrage de la butée de friction après remontage, sa position devant toujours être la même au début du test. Cinq mesures successives présentant une nouvelle surface de contact ont pu être réalisées sur chaque échantillon.

Les mesures sur les gants ont été réalisées avec une force normale égale à 5 N. Cette valeur constitue un compromis entre la limite de détection du capteur de force et une force trop élevée qui provoque un écrasement du matériau. Afin de pouvoir comparer les résultats, les mesures biomécaniques ont utilisé une force normale de même valeur.

Les instructions d'utilisation du TDM-100 à des fins de caractérisation de l'adhérence sont fournies en Annexe B.

2.1.3 Matériaux

Les mesures des coefficients de friction statique et dynamique ont été effectuées sur une sélection de 27 gants de protection des compagnies Best et Ansell. Le Tableau - C.1 en Annexe C donne la composition de chacun des modèles testés.

2.1.4 Analyse des données

Les données enregistrées s'expriment sous la forme de la variation de la force horizontale, correspondant à la force de friction, en fonction du déplacement de la butée de friction. La Figure 2.3 donne un exemple de résultats obtenus dans le cas d'une feuille de néoprène. La force de friction présente un pic pour un déplacement de moins d'un millimètre de la butée de friction, puis redescend et atteint une valeur plateau après un déplacement d'environ 5 millimètres.

Le coefficient de friction statique μ_s se calcule à partir de la valeur maximale du pic de la force horizontale F_{pic} alors que le coefficient dynamique μ_d utilise la valeur moyenne $F_{plateau}$ de la force au niveau du plateau sur une distance de 2 mm, selon les relations suivantes :

$$\mu_s = \frac{F_{pic}}{F_{normale}} \qquad \mu_d = \frac{F_{plateau}}{F_{normale}}$$

Où $F_{normale}$ est la force normale appliquée sur la butée de friction.

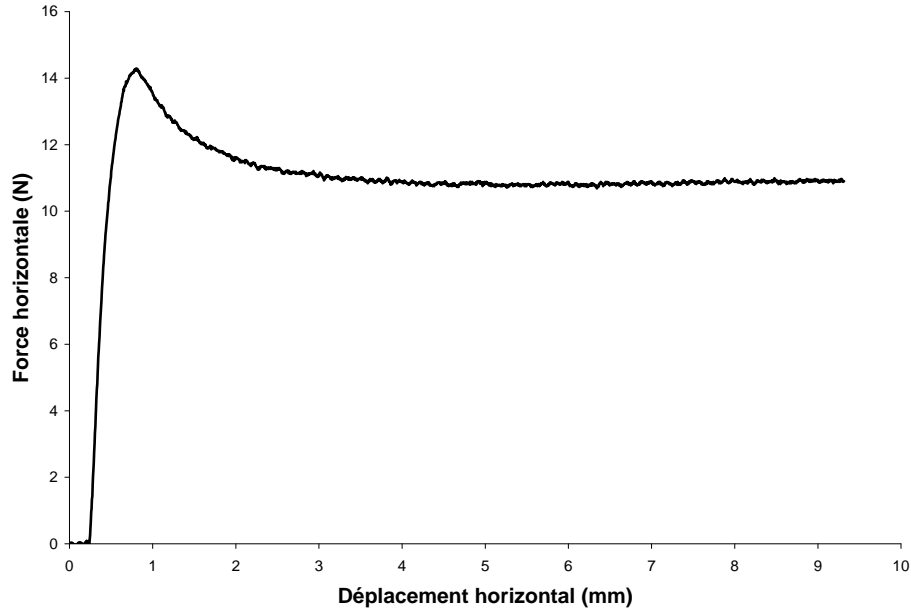


Figure 2.3 Variation de la force de friction en fonction du déplacement de la butée de friction pour le cas du néoprène pour une $F_{normale}$ de 5 N

2.2 Description de la méthode biomécanique

2.2.1 Montage expérimental

Un dynamomètre à surfaces planes permettant une mesure de la force de préhension des doigts sous l'effet d'un pincement a été utilisé. Il s'agit du même dynamomètre que celui employé par Larivière et al. [28]. Tel qu'illustré à la Figure 2.4, il est constitué de deux plaques d'aluminium de 9,6 mm d'épaisseur espacées de 1,6 mm. Ces deux plaques sont liées par deux cellules de charge identiques (Transducer Technique, Temecula, CA, modèle MLP-25-C0) d'une capacité maximale de 25 lbs chacune (111 N), et d'une précision d'environ 0,1% de leur capacité maximale. Les forces en compression mesurées par ces cellules sont additionnées pour donner la force normale exercée par le pouce, d'un côté du dynamomètre, et par les doigts, de l'autre côté du dynamomètre, lorsqu'un sujet exerce une force de pincement. Deux pinces situées sur chaque surface permettent de changer le type de surface en fixant des plaquettes minces (2 mm d'épaisseur) sur le dynamomètre. L'épaisseur totale du dynamomètre avec les plaquettes est de 24,8 mm au niveau de la prise, ce qui permet une préhension en pincement confortable.

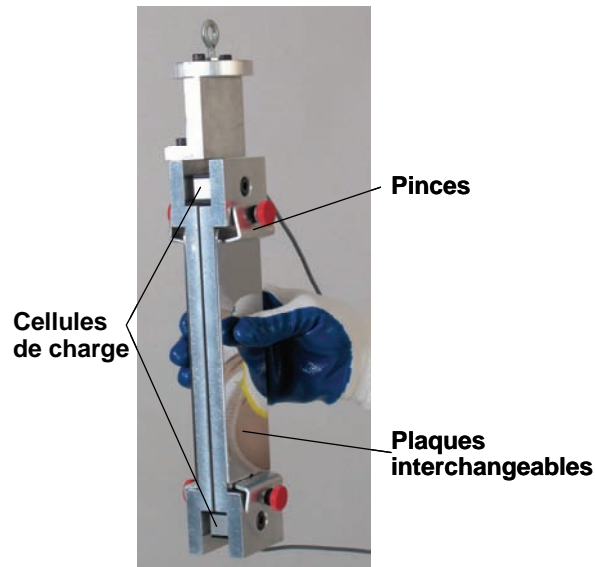


Figure 2.4 Dynamomètre de type pince (forme plate) pour l'évaluation biomécanique de l'adhérence des gants

Le dynamomètre a été installé sur une machine de traction MTS tel qu'illustré à la Figure 2.5. Il a été fixé, à la verticale et par son extrémité supérieure, à une cellule de charge d'une capacité maximale de 250 N (MTS, modèle 1500BLZ (4501025), série 104993) et d'une précision d'environ 0,1% de sa capacité maximale. Pour les tests, que les sujets soient droitiers ou gauchers, ils devaient tous tenir le dynamomètre avec leur main droite dans une position semblable. Pour ce faire, le sujet était assis devant la machine d'essai mécanique sur une chaise dont la hauteur était ajustée pour que l'angle formé entre le bras et l'avant-bras soit d'environ 120°. Le dynamomètre pouvait pivoter sur lui-même pour s'adapter à la prise de chaque sujet. Un support, présenté à la Figure 2.6, permettait de soutenir l'avant-bras du sujet et de faciliter son positionnement. L'ajustement en hauteur du support se faisait par deux mécanismes situés sous la surface de soutien. Un appui pour l'avant-bras pouvait être déplacé et positionné librement, puis coincé et fixé par des lames de métal et des vis. L'orientation du dynamomètre et l'ajustement du support permettaient d'assurer un positionnement de la main et du bras adéquat et confortable pour les sujets. Un objet cylindrique de 16 mm (5/8") de hauteur était déposé sous les doigts du sujet, tout près du dynamomètre, pour limiter le déplacement de la main vers le bas lors des tests.

Un système de rétroaction visuelle permettait de suivre sur un écran d'ordinateur la force de pincement appliquée sur le dynamomètre. Cette force était représentée par un curseur pouvant se déplacer sur une échelle de force, et le sujet devait maintenir le curseur à l'intérieur d'une cible (carrée) représentant la force visée. Durant le déplacement du dynamomètre vers le bas à vitesse constante, la cellule de charge de la machine d'essai mécanique enregistrait la force de friction provoquée par le glissement du dynamomètre.

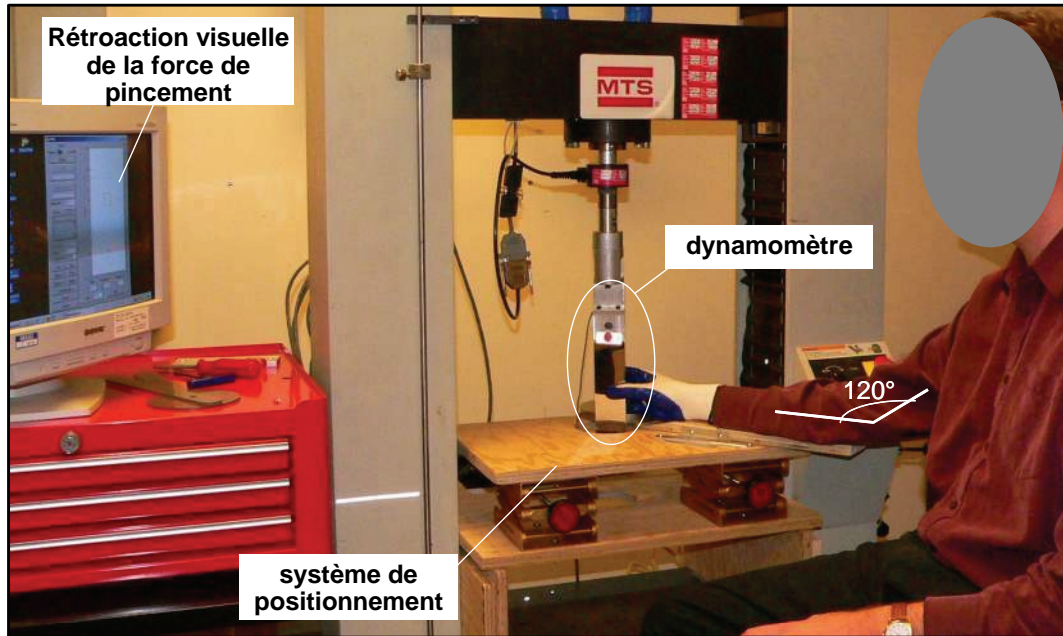


Figure 2.5 Montage expérimental pour l'évaluation biomécanique de l'adhérence des gants

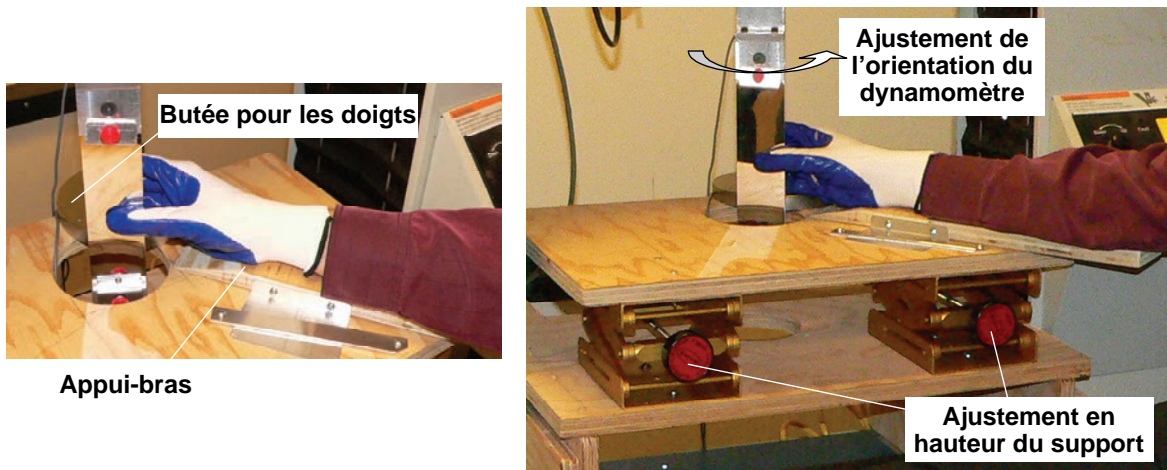


Figure 2.6 Système de positionnement du bras pour la méthode biomécanique d'évaluation de l'adhérence des gants

2.2.2 Sujets

Dans l'étude précédente réalisée à l'IRSST [28], trente volontaires avaient participé à l'évaluation de la méthode dynamométrique initiale. Dans le cadre de la présente étude, le nombre de volontaires a été restreint à six étant donné la portée très limitée de l'étude consistant à évaluer la viabilité d'utiliser le même montage avec les modifications décrites à la section 2.2.1. Les sujets ont signé le formulaire de consentement préalablement approuvé par le Comité d'Éthique de l'ÉTS (Annexe D) avant de débiter l'expérimentation. Les critères d'inclusion

pour participer à l'étude étaient de ne pas souffrir de troubles affectant la motricité ou la sensibilité des membres supérieurs, de même que d'avoir des mains de tailles 6 à 10 correspondant aux dimensions spécifiées dans la norme EN 420 afin d'avoir un meilleur ajustement possible des gants. L'âge et la prédominance pour l'une ou l'autre des deux mains n'étaient pas des critères d'exclusion. Les participants étaient âgés de 35 à 45 ans (moyenne d'âge de 42.5 ans). Le Tableau 2.1 présente les caractéristiques des sujets et les tailles de gants utilisés.




Tableau 2.1 Caractéristiques des sujets et tailles des gants

Sujet	Sexe	Âge	Latéralité	Taille des gants		
				Gant 1 (Kevlar) Ansell 70-225	Gant 2 (Caoutchouc) Ansell 392	Gant 3 (Nitrile) Ansell 11-900
1	F	35	droitier	7	7	7
3	F	45	droitier	7	7	8
6	F	43	droitier	7	7	8
2	M	45	droitier	9	8	10
4	M	36	droitier	7	8	9
5	M	51	gaucher	8	9	10

2.2.3 Gants

Trois modèles ont été sélectionnés, pour l'étude biomécanique, parmi les 27 modèles de gants caractérisés par la méthode mécanique. Ils sont présentés au Tableau 2.2. Ces trois modèles ont été choisis car ils présentent des coefficients de friction très différents et un coefficient de friction dynamique mesurable par la méthode mécanique (existence d'un plateau dans la variation de la force horizontale, voir section 3.1.1). De plus, ces modèles de gants étaient disponibles en plusieurs tailles, ce qui permettait un meilleur ajustement aux mains des sujets. Les sujets ont choisi eux-mêmes la taille des gants avec laquelle ils se sentaient le plus confortable.

Tableau 2.2 Gants sélectionnés pour les tests biomécaniques

Gant de protection	Image	Matériau	Fini de la surface externe
Gant G1 Ansell GoldKnit 70-225		Tricot Kevlar	Tricot
Gant G2 Ansell Canners & Handlers 392		Caoutchouc naturel	Antidérapant
Gant G3 Ansell Hyflex 11-900		Nitrile	Lisse avec texture apparaissant

2.2.4 Procédure expérimentale

Afin de pouvoir comparer les coefficients de friction des gants mesurés par les méthodes biomécanique et mécanique, les paramètres d'essai de la méthode biomécanique sont similaires à ceux de la méthode mécanique, notamment en ce qui concerne la force normale, la vitesse de déplacement, le matériau (acier) en contact avec les gants et le nettoyage de l'acier à l'isopropanol. De plus, la composition de la paume des gants (utilisée pour la méthode mécanique) est la même que celle au niveau des doigts, tant au niveau de la partie tricot que pour la couche d'élastomère. En effet, les gants G2 et G3 sont fabriqués par trempage, c.-à-d. qu'une forme couverte ou non d'un support tricot est trempée dans une solution de polymère.

Un essai d'adhérence par la méthode biomécanique consistait à serrer le dynamomètre avec une force normale (force de pincement) de 5 N et à maintenir cette force constante ($\pm 10\%$) pendant que la machine d'essai mécanique déplaçait le dynamomètre vers le bas à une vitesse constante de 150 mm/min pendant 9 secondes. Les sujets devaient tenir le dynamomètre au milieu avec une prise digitale en pincement impliquant tous les doigts de la main. La force normale et la force de friction étaient enregistrées durant l'essai.

Les sujets ont effectué 7 essais pour pouvoir mesurer les coefficients de friction sur les surfaces interne et externe des gants, chaque essai correspondant à une interface. Les 7 interfaces sont les suivantes :

- 1) main/acier
- 2) gant G1/acier
- 3) gant G2/acier
- 4) gant G3/acier
- 5) main/intérieur du gant G1
- 6) main/intérieur du gant G2
- 7) main/intérieur du gant G3

Pour les interfaces main/acier et gants/acier (essais #1 à #4), des plaques minces en acier inoxydable 304 recuit laminé à froid (cold rolled annealed, le même que celui utilisé pour la butée de friction du TDM modifié) avec un fini de surface de 0,1 μm ont été installées sur le dynamomètre. Les essais avec les gants consistaient à les enfiler sur la main et à tenir les plaques d'acier. Ainsi, le coefficient de friction était mesuré sur la surface externe des gants.

Pour les interfaces main/intérieur des gants, des échantillons rectangulaires ont été découpés dans les gants et collés, face interne du gant vers l'extérieur, avec du ruban adhésif double face sur des plaquettes d'aluminium, lesquelles ont été installées sur le dynamomètre. Les essais consistaient à tenir à main nue ces plaques recouvertes du matériau constituant la surface interne des gants. Ainsi, le coefficient de friction était mesuré sur les surfaces internes des gants.

Les sujets ont tous commencé par l'essai #1 (interface main/acier), puis ont effectué les 6 autres essais (#2 à #7) dans un ordre aléatoire. Chaque sujet a répété consécutivement trois fois le même essai, soit un total de 21 essais (7 essais x 3 répétitions).

Avant chaque essai, les sujets se lavaient les mains avec un savon doux puis les séchaient avec du papier essuie-tout (les mains n'étaient pas lavées entre les répétitions d'un même essai). Avant chaque essai, les plaques d'acier étaient nettoyées à l'isopropanol, essuyées puis séchées à l'air.

Avant la séance d'essais de chaque sujet, des essais de pratique ont été réalisées à main nue et avec les 3 modèles de gants jusqu'à ce que le sujet réussisse à maintenir la force de pincement cible stable (± 1.5 N) durant toute la durée de l'essai.

2.2.5 Analyse des données

La force mesurée par la cellule de charge de la machine d'essai mécanique a été utilisée pour calculer le coefficient de friction (μ) à l'aide de l'équation suivante:

$$\mu = \frac{F_f}{F_n} = \frac{F_m/2}{F_n}$$

où F_f est la force de friction à la surface du dynamomètre, F_n la force normale à la surface du dynamomètre et F_m la force mesurée par la machine d'essai mécanique (voir Figure 2.7). Le coefficient de friction μ était calculé en continu durant les 9 secondes que duraient les essais.

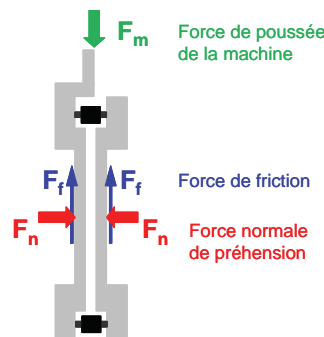


Figure 2.7 Schéma simplifié des forces impliquées dans la prise en pincement du dynamomètre

Pour chaque essai, le coefficient de friction dynamique μ_d a été déterminé par la moyenne des valeurs de coefficient de friction obtenus durant les 4 dernières secondes de l'essai, soit au moment où le plateau associé à la zone dynamique a été le plus stable pour la plupart des essais. Pour chaque interface, le coefficient de friction dynamique correspond à la moyenne des trois répliques effectués par chaque sujet.

Une analyse ANOVA à une voie (7 interfaces) avec mesures répétées a été utilisée pour évaluer s'il existe des différences significatives entre les coefficients de friction dynamiques des interfaces. Puisqu'il s'agit d'une étude pilote et qu'il y a peu de sujets, l'interaction sujet \times

interface n'a pas été prise en compte dans l'analyse. Les essais de pratique effectués par les sujets limitent l'effet d'apprentissage et les deux minutes de repos entre chaque essai réduisent l'effet de fatigue des sujets. Des tests de comparaison multiple Tukey-Kramer ont été effectués pour évaluer les différences significatives entre les différentes interfaces. Pour un seuil de significativité de 0,2, la puissance du test statistique a été évaluée à près de 80%.

2.3 Dispositif de pincement mécanique appliqué au montage de la méthode biomécanique

2.3.1 Montage et procédure expérimentale

Un montage expérimental a été développé et installé sur le dynamomètre de la méthode biomécanique afin de contrôler les paramètres de l'essai d'adhérence en faisant abstraction du facteur humain. Un dispositif de pincement mécanique a donc permis de réaliser des essais avec le montage de la méthode biomécanique, mais sans sujet. Tel qu'illustré à la Figure 2.8, le dispositif de pincement était constitué de deux cylindres d'aluminium reliés à deux membrures verticales par l'intermédiaire de deux vis mécaniques. L'une des membrures était mobile. Les échantillons de matériaux étaient fixés sur l'embout des cylindres d'aluminium de 1¼ po (32 mm) de diamètre. Ces cylindres retenaient en serre le dynamomètre par une force exercée par un ressort fixé entre les membrures. Les vis mécaniques servaient à centrer le dynamomètre et à assurer un contact parallèle entre les surfaces des échantillons et du dynamomètre durant les essais.

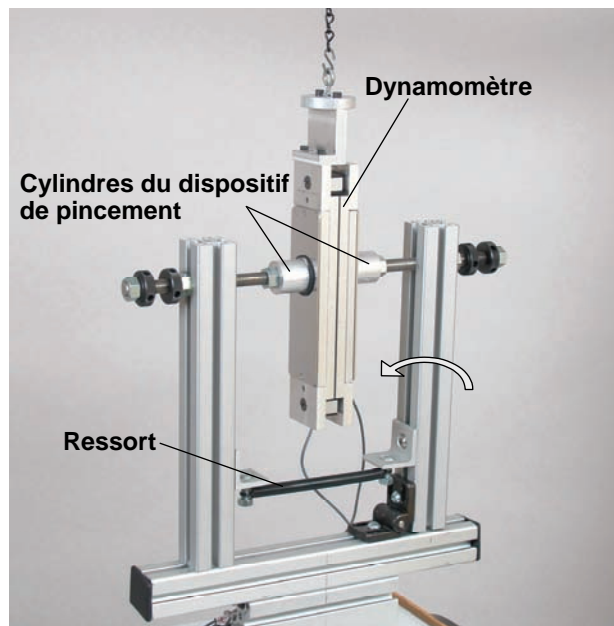


Figure 2.8 Dispositif de pincement mécanique appliqué au montage de la méthode biomécanique

Un essai d'adhérence avec le dispositif de pincement consistait à reproduire essentiellement les mêmes paramètres de test que pour les essais biomécaniques. La force de serrage du dispositif de pincement sur le dynamomètre était de 5 N (force normale) et le déplacement du dynamomètre se faisait à une vitesse constante de 150 mm/min pendant 9 secondes. Toutefois, au lieu de fixer rigidement le dynamomètre à la cellule de charge de la machine d'essai mécanique et à le faire se déplacer vers le bas, le dynamomètre était attaché par une chaîne à la cellule de charge pour être déplacé vers le haut. Ce lien souple était nécessaire pour contrer la légère oscillation de l'unité mobile de la machine d'essai mécanique qui se produisait lors de son déplacement. Ce mouvement oscillant générait une force alternative qui ne permettait pas d'appliquer une force de serrage constante sur le dynamomètre. Comme pour la méthode biomécanique, la force normale et la force de friction étaient enregistrées durant l'essai.

Des essais ont été effectués avec les matériaux des trois modèles de gants sélectionnés pour la méthode biomécanique, soit le gant G1 – Ansell GoldKnit 70-225 (kevlar), le gant G2 – Ansell Cannery & Handlers 392 (caoutchouc), et le gant G3 – Ansell Hyflex 11-900 (nitrile). Pour chaque modèle, un seul gant a été utilisé dans lequel deux échantillons circulaires d'environ 35 mm de diamètre ont été découpés. Ces échantillons ont été collés sur les cylindres du dispositif de pincement avec du ruban adhésif double face. Cinq répétitions ont été réalisées pour les matériaux des gants 1 (kevlar) et 2 (caoutchouc) et sept répétitions pour le matériau du gant 3 (nitrile). Avant chaque essai et chaque répétition, les plaques d'acier du dynamomètre étaient nettoyées à l'isopropanol.

2.3.2 Analyse des données

Le coefficient de friction μ a été calculé de la même façon que pour les essais biomécaniques, soit par le rapport entre la moitié de la force mesurée par la cellule de charge de la machine d'essai mécanique, et la force normale. Pour chaque essai, le coefficient de friction dynamique μ_d a été déterminé par la moyenne des valeurs de coefficient de friction obtenus durant les dernières secondes de l'essai, soit au moment où un plateau associé à la zone dynamique était observé (les 8 dernières secondes pour les gants G1 et G2, et les 3 dernières secondes pour le gant G3). Pour chaque gant, le coefficient de friction dynamique moyen correspond à la moyenne des répliques (5 répliques pour les gants G1 et G2, 7 répliques pour le gant G3).

2.4 Tests de perception

Les sujets ont rempli un questionnaire de perception pour connaître leur opinion sur les gants et sur la procédure expérimentale. Ce questionnaire, présenté à l'Annexe E, a été développé spécifiquement pour cette étude et comporte trois parties.

Les première et deuxième parties du questionnaire (pré- et per-expérimentation) comportent des questions relatives au confort des gants (confort général, respirabilité, ajustement, souplesse) et des questions relatives à l'adhérence des gants (adhérence entre la main et le gant et entre le gant et l'acier). Au début de la séance, le sujet devait faire une évaluation subjective des gants et remplir la partie pré-expérimentation du questionnaire. Pour ce faire, il devait tâter des plaques minces d'acier (les mêmes que celles installées sur le dynamomètre) à main nue et en enfilant les trois modèles de gants, sans directive particulière et autant de fois qu'il le désirait. Durant la

séance d'essai, le sujet devait refaire une évaluation subjective des gants et remplir la partie per-expérimentation du questionnaire. Dans ce cas, le sujet répondait aux questions après les trois répétitions de chacun des 7 essais d'adhérence. Ces deux parties du questionnaire ont permis de déterminer si la perception des gants changeait avec le type de manipulation, soit une manipulation libre et naturelle dans le cas pré-expérimentation et une manipulation plus contrôlée et stricte dans le cas per-expérimentation.

Puisque l'expérimentation comportait des éléments contraignants pour les sujets nécessaires pour assurer la reproductibilité des résultats, tels que maintenir une force de pincement constante et garder toujours la même position du bras et de la main, la troisième et dernière partie du questionnaire (post-expérimentation) inclut des questions relatives au niveau de fatigue et au niveau de difficulté de l'expérimentation en général. Le sujet devait remplir cette partie post-expérimentation à la toute fin de la séance.

Les réponses à toutes les questions du questionnaire étaient inscrites sous forme d'échelle d'appréciation en 4 échelons (1 étant une appréciation négative et 4 une appréciation positive). Pour l'analyse des données, les cotes attribuées par les sujets ont été moyennées pour chaque item du questionnaire.

3. RÉSULTATS

3.1 Tests mécaniques

3.1.1 Validation de la méthode mécanique

La méthode mécanique de caractérisation de l'adhérence développée dans cette étude a été validée avant de réaliser les essais sur les échantillons de gants. Cette validation a été réalisée en vérifiant l'indépendance de la force normale sur la détermination des coefficients de friction, en comparant les résultats obtenus avec ceux de la littérature, et en évaluant la variabilité des mesures.

3.1.1.1 Influence de la force normale

Une première étape dans le processus de validation de l'instrumentation développée a consisté à vérifier que la valeur de la force normale n'influe pas sur la détermination des coefficients de friction, ce qui doit être le cas dans des conditions de pression modérée et avec des matériaux autres que les textiles. Le matériau choisi est un néoprène de la compagnie Reeves Brothers Inc., Spartanbourg, SC, d'une épaisseur de $1,50 \pm 0,05$ mm et d'une dureté Shore A = 50 ± 5 .

Trois valeurs de force dans un intervalle compris entre 1 et 10 N ont été sélectionnées, et cinq mesures ont été réalisées avec le néoprène pour chacune de ces trois valeurs de force normale. Dans chaque cas, les valeurs des coefficients de friction statique et dynamique ont été déterminées et les valeurs de moyenne et d'écart-type ont été calculées à partir des cinq mesures réalisées pour chaque valeur de la force normale. La Figure 3.1 présente les résultats obtenus.

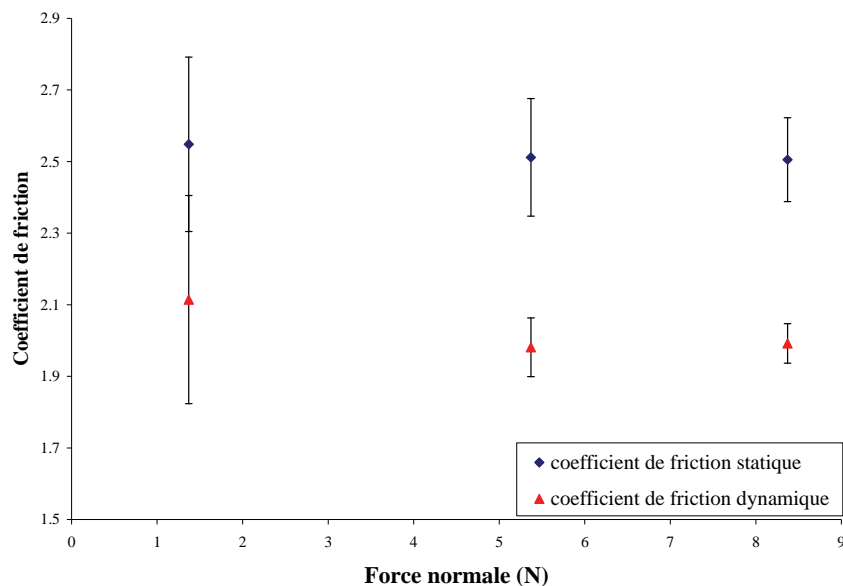


Figure 3.1 Influence de la valeur de la force normale sur les coefficients de friction statique et dynamique

Les valeurs mesurées pour une force normale de 1,37 N présentent des écart-types plus importants, les valeurs de force horizontale se situant proche de la limite de détection du capteur de force. Néanmoins, les résultats montrent que les coefficients de friction statique et dynamique ne varient pas avec la valeur de la force normale dans le domaine compris entre 1 et 10 N, ce qui constituera les limites d'utilisation de l'instrument. Ceci permet donc de conclure que le TDM modifié simule un processus de friction en accord avec les principes décrits dans la littérature.

3.1.1.2 Comparaison des mesures avec la littérature

Les coefficients de friction statique et dynamique ont été mesurés pour un échantillon de Téflon™ (Plastique Commercial Inc.) de 0,75 mm d'épaisseur avec cette méthode d'essais et les résultats ont été comparés avec des données correspondantes trouvées dans la littérature.

Les essais ont été effectués avec une force normale de 5,37 N. La valeur du coefficient de friction statique obtenue est de $0,22 \pm 0,40$, ce qui est similaire aux valeurs comprises entre 0,20 et 0,30 trouvées dans la littérature [30, 36]. Dans le cas du coefficient de friction dynamique, la force horizontale mesurée se trouve à la limite de détection du capteur. Néanmoins, la valeur de 0,03 obtenue pour le coefficient dynamique est, elle aussi, comparable aux données de la littérature [35, 60].

Ces résultats démontrent que la méthode de mesure de la friction développée à partir du TDM-100 génère des valeurs de coefficients de friction statique et dynamique comparables à celles retrouvées dans la littérature.

3.1.1.3 Variabilité de la mesure

Afin d'évaluer l'erreur sur les mesures liée à la procédure expérimentale, le test de caractérisation de l'adhérence a été réalisé cinq fois sur un échantillon unique de néoprène (afin de limiter l'influence de la variabilité entre des échantillons différents), la butée étant démontée, nettoyée et remontée entre chaque mesure. La zone testée de l'échantillon était différente pour chaque mesure et une force normale de 5 N a été utilisée. Les résultats en terme de coefficient statique et dynamique sont présentés au Tableau 3.1.

Tableau 3.1 Résultat des tests sur du néoprène pour la détermination de la variabilité de la mesure

test	Coefficient statique	Coefficient dynamique
1	2,6	2,0
2	2,4	1,9
3	2,6	2,0
4	2,7	2,1
5	2,4	2,0
Moyenne	2,5	2,0
Écart-type	0,1	0,1
CV	4%	5%

La variabilité sur les résultats de coefficient statique et dynamique due à la procédure expérimentale, c'est-à-dire incluant l'erreur sur le positionnement de la butée, est donc comprise entre 4 et 5%, si l'on considère que la variabilité due au néoprène est nulle. Par comparaison avec les résultats obtenus lors de la caractérisation de l'influence de la force normale (voir Figure 3.1), pour lesquels la butée n'avait pas été démontée entre les cinq mesures successives effectuées sur l'échantillon de néoprène, les coefficients de variation (CV) pour le calcul des coefficients de friction statique et dynamique sont également situés autour de 5%. On peut donc en conclure que l'erreur sur le positionnement de la butée est négligeable.

3.1.2 Forme typique des courbes force-déplacement

Les courbes décrivant la variation de la force horizontale en fonction du déplacement de la butée pour les différents gants ont été de deux types selon qu'elles incluent ou non un pic correspondant au coefficient de friction statique. La Figure 3.2 montre la forme caractéristique des courbes que nous appellerons de type s-d (statique-dynamique) avec un pic et de celles que nous appellerons de type d (dynamique) sans pic.

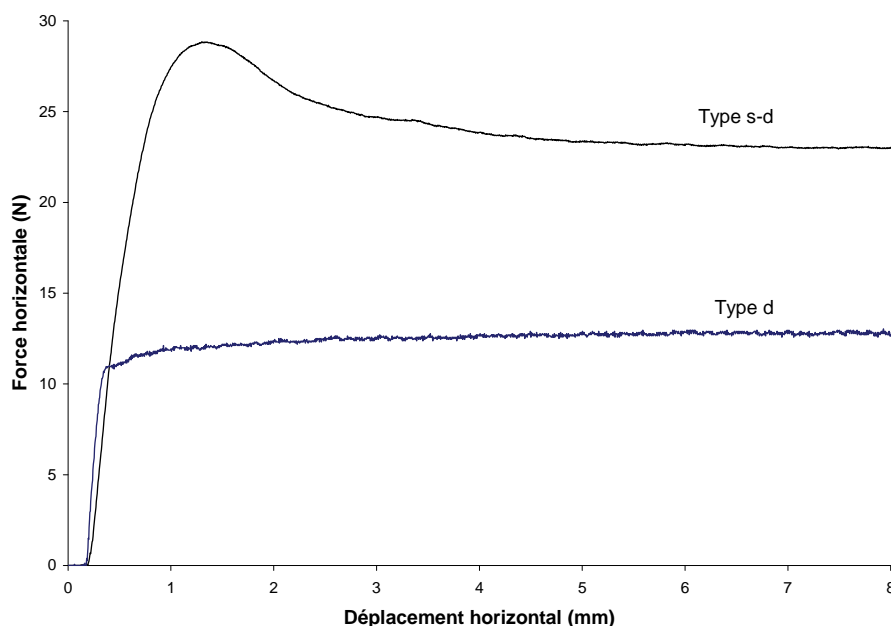


Figure 3.2 Forme typique des courbes force-déplacement de type s-d (avec pic statique) et d (sans pic statique)

Parmi les 27 modèles de gants, neuf modèles présentent un comportement de type s-d, 15 modèles présentent un comportement de type d, et trois modèles montrent un comportement mixte, c'est-à-dire que certaines courbes présentent un pic (type s-d) et d'autres non (type d) parmi l'ensemble des quinze courbes, tel qu'indiqué au Tableau - F.1 de l'Annexe F. Il apparaît que tous les gants possédant une surface en caoutchouc naturel sont caractérisés par un comportement de type d. Dans le cas des gants en nitrile, la majorité des gants présentent un comportement de type s-d, avec un pic correspondant au coefficient de friction statique bien défini.

Sur le sujet de l'existence même du coefficient de friction statique des caoutchoucs, il est à noter que la controverse existe encore, certains auteurs ayant démontré théoriquement l'absence d'un tel coefficient tandis que d'autres défendent son existence sur la foi d'observations expérimentales [42]. De leur côté, Roberts et al. [52], dont les travaux portaient sur du caoutchouc propre et lisse, ont mesuré un coefficient de friction statique de 0,6 dont ils attribuent l'origine à la déformation élastique du matériau.

De manière générale, il est rapporté dans la littérature que certains matériaux présentent un coefficient de friction statique égal au coefficient de friction dynamique, donnant un profil de type d, tandis que pour d'autres, le coefficient de friction statique peut être supérieur au coefficient de friction dynamique, correspondant à la situation de type s-d [61]. En particulier, dans le cas de très faibles vitesses de glissement, des calculs basés sur la théorie adhésive de la friction pour le caoutchouc donnent une valeur du coefficient de friction statique égale à celle du coefficient dynamique [62]. Par ailleurs, des simulations basées sur des considérations moléculaires ont montré que, pour un caoutchouc simple, le coefficient de friction statique est égal au coefficient dynamique, des résultats confirmés par des mesures expérimentales [61]. Un coefficient statique plus élevé que le coefficient dynamique peut être observé par exemple pour des mélanges d'élastomères avec des températures de transition vitreuse différentes, à cause d'une contribution importante du phénomène d'ancrage à l'interface entre les deux matériaux, en particulier entre deux caoutchoucs par interdiffusion de chaînes.

Des particularités observées dans les courbes force-déplacement pour certains gants sont décrites en Annexe G. Il s'agit principalement de la présence d'un décalage dans le déplacement préliminaire de la butée avant le glissement, ainsi que de bruit et d'oscillations dans le signal enregistré. Ces phénomènes sont attribués à des caractéristiques des matériaux constituant le gant, comme par exemple la présence d'une mousse ou d'un revêtement ouaté sur la surface interne. Dans le cas des gants en caoutchouc naturel principalement, il a été aussi observé que la force horizontale continue d'augmenter sans atteindre de plateau. Plusieurs hypothèses sont avancées, comme l'accumulation de débris sur la surface en contact avec la butée de friction, un phénomène d'échauffement ou la migration de polymères de faible poids moléculaire ou d'additifs à la surface du matériau. Dans ces conditions où la force horizontale n'atteint pas de plateau, le coefficient de friction dynamique n'a pas pu être déterminé.

3.1.3 Variabilité inter- et intra-gant

Le Tableau - F.2 en Annexe F présente les résultats du calcul des coefficients de friction statique et dynamique pour les modèles de gants testés individuellement pour chacune des trois séries et pour l'ensemble des quinze répliques. Les modèles de gants Ansell 16-300, Ansell 6-620, Ansell 28-362 et Ansell 80-100 ne sont pas inclus dans le tableau étant donné qu'ils ne présentent ni de pic correspondant au coefficient de friction statique, ni de plateau permettant la détermination du coefficient de friction dynamique.

Le coefficient de variation (CV) des mesures à l'intérieur des séries se situe entre 1 et 30% pour le coefficient statique, et entre 2 et 38% pour le coefficient de friction dynamique. Étant donné que la variabilité de la méthode de mesure, déterminée à l'aide d'un matériau relativement homogène, est située autour de 5% (voir section 3.1.1), il est possible de conclure que certains

gants offrent des inhomogénéités dans leurs propriétés d'adhérence par rapport à l'échelle considérée (surface de 20 x 50 mm analysée pour chaque série, les surfaces de contact pour chaque mesure étant situées côte-à-côte). Ces inhomogénéités peuvent éventuellement être attribuées à des variations de la rugosité de la surface.

Le coefficient de variation (CV) des mesures pour les trois échantillons du même modèle de gant se situe entre 7 et 67% pour le coefficient statique, et entre 5 et 55% pour le coefficient de friction dynamique. Les différences entre les trois séries d'essais, tant au niveau du coefficient de friction statique que dynamique, peuvent être assez importantes pour certains modèles de gants, par exemple pour les gants Best 7000P, Ansell 23-193, Ansell 8-352, Ansell 9-022 et Best 747. Dans certains cas, des différences apparentes entre les échantillons testés pour un même modèle de gant ont été observées. Des études supplémentaires seront nécessaires pour mieux analyser ce phénomène.

3.1.4 Classification des gants selon leur adhérence

La Figure 3.3 présente les résultats obtenus en terme de coefficients de friction statique et dynamique pour les 23 modèles de gants pour lesquels ces coefficients ont pu être déterminés (les 4 autres modèles de gants ne présentent ni de pic correspondant au coefficient de friction statique, ni de plateau permettant la détermination du coefficient de friction dynamique, voir Annexe G). Les valeurs correspondent aux moyennes calculées pour les quinze mesures effectuées sur chaque modèle de gant, et se répartissent sur au moins une décade, tant pour le coefficient de friction statique que dynamique. Le Tableau - F.3 de l'Annexe F présente un résumé des résultats et des caractéristiques de gants.

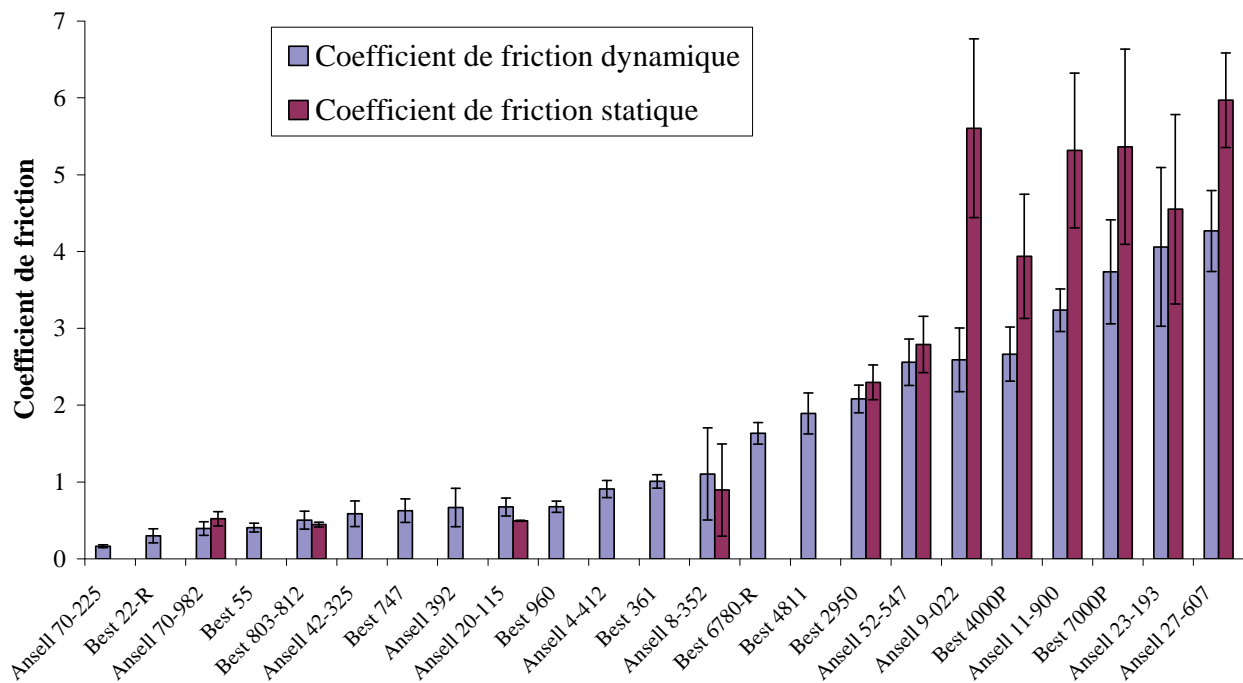


Figure 3.3 Classification des gants selon leur niveau d'adhérence

3.2 Méthode biomécanique

3.2.1 Pincement mécanique appliqué au montage de la méthode biomécanique

La Figure 3.4 présente des exemples de courbes du coefficient de friction en fonction du temps obtenues pour les trois gants avec le dispositif de pincement permettant d'utiliser la méthode biomécanique sans sujet. Ces courbes montrent que le plateau correspondant au coefficient de friction dynamique des gants est beaucoup plus stable pour les gants G1 (Ansell 70-225 en kevlar) et G2 (Ansell 392 en caoutchouc) que pour le gant G3 (Ansell 11-900 en nitrile). En effet, le glissement du dynamomètre sur la surface du gant G3 ne semble pas être uniforme en début d'essai. La stabilisation n'est obtenue qu'à la fin de l'essai et la valeur du coefficient de friction dynamique a été déterminée sur une période correspondant aux 4 dernières secondes des essais. Ce phénomène de « sautillerment » peut éventuellement être causé par le fait que le nitrile adhère fortement à l'acier et que le coefficient de friction statique est nettement plus élevé que le coefficient de friction dynamique (valeurs obtenues pour le gant G3 avec la méthode mécanique, $\mu_s = 5,3 \pm 1,0$, $\mu_d = 3,2 \pm 0,4$), ce qui n'est pas le cas pour les gants G1 et G2 ($\mu_d = 0,2$ et $0,7$ respectivement et $\mu_s =$ non détecté dans les deux cas). De plus, ce phénomène est probablement amplifié par l'absence de rigidité de la fixation du dynamomètre. Par conséquent, la force normale a été maintenue à une valeur relativement constante pour les gants G1 et G2 ($6,4\text{N} \pm 1\%$ avec le gant G1 et de $6,6\text{N} \pm 2\%$ avec le gant G2), mais a subi plus de variations pour le gant G3 ($3,9\text{N} \pm 12\%$).

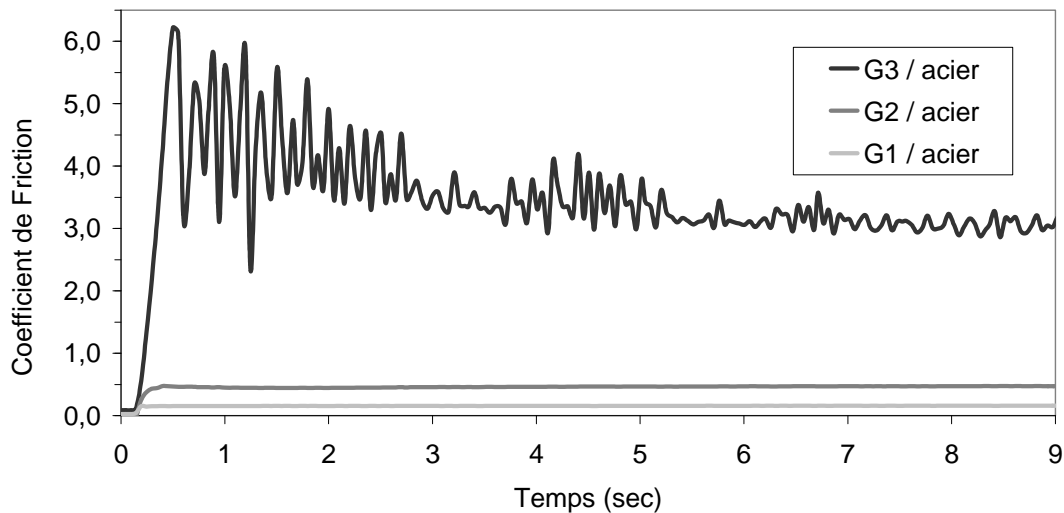


Figure 3.4 Exemple de variation du coefficient de friction des gants G1, G2 et G3 avec l'acier, obtenu avec le dispositif de pincement mécanique

Le Tableau 3.2 présente les valeurs moyennes et CV du coefficient de friction dynamique (μ_d) des gants. Les CV sont très faibles (moins de 5%), à l'exception du CV pour le cas G2/acier (caoutchouc) qui est de 24%. Dans le cas de ce gant G2 (Ansell 392), les valeurs mesurées se répartissent en deux groupes bien définis ($\mu_d = 0,46$ pour les trois premiers essais, et $\mu_d = 0,29$

pour les deux derniers). Ces observations peuvent être rapprochées des résultats obtenus par la méthode mécanique (voir Tableau - F.2 en annexe F pour le gant Ansell 392), où deux séries de mesure avaient donné des coefficients de friction dynamiques très similaires (0,5 et 0,4) tandis que la troisième série avait donné un résultat très différent (0,9). Il est possible que la présence des deux groupes de valeurs soit due à l'usure de l'échantillon puisque les cinq essais ont été répétés avec le même échantillon.

Tableau 3.2 Coefficients de friction dynamiques des gants G1, G2 et G3 avec l'acier obtenus avec le dispositif de pincement mécanique

Interfaces	μ_d [moy ± écart-type]	CV
G1/acier	0,16 ± 0,002	1%
G2/acier	0,40 ± 0,09	23%
G3/acier	3,10 ± 0,11	4%

3.2.2 Tests biomécaniques

La Figure 3.5 présente des exemples de courbes du coefficient de friction en fonction du temps obtenues avec des sujets lors des essais gant/acier. Ces courbes montrent que les mesures du coefficient de friction des gants G1 (kevlar) et G2 (caoutchouc) ont été suffisamment stables pour discerner un plateau correspondant au coefficient de friction dynamique des gants. Par contre, la mesure du coefficient de friction du gant G3 (nitrile) a donné des résultats plutôt chaotiques et il n'a pas été possible d'observer un plateau. En effet, la réalisation de l'expérimentation avec le gant G3 a été très difficile car le gant porté par les sujets adhérait beaucoup à la surface d'acier du dynamomètre, rendant quasi-impossible le glissement uniforme du dynamomètre sur la surface du gant. Ceci a créé un phénomène de « sautillerment » qui a été plus important que celui observé lors des essais avec le dispositif de pincement mécanique du montage biomécanique, et qui a aussi rendu difficile le maintien de la force de serrage de 5 N. Pour les essais avec le gant G3, la variation de la force normale appliquée par les sujets durant l'essai a été de 18% en moyenne, alors qu'elle a été de 3% et 4% pour les gants G1 et G2 respectivement.

La Figure 3.6 présente des exemples de courbes du coefficient de friction en fonction du temps obtenues lors des essais à main nue (main/acier, et main/intérieur gants). Les mesures ont été suffisamment stables pour identifier le plateau correspondant au coefficient de friction dynamique, notamment à partir de la 5^e seconde de l'essai. Pour ces interfaces, les sujets ont réussi à maintenir la force normale constante avec une variation de 4% à 9%.

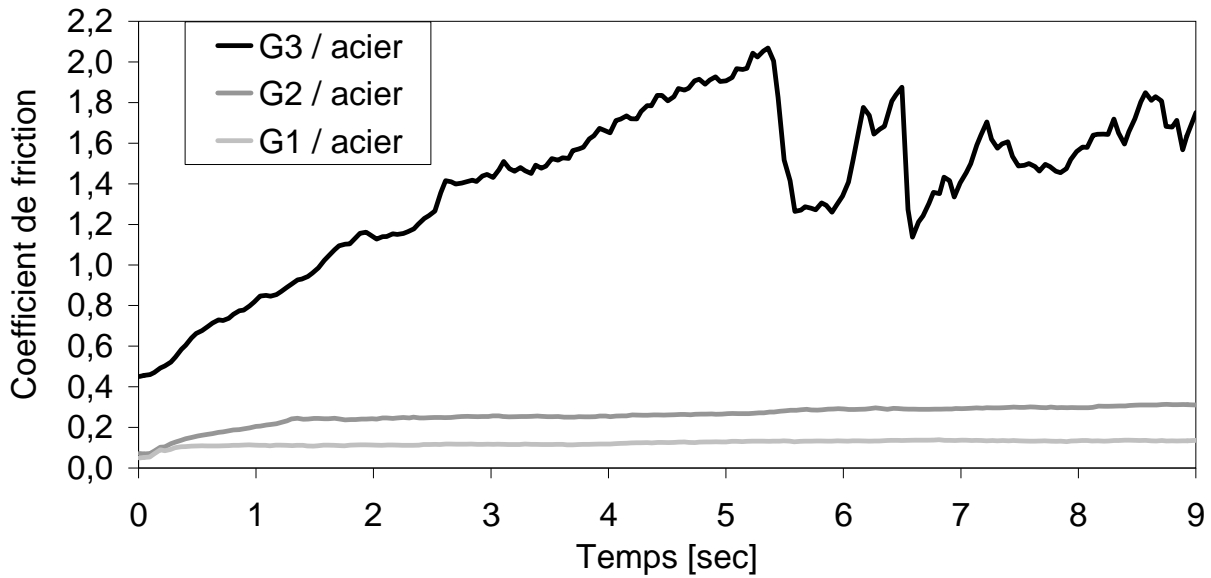


Figure 3.5 Variation du coefficient de friction de la surface externe des gants G1, G2 et G3 avec l'acier, obtenue pour un sujet avec la méthode biomécanique

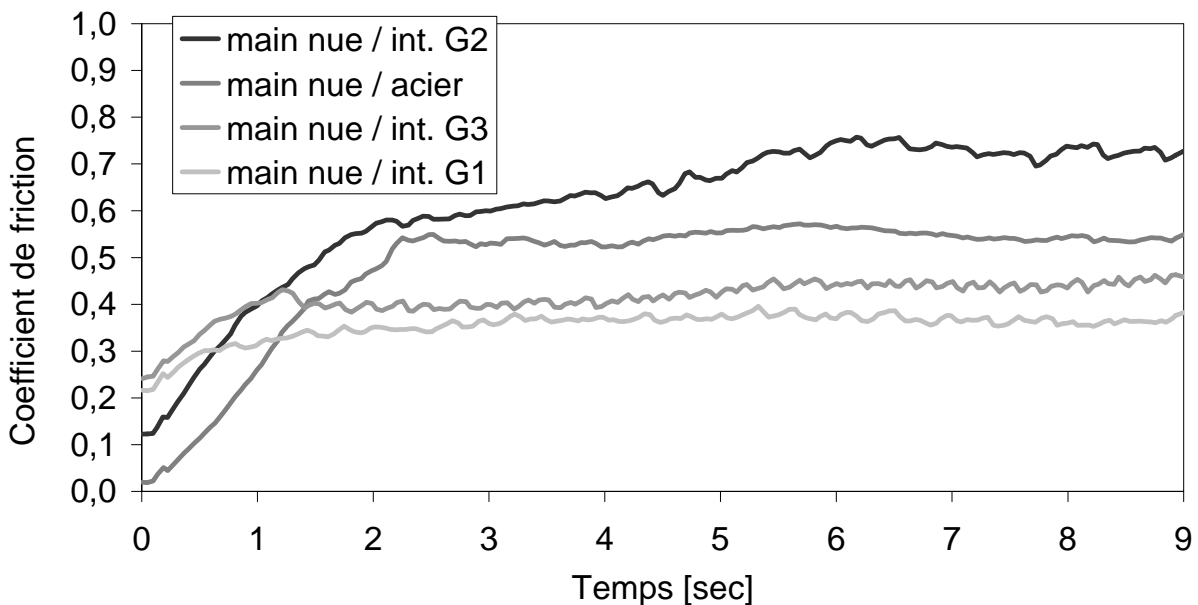


Figure 3.6 Variation du coefficient de friction de la main nue avec l'acier et avec la surface interne des gants G1, G2 et G3, obtenue pour un sujet avec la méthode biomécanique

Les mesures des coefficients de friction dynamiques semblent être répétables pour un même sujet puisque les CV intra-sujets, pour trois répliques, sont de l'ordre de 5% (au maximum 10%) pour toutes les interfaces. Toutefois, les variations intra-sujets pour l'interface G3/acier sont beaucoup plus élevées.

Les coefficients de friction dynamique moyens (moyenne sur les 6 sujets) ont été calculés pour chacune des interfaces. Les valeurs pour l'interface G3/acier ont été rejetées de l'analyse statistique puisqu'elles ne sont pas assez précises. L'analyse ANOVA à un facteur (types d'interface) à 6 niveaux (plutôt que 7 comme prévu initialement) avec mesures répétées a révélé une différence significative entre les interfaces ($p < 0,001$). La Figure 3.7 et le Tableau 3.3 présentent les coefficients de friction dynamique aux 6 interfaces. La comparaison multiple de Tukey-Kramer a montré qu'il y a des différences significatives entre toutes les interfaces, à l'exception des interfaces main/G1, G2/acier et main/G3 qui n'ont pas de différences significatives entre elles. Les CV, représentant la variabilité des mesures sur les 6 sujets, sont de 8% à 24%.

Tableau 3.3 Valeurs des coefficients de friction dynamique μ_d pour les différentes interfaces

Interfaces	μ_d [moy \pm écart-type]	CV
Main/acier	0,77 \pm 0,16	21%
G1/acier	0,16 \pm 0,02	16%
G2/acier	0,37 \pm 0,09	24%
G3/acier	-	-
Main/int.G1	0,40 \pm 0,05	11%
Main/int.G2	0,90 \pm 0,13	14%
Main/int.G3	0,43 \pm 0,03	8%

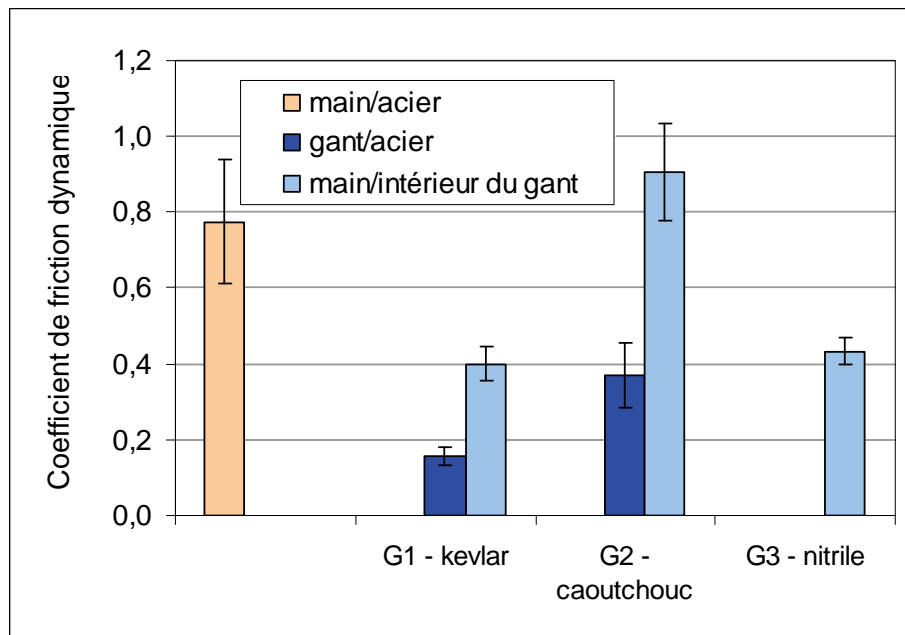


Figure 3.7 Histogramme des coefficients de friction dynamique μ_d pour les différentes interfaces

Il s'est avéré que les gants G1 et G2 ont été plus adhérents au niveau de l'interface main/intérieur du gant qu'à l'interface gant/acier. Ainsi, lorsque les sujets effectuaient les essais, les gants restaient bien en place sur la main. Par contre, le gant G3 a été plus adhérent à l'interface gant/acier qu'à l'interface main/ intérieur du gant. Donc, lorsque les sujets effectuaient les essais avec ce gant, celui-ci collait de façon importante sur le dynamomètre, à tel point qu'il se mettait à tourner autour des doigts, même s'il s'agissait d'un gant bien ajusté. Cette observation n'est probablement pas étrangère au phénomène de « sautellement » rencontré avec ce gant. Toutefois, il n'est pas possible avec un seul modèle de gant de déterminer si ce problème de sautellement est dû au fait que le coefficient de friction statique du nitrile sur l'acier est beaucoup plus élevé que son coefficient de friction dynamique, ou que le gant adhère moins à la main qu'à l'objet en déplacement.

Dans le cas du gant G3 (nitrile), qui adhère de manière importante à l'acier du dynamomètre, trois types de comportement ont été observés chez les sujets: 1) ils pouvaient volontairement relâcher le dynamomètre pour forcer le glissement, d'où un effet de « sautellement », 2) ils pouvaient involontairement suivre des doigts le déplacement du dynamomètre, ou 3) ils pouvaient garder les doigts en place et maintenir toujours la même force de pincement, mais dans ce cas, le gant tournait encore plus autour des doigts et s'étirait de sorte que la force mesurée par la cellule de charge de la machine d'essai mécanique n'était pas celle de la friction de ce matériau sur l'acier et se confondait avec la résistance à l'étirement du matériau. Ces trois types de comportement pouvaient se produire individuellement ou en combinaison. Dans tous les cas, les réactions des sujets faussent les mesures d'adhérence ou induisent des erreurs importantes, rendant la méthode biomécanique difficilement applicable avec ce modèle de gants.

3.2.3 Effet de la configuration du montage et de la répartition des forces de chaque côté du dynamomètre

Le dynamomètre utilisé pour la méthode biomécanique est formé de deux plaques rigides reliées entre elles par deux cellules de charge. Une pièce à l'extrémité de l'une des deux plaques fait en sorte que le dynamomètre, une fois attaché, est centré par rapport à la cellule de charge de la machine d'essai mécanique. Toutefois, puisque l'une des deux plaques est attachée, seule l'autre plaque peut se déplacer pour mesurer la force de serrage du sujet. Ainsi, la force normale exercée sur les cellules de charge est mesurée sur une seule des deux plaques du dynamomètre. Il est raisonnable de supposer que, naturellement, le sujet exercera une force égale sur les deux plaques du dynamomètre, ce qui a d'ailleurs été constaté par Kinoshita [15]. Cependant, bien qu'un lien rigide unisse le dynamomètre à la cellule de charge, il est tout de même possible de le faire s'incliner légèrement en n'exerçant pas une force égale sur les deux plaques du dynamomètre, ce qui pourrait éventuellement fausser les mesures et faire varier les résultats. Cet effet peut aussi être amplifié lorsque les gants sont très adhérents et que le sujet doit compenser constamment pour empêcher le « sautellement ».

Quelques essais ont été effectués avec un sujet pour évaluer l'influence de la configuration du montage sur l'évaluation des coefficients de friction. Les essais sont similaires à ceux réalisés par les 6 sujets pour l'interface main/acier. Ils ont consisté à maintenir, avec la main droite, une force de serrage constante de 5 N pendant le déplacement du dynamomètre à vitesse constante de 150 mm/min. Deux configurations du dynamomètre ont été testées et sont illustrées à la Figure

3.8 : pour la configuration 1 (celle utilisée pour la méthode biomécanique avec les 6 sujets), les doigts étaient du côté de la plaque mobile et le pouce du côté de la plaque fixe, alors que la configuration 2 correspondait à l'arrangement inverse. Pour chaque configuration, cinq essais ont été effectués en serrant de manière égale sur les deux côtés du dynamomètre ($F_{NA}=F_{NB}$), 3 essais ont été effectués en appuyant plus fort sur la plaque mobile du dynamomètre ($F_{NA}<F_{NB}$), et 3 autres essais en appuyant plus fort sur la plaque fixe du dynamomètre ($F_{NA}>F_{NB}$). Pour les essais où les efforts ont été inégaux sur les deux côtés du dynamomètre, la force normale enregistrée par les cellules de charge du dynamomètre a quand même été maintenue constante à 5 N. Un coefficient de variation sur la force normale de moins de 8% a été obtenu pour la majorité des essais.

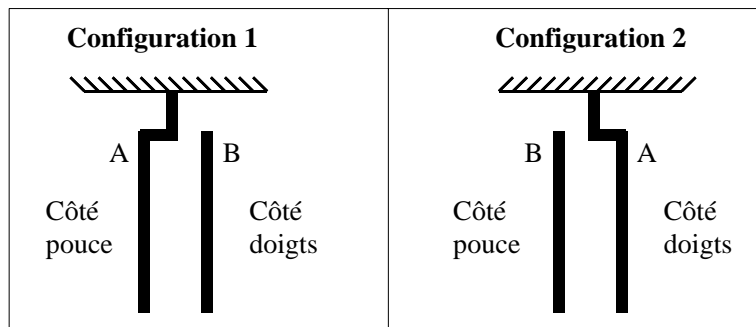


Figure 3.8 Schéma des configurations 1 et 2 pour les essais biomécaniques

Le Tableau 3.4 présente les coefficients de friction dynamique moyens obtenus pour ce sujet unique dans des conditions de main nue sur acier pour les deux configurations proposées et les trois types de répartition de force.

Tableau 3.4 Coefficients de friction dynamique (μ_d) selon la configuration du montage et la répartition des forces sur les côtés du dynamomètre.

	$F_{NA}=F_{NB}$		$F_{NA}<F_{NB}$		$F_{NA}>F_{NB}$	
	Config.1	Config.2	Config.1	Config.2	Config.1	Config.2
Moyenne μ_d	0,74	1,06	0,59	0,31	1,24	1,40
Écart-type	0,08	0,07	0,01	0,01	0,18	0,08
CV (%)	10,92	6,75	1,60	3,68	14,47	5,72
Valeur référence*	0,77 ± 0,16					

* Valeur obtenue par la méthode biomécanique avec les 6 sujets, tirée de la Figure 3.7.

Bien que ces résultats soient très préliminaires, ils permettent de faire deux constatations. Tout d'abord, le fait d'appuyer plus fort d'un côté que de l'autre du dynamomètre (tout en maintenant une force normale totale de 5 N) semble avoir un effet sur la mesure du coefficient de friction. En effet, si une force normale plus grande est appliquée sur la plaque fixe du dynamomètre (A) alors que la force normale mesurée par le dynamomètre est toujours à 5 N (cas $F_{NA}>F_{NB}$), la force normale mesurée par le dynamomètre sera sous-estimé par rapport à la valeur réelle, ce qui aura pour effet de surestimer la valeur du coefficient de friction. Il est donc important dans l'expérimentation d'inciter le sujet à appliquer une force égale sur les deux côtés du dynamomètre. Ensuite, même si les forces sont égales sur les deux plaques du dynamomètre

(cas $F_{NA}=F_{NB}$), le changement de configuration semble avoir un effet sur la mesure des coefficients de friction. Cette source possible d'erreur de mesure devrait être examinée plus en détail par des essais avec d'autres sujets.

3.3 Tests de perception

Les résultats issus des tests de perception avant et pendant l'expérimentation sont présentés au Tableau 3.5. De manière générale, les gants ont été perçus comme assez confortables ($>3/4$), ayant une bonne respirabilité ($>3/4$), un bon ajustement ($>3/4$) et une bonne souplesse ($3/4$), à l'exception du gant de kevlar (G1) qui n'a pas été jugé très bien ajusté ($2/4$) ni très confortable ($2/4$), et le gant de caoutchouc (G2) qui offre peu de respirabilité ($1/4$). Ces caractéristiques générales des gants ont été perçues sensiblement de la même façon avant et pendant l'expérimentation.

Tableau 3.5 Résultats des tests de perception des gants

Étape	Réponse	Gant Kevlar	Gant Caoutchouc	Gant Nitrile	Main Nue	Intérieur Gant Kevlar	Intérieur Gant Caoutchouc	Intérieur Gant Nitrile
Pré-expérimentation	1. Confort	2	3	4				
	2. Respirabilité	4	1	3				
	3. Ajustement	2	3	4				
	4. Souplesse	3	3	3				
	5. Adhérence	1	3	4	3			
	6. Interface main/int. gant	2	3	4				
	7. Interface gant/acier	2	3	4				
Per-expérimentation	8. Confort	3	3	3				
	9. Respirabilité	4	1	3				
	10. Ajustement	2	3	3				
	11. Adhérence	1	2	4	3			
	12. Interface main/int. gant	2	3	3		2	3	2
	13. Interface gant/acier	2	3	4				
	14. Fatigue générale	1	1	2	2	1	2	1

Les sujets ont perçu l'adhérence des gants d'une façon très similaire avant et pendant l'expérimentation. À propos de l'adhérence générale des gants (question 5 et 11), les sujets ont trouvé que le gant de kevlar (G1 : $1/4$) était nettement moins adhérent que les gants de caoutchouc (G2 : $3/4$ avant et $2/4$ pendant l'expérimentation) et de nitrile (G3 : $4/4$). Il en est de même pour la perception de l'adhérence spécifique de l'interface gant/acier (questions 7 et 13). Peu de changements ont été notés entre la perception avant et pendant l'expérimentation pour l'adhérence spécifique de l'interface main/gant (questions 6 et 12). Toutefois, lorsque les sujets ont réalisé les essais avec les plaques recouvertes du matériau constituant la surface interne des

gants, leur perception de l'adhérence entre la main et l'intérieur du gant G3 a changé. Les résultats indiquent que la perception n'est généralement pas très différente avant et pendant l'expérimentation, c'est-à-dire que la manœuvre que les sujets font avec les gants pendant la réalisation des essais biomécaniques ne modifie généralement pas leur première impression qu'ils ont eu des gants avant l'expérimentation lorsqu'aucune tâche spécifique ne leur était imposée.

Le niveau de fatigue des différentes régions du membre supérieur impliquées dans la réalisation de l'expérience a été questionné chez les 6 sujets, de même que le niveau de difficulté associé au respect des contraintes d'expérimentation. Ces informations sont présentées au Tableau 3.6.

Tableau 3.6 Niveaux moyens de fatigue et de difficulté perçus par les sujets

Niveau de fatigue (1-bas; 4-élevé)				Niveau de difficulté (1-facile; 4-difficile)				
15. Fatigue générale	16. Fatigue main doigts	17. Muscle avant-bras	18. Muscle épaule	19. Expérimentation en général	20. Maintenir force	21. Maintenir position main	22. Reprendre toujours la même prise	23. Maintenir posture
2	2	1	2	3	3	3	3	3

De manière générale, le niveau de fatigue a été moyennement faible (2/4), notamment dans l'articulation de la main et les muscles de l'épaule. La fatigue dans les muscles de l'avant-bras a été plutôt faible (1/4). Par contre, le niveau de difficulté a été jugé assez élevé en général (3/4), autant pour maintenir la force de pincement constante que pour maintenir la position des doigts durant l'essai, reprendre la même prise à chaque essai et maintenir la posture. À la lumière des difficultés perçues par les sujets, il est probable que la prise digitale en pincement se soit modifiée durant l'expérimentation.

4. DISCUSSION

4.1 Partie mécanique

Les modifications apportées au TDM-100, en particulier le remplacement de la lame par une butée métallique offrant une surface de contact horizontale et l'installation d'un porte-échantillon présentant une surface plane, ont permis de donner à cet appareil conçu pour la caractérisation de la résistance à la coupure des matériaux de protection la capacité de mesurer les coefficients de friction statique et dynamique des gants de protection. La configuration obtenue correspond aux principes des méthodes d'étirage et à la configuration du montage de la méthode biomécanique, avec un échantillon se déplaçant sur une surface plane métallique. L'étude de l'influence de la force normale, et la comparaison des résultats obtenus pour des matériaux de référence ont permis de s'assurer de la validité de la technique de mesure. La valeur de l'erreur associée à la technique de mesure a été évaluée à 5%.

Les valeurs des coefficients de friction statique et dynamique ont été mesurées pour 23 des 27 modèles de gants testés, avec des CV de 5% à 67% selon les modèles (basés sur 5 mesures par gant, 3 gants pour chaque modèle). Les coefficients de variation parfois élevés ont généralement pu être associés à des différences entre les trois séries de mesure correspondant aux trois gants différents caractérisés pour chaque modèle ou à une variation de la rugosité du gant sur la zone testée. Dans un certain nombre de cas, les courbes de variation de la force horizontale en fonction du déplacement ne présentent pas de pic initial utilisé pour le calcul du coefficient de friction statique, ce qui a été attribué au fait que la valeur de ce coefficient est égale à celle du coefficient de friction dynamique.

Pour quatre modèles de gants, la force horizontale continuait d'augmenter sur la distance testée sans atteindre de plateau, ce qui rend impossible la détermination du coefficient de friction dynamique. Différentes hypothèses ont été proposées pour expliquer ce phénomène qui se manifeste essentiellement pour des gants recouverts de caoutchouc naturel, en particulier l'existence d'un gradient de poids moléculaire dans l'épaisseur du matériau, les espèces de faible poids moléculaire ayant migré vers la surface dont la butée en glissant enlève des couches fines.

Différentes améliorations de l'appareil peuvent éventuellement être envisagées.

- La configuration actuelle, dans laquelle la butée glisse sur l'échantillon, peut conduire à un effet d'usure, d'échauffement ou d'accumulation de débris. Elle avait été choisie pour correspondre au montage biomécanique. Il pourra éventuellement se révéler préférable d'invertir butée et porte-échantillon afin de soumettre à la friction une surface constamment renouvelée de l'échantillon.
- Pour certains modèles de gants, la force de friction se trouvait à la limite de détection de la cellule de charge : une cellule plus appropriée pourra permettre d'augmenter éventuellement la précision de mesure des valeurs de coefficients de friction.
- La présence d'éraflures sur la surface de contact de la butée a été notée. Or, la constance de la condition de surface de la butée est une exigence pour la qualité des résultats mesurés. L'utilisation d'un matériel plus dur serait préférable.

Cette étude étant préliminaire, sa portée était limitée. Quelques suggestions d'avenues à considérer lors d'une phase ultérieure du projet peuvent néanmoins déjà être identifiées. En particulier, la méthode pourrait être modifiée afin de permettre la mesure du coefficient de friction de la peau avec la surface interne des gants en s'inspirant des méthodes *in vivo* utilisées dans la littérature [48] où la peau est tout simplement mise en contact avec une sonde en déplacement, n'impliquent pas de tâche fonctionnelle du sujet. Cela permettrait de comparer cette méthode avec les mesures biomécaniques avec sujets. En plus, afin d'aider les manufacturiers à développer des gants offrant des propriétés d'adhérence optimales, il serait pertinent d'étudier l'effet des contributions respectives de la rugosité et de la nature du matériau sur les coefficients de friction. Finalement, une grande variété de matériaux et de conditions de surface et environnementales étant présentes sur le milieu du travail, il serait pertinent de modifier le montage afin de pouvoir caractériser l'adhérence des gants de protection en variant la nature du matériau utilisé pour la butée, en appliquant différents types de contaminants (eau, huile,...) et en variant les conditions de température et d'humidité environnantes.

4.2 Partie biomécanique

Cette partie du travail visait à améliorer le montage dynamométrique mis au point lors d'une activité précédente à l'IRSST et qui avait été testée auprès de 30 sujets pour trois conditions de gants avec trois matériaux [28]. Cette étude précédente avait montré une variabilité importante des résultats, rendant très difficile la discrimination du niveau d'adhérence des gants pour les conditions testées. Dans la présente étude, un nombre restreint de six sujets a été invité à participer à l'expérimentation étant donnée la portée limitée de l'étude. Malgré cette limite, les résultats issus de la méthode biomécanique présentent des coefficients de variations plus faibles que ceux obtenus lors de l'étude précédente, soit de l'ordre de 8% à 24% selon les interfaces testées. De plus, les résultats semblent assez reproductibles puisque les coefficients de variation intra-sujets sont de l'ordre de 5% (maximum 10%). Bien que le nombre de sujets semble avoir été suffisant pour discriminer de manière significative certaines interfaces, il n'a toutefois pas permis d'évaluer l'effet de la variabilité des sujets sur les résultats des différentes interfaces, ce qui constitue l'une des principales limites de l'étude.

La méthode biomécanique développée dans cette étude a consisté à déplacer à vitesse constante un dynamomètre sur lequel un sujet applique une force de préhension constante. Alors que la plupart des méthodes biomécaniques permettent de mesurer le coefficient de friction statique des gants [7, 13-16, 20, 28], cette méthode a permis de mesurer les coefficients de friction dynamiques par une tâche fonctionnelle de préhension pour deux des trois gants sélectionnés (pour les gants G1-Ansell 70-225 et G2-Ansell 392) sur une surface en acier. Elle a également permis de mesurer le coefficient de friction dynamique entre la main et la surface interne des gants. Dans le cas des gants G1 et G2, le pic correspondant au coefficient de friction statique n'a pas été détecté, ce qui est en accord avec les résultats obtenus avec la méthode d'essais mécaniques. Un tel comportement est cohérent avec ce qui est rapporté dans la littérature pour d'autres matériaux polymères [41]. Toutefois, les coefficients de friction (statique et dynamique) du gant G3-Ansell 11-900 n'ont pas pu être mesurés par la méthode biomécanique car ce gant adhérait à la surface du dynamomètre à un point tel que le glissement uniforme du dynamomètre sur la surface du gant était quasi-impossible. Le système de positionnement développé semble avoir permis aux sujets de garder une position confortable et non fatigante durant les essais et de

maintenir la force de pincement cible relativement constante (CV moyen de 3% à 9%). Par contre, la majorité des sujets ont trouvé difficile de garder la même position et la même prise pour chaque essai.

Une analyse ANOVA et un test de comparaison multiple Tukey-Kramer ont permis de mesurer des différences significatives entre toutes les interfaces testées (à l'exception des interfaces main/G1, G2/acier et main/G3 qui n'ont pas de différences significatives entre elles). Toutefois, ces différences significatives ne permettent pas de conclure sur la fiabilité de la méthode biomécanique puisque seulement trois gants ont été testés, et que ces gants avaient des coefficients de friction très différents. De plus, cette méthode n'a pas donné de résultats utilisables pour le gant très adhérent G3 (nitrile). En effet, étant donné que ce gant est très adhérent, les sujets avaient beaucoup de difficulté à laisser le gant glisser sur la surface tout en maintenant la force normale constante (CV de 18%). Au lieu de glisser, le gant tournait autour de leurs doigts et, lorsqu'il glissait, le signal enregistré correspondait à un « sautillerment » du gant à la surface en acier. Deux différences importantes de ce gant (G3) par rapport aux deux autres modèles peuvent expliquer ce comportement : d'une part, le coefficient de friction dynamique à l'interface gant/acier est beaucoup plus élevé que celui à l'interface main/gant, et d'autre part, pour le nitrile, le coefficient de friction statique est beaucoup plus élevé que le dynamique.

Bien que le développement de la méthode biomécanique dans cette étude soit exploratoire, elle a permis de faire valoir son intérêt surtout pour étudier l'effet des coefficients de friction sur la fonction de préhension plutôt que pour caractériser l'adhérence des gants. Pour mieux analyser l'effet de l'adhérence des gants sur la force de préhension, il serait souhaitable que la méthode puisse simuler une tâche plus « fonctionnelle », c.-à-d. similaire à la tâche de préhension qu'un individu exerce normalement pour prévenir le glissement. En ce sens, certaines recommandations peuvent être suggérées pour une étude ultérieure. Au lieu de faire déplacer le dynamomètre à une vitesse constante, le dynamomètre devrait être soumis à une force de glissement graduelle permettant au sujet de choisir naturellement la force de préhension à appliquer pour éviter le glissement du dynamomètre. Il serait également pertinent de faire des essais avec des surfaces autres que l'acier ou bien des surfaces contaminées ou mouillées afin de s'approcher davantage des diverses conditions retrouvées sur les milieux de travail. Des essais biomécaniques devraient également être réalisés avec un plus grand nombre de sujets et une plus grande variété de gants dont certains présentant les particularités rencontrées avec le gant G3.

4.3 Comparaison des méthodes mécaniques et biomécanique

Les résultats des mesures des coefficients de friction des gants obtenus avec la méthode mécanique utilisant le TDM-100 modifié, avec la méthode biomécanique avec sujets et avec le montage biomécanique sans sujets appliquant mécaniquement une force de pincement, ont été comparés. L'histogramme de la Figure 4.1 présente les coefficients de friction (moyenne \pm écart-type) des gants G1 (kevlar), G2 (caoutchouc) et G3 (nitrile) pour ces 3 méthodes.

Gants G1 (kevlar) et G2 (caoutchouc)

Pour les gants G1 (kevlar) et G2 (caoutchouc), les mesures biomécaniques avec les sujets ont donné des coefficients de friction presque identiques à ceux obtenus avec le montage

biomécanique sans sujets, tel que le montre la Figure 4.1. Ces résultats indiquent que la méthode biomécanique peut avoir un bon potentiel de validité avec certains gants, d'autant plus que la variabilité des mesures avec les sujets a été de moins de 25%. À la section 3.2.3, il a été suggéré qu'une erreur puisse être introduite dans les mesures avec le montage de la méthode biomécanique par le fait qu'une des plaques du dynamomètre soit attachée rigidement à la cellule de charge de la machine d'essai mécanique alors que l'autre est mobile. Cette erreur n'a pas pu se produire avec le dispositif de pincement mécanique puisque dans ce cas le dynamomètre était attaché avec un lien flexible à la cellule de charge, conséquemment la force appliquée des deux côtés est la même. Or, la similitude des résultats obtenus avec ces deux méthodes semble indiquer que cette erreur potentielle n'a finalement pas eu d'influence sur les résultats avec la méthode biomécanique avec sujets.

La comparaison des résultats obtenus par le montage biomécanique avec sujets et sans sujets pour les gants G1 et G2 indique aussi que l'utilisation de sujets humains a eu peu d'influence sur la prise de mesures, en regard à la procédure expérimentale utilisée lors des essais. En effet, s'il est demandé aux sujets d'appliquer une force de pincement cible et de la maintenir toute la durée de l'essai, les réflexes normaux d'un sujet qui retient un objet pour ne pas l'échapper ne sont peu ou pas sollicités.

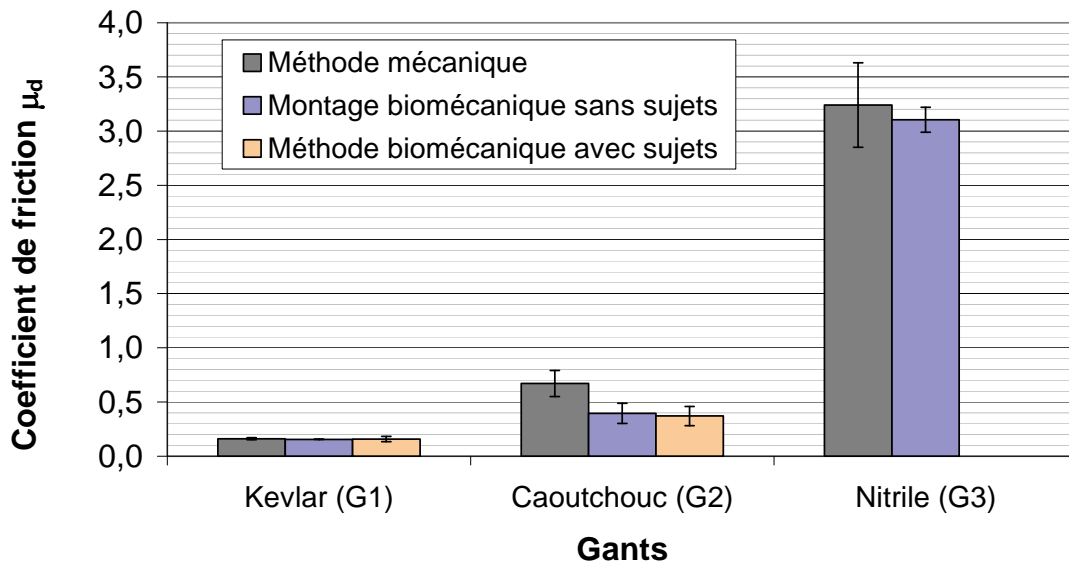


Figure 4.1 Comparaison des coefficients de friction dynamiques obtenus par les différentes méthodes

En comparant la méthode mécanique utilisant le TDM modifié et la méthode biomécanique avec et sans sujets, l'évaluation du coefficient de friction du gant de kevlar (G1) a été identique pour les trois méthodes. Par contre, pour le gant de caoutchouc (G2), l'évaluation du coefficient de friction par le montage biomécanique avec sujets a été la même qu'avec le montage sans sujets, mais inférieure à l'évaluation faite par la méthode mécanique. Cependant, si les résultats individuels des tests mécaniques pour les trois séries réalisées sur des gants différents sont examinés (voir Tableau - F.2 en Annexe F), il apparaît que les séries 2 et 3 donnent pratiquement les mêmes résultats que les mesures biomécaniques avec et sans sujets, tandis que la série 1 est

totalemment différente. Comme mentionné dans la section 3.1.3, un tel phénomène est attribué à des variations de composition du matériau en surface et/ou de rugosité entre les gants d'un même modèle. Il est donc possible d'en conclure qu'un bon accord quantitatif entre les trois méthodes est également obtenu pour le coefficient de friction dynamique du gant G2. De plus, dans le cas des trois méthodes, un comportement de type d (absence de pic caractéristique du coefficient de friction statique) a été observé.

Gant G3 (nitrile)

Les tests réalisés avec le gant G3 en nitrile ont montré que la méthode biomécanique n'est pas applicable avec tous les modèles de gants. Ce gant est distinctif des deux autres gants par le fait que son coefficient de friction statique avec l'acier est beaucoup plus élevé que son coefficient de friction dynamique ($\mu_s \gg \mu_d$). De plus, ce gant est le seul des trois gants testés à être plus adhérent au niveau de sa surface externe avec l'acier qu'il ne l'est au niveau de sa surface interne avec la main. À cause de cela, les sujets n'ont pas été capables de se conformer à la procédure et aux exigences du test biomécanique, tel que discuté à la section 3.2.2, ce qui a induit des erreurs de mesure importantes et a rendu les données expérimentales inutilisables. Par ailleurs, les deux autres méthodes (méthode mécanique et montage biomécanique sans sujets) ont donné des coefficients de friction dynamique similaires.

La différence majeure entre les trois méthodes d'essai utilisées réside dans la contribution de la surface interne du gant aux résultats obtenus. Dans la méthode mécanique et celle avec le montage biomécanique sans sujets, la surface interne du gant est collée, respectivement, sur le porte-échantillon du TDM et sur le dispositif de pincement, alors que dans la méthode biomécanique avec sujets, la surface interne du gant est libre de glisser sur la surface de la main lors des tests. Le fait que le gant G3, au contraire des deux autres modèles, soit beaucoup moins adhérent au niveau de sa surface interne avec la main qu'au niveau de sa surface externe avec l'acier, pourrait expliquer les problèmes de mesure de la méthode biomécanique rencontrés avec ce gant. Cependant, cette interprétation n'est pas la seule pour expliquer le phénomène de sautillerment avec le gant G3 puisque ce phénomène se retrouve aussi sur les courbes obtenues avec les essais faits avec le montage biomécanique sans sujets alors que la surface interne est collée. La seule explication pourrait être le fait que le coefficient de friction statique est beaucoup plus élevé que le coefficient dynamique dans le cas du gant G3, ce qui n'est pas le cas pour les deux autres gants. L'importance de l'effet des deux particularités du gant G3 pourra éventuellement être vérifiée en effectuant des mesures sur d'autres modèles de gant présentant l'une, l'autre et les deux de ces particularités.

Dans le cas du gant G3, seule la méthode mécanique a permis une mesure quantitative du coefficient de friction statique, comme l'illustre la Figure 4.2 (le pic de la courbe en noir). Cependant, dans le cas du montage biomécanique sans sujets, même si le signal ne présentait pas un pic initial unique mais de larges oscillations se poursuivant pendant deux à trois secondes, la valeur maximale de ces oscillations correspond néanmoins à l'amplitude du coefficient de friction statique mesurée par la méthode mécanique.

La comparaison des trois méthodes a montré que les valeurs des coefficients de friction des matériaux de gants mesurées sont très semblables quelle que soit la méthode expérimentale utilisée, en autant que les paramètres de l'essai demeurent les mêmes, comme cela a été le cas

dans cette étude (surface d'acier, force normale et vitesse de déplacement identiques). Ces résultats suggèrent qu'une méthode mécanique ne faisant pas intervenir de sujets humains est suffisante pour mesurer le coefficient de friction des gants. La méthode mécanique développée dans cette étude pourrait être modifiée afin de permettre la mesure du coefficient de friction de la peau avec la surface interne des gants en s'inspirant des méthodes *in vivo* utilisées dans la littérature [48] qui n'impliquent pas de tâche fonctionnelle du sujet et où la peau est tout simplement mise en contact avec une sonde en déplacement. Les résultats obtenus dans cette étude préliminaire suggèrent qu'une méthode biomécanique imposant au sujet de maintenir une force constante fait moins intervenir l'aspect « fonctionnel » comparativement à la méthode qui avait été utilisée dans le projet précédent (la phase I de cette étude exploratoire) [28]. En effet, cette méthode demandait au sujet de prendre et de tenir un objet, et ensuite de le laisser tomber, permettant ainsi de mesurer l'effet du gant sur la marge de sécurité (safety margin) qu'applique naturellement l'individu pour prévenir le glissement. Cette méthode n'avait toutefois pas donné de résultats concluants. Il est possible qu'une méthode biomécanique laissant le sujet choisir naturellement la force de préhension pour éviter le glissement du dynamomètre et augmenter en même temps graduellement la force tangentielle appliquée au dynamomètre pour le faire glisser (plutôt que de demander au sujet de le laisser tomber), permettrait de mieux simuler une tâche fonctionnelle tout en contrôlant mieux le glissement du dynamomètre.

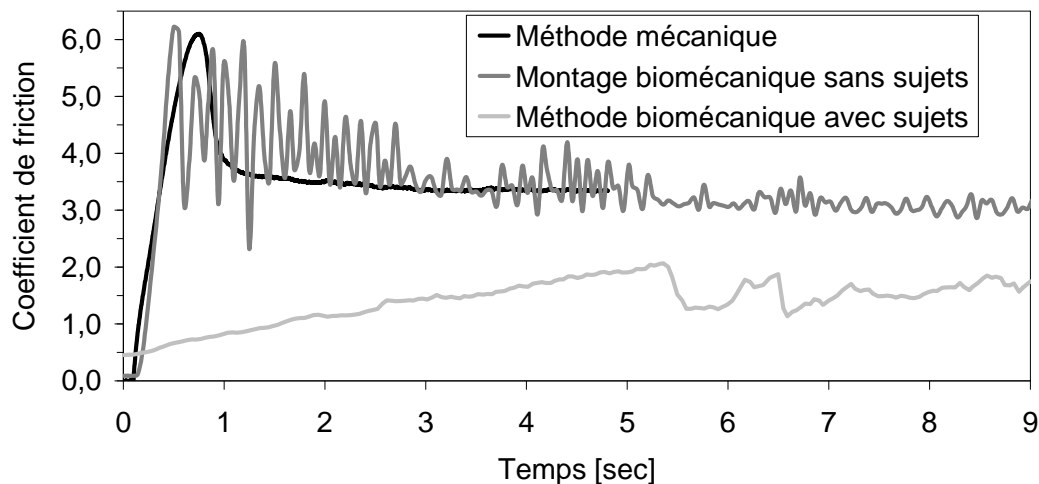
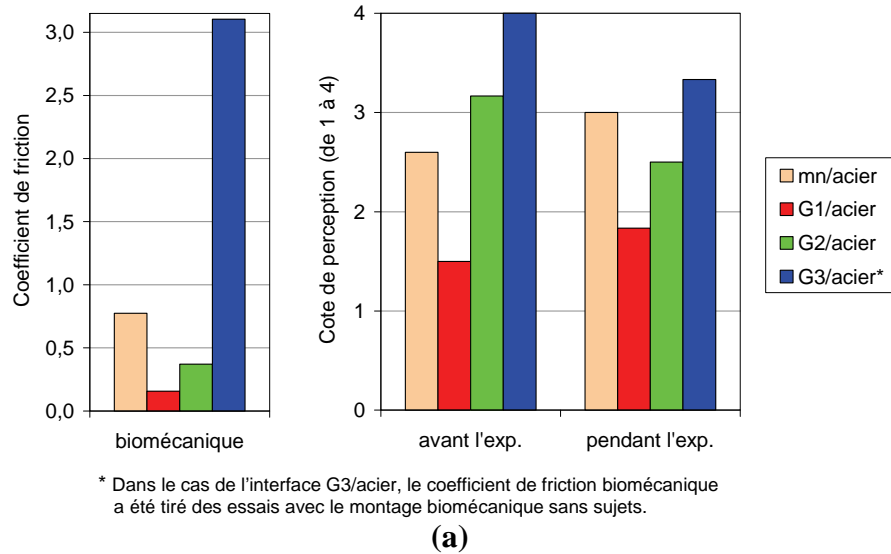


Figure 4.2 Variation du coefficient de friction pour le gant G3 (nitrile) avec l'acier obtenue par les différentes méthodes

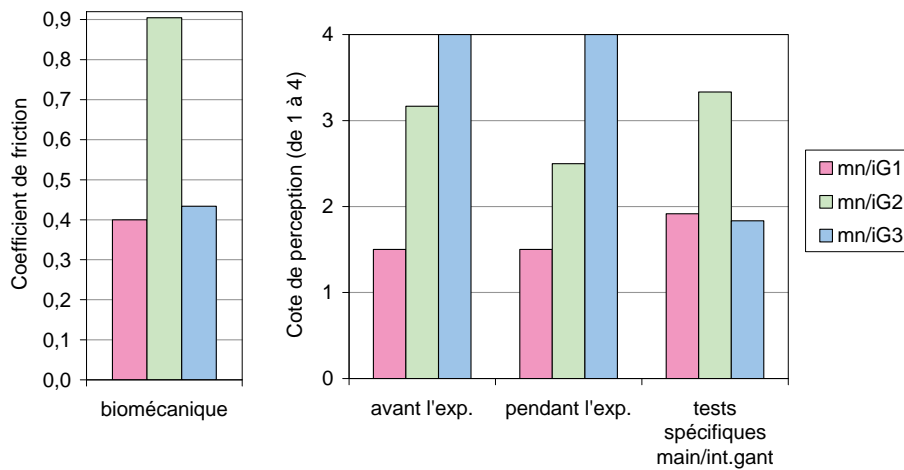
4.4 Comparaison entre les tests de perception et biomécanique

Les valeurs du coefficient de friction obtenus avec la méthode biomécanique ont été comparés aux perceptions des sujets quant à l'adhérence des gants recueillis par le questionnaire. La Figure 4.3 montre les résultats biomécaniques et de perception avant et pendant l'expérimentation pour toutes les interfaces. Les cotes de perception moyenne de la Figure 4.3 (a) ont été tirées des questions 5 et 11 du questionnaire (voir Tableau 3.5) pour l'interface main/acier (avant et pendant l'expérimentation, respectivement) et des questions 6 et 12 pour les

interfaces gants/acier. Pour la Figure 4.3 (b), les cotes de perception moyenne sont tirées des questions 7 et 13 pour les interfaces main/intérieur gants (avant et pendant l'expérimentation, respectivement) et de la question 12 lors des tests spécifiques faits sur les plaques recouvertes du matériau constituant la surface interne des gants.



(a)



(b)

Figure 4.3 Comparaison du coefficient de friction mesuré par la méthode biomécanique et de la perception des sujets pour (a) les interfaces main/acier et gants/acier, et (b) les interfaces main/intérieur gants

4.4.1 Interface main/acier et gants/acier

La perception des sujets quant à l'adhérence de la main ou des gants par rapport à l'acier concorde assez bien avec les mesures biomécaniques des coefficients de friction comme le montre la Figure 4.3 (a). Les sujets ont trouvé que le gant G1 (kevlar) était le moins adhérent et que le gant G3 (nitrile) était le plus adhérent, tout comme le montrent les mesures biomécaniques. L'adhérence de la main à l'acier a été perçue comme étant légèrement inférieure à l'adhérence du gant G2 à l'acier avant l'expérimentation et légèrement supérieure pendant

l'expérimentation, alors qu'elle a été effectivement supérieure selon les mesures biomécaniques. Ceci indique que la perception des sujets se rapproche plus des mesures expérimentales lorsque cette perception est questionnée suite aux manœuvres imposées par la méthode biomécanique.

4.4.2 Interface main/intérieur gants

Quant à l'adhérence entre la main et la surface interne des gants, seule la perception des sujets lors des tests avec les plaques recouvertes du matériau constituant la surface interne des gants concorde avec les mesures biomécaniques des coefficients de friction. Il semble que la sensation d'adhérence de la main à l'intérieur du gant ne soit pas perçue de la même façon si le gant est porté. Il est possible que l'adhérence à l'interface main/intérieur gant soit difficile à ressentir pour les sujets, notamment lorsque le gant est relativement bien ajusté, ce qui est le cas du gant G3 (soit celui dont la perception a nettement changé). Il est possible aussi que l'adhérence à cette interface main/intérieur gant importe peu dans leur perception de l'adhérence du gant. En effet, il est curieux de constater que leur perception de l'adhérence à cette interface (main/intérieur gant) a un profil similaire à leur perception de l'adhérence des gants à l'acier, i.e. gant G1 le moins adhérent et gant G3 le plus adhérent ($G1 < G2 < G3$).

Il est difficile dans cette étude préliminaire dont la portée demeure limitée, d'analyser quel est l'effet de l'adhérence à l'intérieur du gant porté sur l'appréciation générale de l'adhérence du gant et sur l'effort musculaire généré par un sujet pour tenir une pièce. Une méthode biomécanique avec sujets est assurément un bon moyen de mesurer de façon expérimentale l'adhérence de la main avec les matériaux constituant la surface interne des gants. La méthode proposée dans cette étude semble une avenue appropriée pour mesurer le coefficient de friction dynamique.

5. CONCLUSION

Différentes approches visant la caractérisation de l'adhérence des gants de protection ont été explorées dans cette étude. Une méthode biomécanique a été mise au point à partir d'une méthode dynamométrique élaborée lors d'une étude précédente et à laquelle des modifications ont été apportées, tant au niveau du montage expérimental qu'au niveau du protocole d'essais. Cette méthode biomécanique consiste à demander au sujet de maintenir une force de serrage constante sur un dynamomètre qui se déplace à vitesse constante. Elle a permis de mesurer les coefficients de friction statique et dynamique entre la surface externe des gants et l'acier dans le cas où le sujet porte les gants, et entre la surface interne des gants et la main dans le cas où le sujet a les mains nues et le dynamomètre est recouvert d'échantillons de gants exposant la face interne des gants. Étant donnée la portée limitée et préliminaire de l'étude, les essais ont été réalisés avec seulement six volontaires et trois modèles de gants de protection faits de matériaux différents : un gant de kevlar (G1), un gant de caoutchouc (G2) et un gant de coton enduit de nitrile (G3). Une méthode purement mécanique a aussi été développée dans le cadre de cette étude à partir de l'appareil TDM-100 conçu initialement pour mesurer la résistance à la coupure des matériaux. Cette méthode a été utilisée pour mesurer les coefficients de friction de 27 modèles de gants. Pour mieux interpréter les résultats de la méthode biomécanique, un dispositif de pincement mécanique du dynamomètre, ne faisant pas intervenir de sujet humain, a été mis au point. Les trois méthodes ont utilisé la même force normale, la même vitesse de déplacement et le même type d'acier lisse. La méthode biomécanique a aussi été comparée à la perception des sujets questionnés sur l'adhérence des trois modèles de gants.

La méthode mécanique a permis de mesurer les coefficients de friction statique et dynamique pour 23 des 27 modèles de gants testés, avec des coefficients de variation de 5% à 67% selon les modèles (basés sur 5 mesures pris sur 3 gants pour chacun des modèles). Les courbes de friction obtenues pour les quatre autres gants ne permettaient pas de déterminer une valeur de coefficient de friction. La méthode biomécanique a permis de mesurer l'adhérence aux interfaces gant/acier et main/intérieur du gant pour les trois modèles de gants testés avec des coefficients de variation de 8% à 24% (basés sur 6 mesures pris sur 6 gants pour chacun des trois modèles). Toutefois, le coefficient de friction à l'interface gant/acier n'a pas pu être évalué pour le gant G3. Ce gant est distinctif des deux autres gants par le fait que son coefficient de friction statique avec l'acier est nettement plus élevé que son coefficient de friction dynamique. De plus, ce gant est le seul des trois gants testés à être plus adhérent au niveau de sa surface externe avec l'acier qu'il ne l'est au niveau de sa surface interne avec la main. À cause de cette adhérence du gant, les sujets n'ont pas été en mesure de laisser glisser le dynamomètre de manière uniforme, ce qui a induit un phénomène de « sautellement » et a rendu les données expérimentales inutilisables. L'utilisation d'un dispositif de pincement mécanique appliqué au montage de la méthode biomécanique a permis de mesurer le coefficient de friction dynamique à l'interface gant/acier pour les trois modèles de gants avec des coefficients de variation de 1% à 24% (basés sur 5 mesures prises sur 1 gant pour chaque modèle).

Les résultats ont montré que les coefficients de friction dynamiques à l'interface gant/acier mesurés pour les gants G1 et G2 par les trois méthodes sont équivalents. Ces deux gants présentent un coefficient de friction statique égal au dynamique. La méthode mécanique est la seule à avoir pu mesurer, en plus du coefficient de friction dynamique, le coefficient de friction

statique du gant G3, alors qu'aucune de ces mesures n'a pu être faite pour ce gant avec la méthode biomécanique avec sujets. Toutefois, la méthode biomécanique et sa comparaison avec les deux autres méthodes ont permis d'observer que les deux particularités du gant G3 ont eu un effet majeur sur le comportement du gant lorsqu'il est porté. La comparaison de la méthode biomécanique et les tests de perception ont révélé que les sujets perçoivent assez bien l'adhérence des gants et que leur perception de l'adhérence du gant est davantage dominé par l'interface gant/acier que par l'interface main/intérieur du gant, sachant que les gants étaient plutôt bien ajustés à leur main.

La méthode mécanique de laboratoire présente plusieurs avantages tant du point de vue de la facilité à contrôler les variables qui affectent les mesures d'adhérence que de sa capacité à mesurer les coefficients de friction d'une grande variété de gants. De plus, cette méthode est simple et peu coûteuse. Elle est accessible aux fabricants de gants puisqu'elle a été élaborée à partir du TDM-100, un appareil faisant partie des normes ISO et ASTM pour caractérisation de la résistance à la coupure des gants de protection, vendu dans plusieurs pays et utilisé par plusieurs manufacturiers de gants. Éventuellement, cette méthode pourrait être proposée au comité de normalisation F-23 de l'ASTM sur les vêtements de protection pour qu'elle devienne une norme d'essai permettant de classer le niveau d'adhérence des gants. La poursuite des travaux serait toutefois essentielle afin d'améliorer cette méthode d'essai et de pouvoir l'utiliser sous diverses conditions expérimentales comme par exemple avec des matériaux de contact autre que l'acier, ou avec des contaminants tel que des huiles ou des graisses.

6. RECOMMANDATIONS

Comme la friction est une propriété de l'interface entre deux objets, une méthode mécanique semble suffisante pour mesurer l'adhérence des gants de protection. Cette méthode a l'avantage d'être simple, rapide à utiliser et suffisamment sensible pour mesurer les coefficients de friction d'une grande variété de gants. Quelques modifications pourraient être envisagées pour améliorer la fiabilité et la reproductibilité de la méthode mécanique développée dans cette étude, tel que de faire déplacer le porte-échantillon sur la butée, plutôt que l'inverse, afin de soumettre à la friction une surface constamment renouvelée de l'échantillon, utiliser une cellule de charge permettant la mesure de force de friction très faible, et utiliser un acier plus dur et un fini de surface plus durable. Cette méthode pourrait également être modifiée afin de permettre la mesure du coefficient de friction de la peau avec la surface interne des gants en s'inspirant des méthodes in vivo utilisées dans la littérature où la peau est tout simplement mise en contact avec une sonde en déplacement, n'impliquant pas de tâche fonctionnelle du sujet. Finalement, des modifications pourraient aussi être envisagées afin de réaliser des essais sur des surfaces autres que l'acier, ou sur des surfaces contaminées (huiles, graisses) ou mouillées, ou encore dans des conditions de température et d'humidité variées afin de s'approcher davantage des diverses conditions retrouvées sur les milieux de travail.

L'amélioration de la méthode biomécanique développée dans cette étude serait souhaitable non pas pour caractériser l'adhérence des gants, mais plutôt pour mieux comprendre l'effet des coefficients de friction statique et dynamique sur la fonction de préhension, tant à l'interface gant/acier qu'à l'interface main/intérieur du gant. Au lieu de faire déplacer le dynamomètre à une vitesse constante, il serait préférable que le dynamomètre se déplace de façon graduelle, en faisant augmenter graduellement la force de glissement. Ainsi, le coefficient de friction statique pourrait être plus facilement évalué au moment du glissement. La méthode devrait être testée avec un plus grand nombre de sujets et une plus grande variété de gants, dont certains présentant les particularités rencontrées avec le gant G3. La modification de la méthode biomécanique consistant à augmenter de façon graduelle et contrôlée la force de glissement et laissant ainsi le sujet choisir naturellement la force de préhension à appliquer pour éviter le glissement du dynamomètre serait également souhaitable pour simuler une tâche plus « fonctionnelle », c.-à-d. plus proche de la tâche de préhension qu'un individu exerce normalement pour prévenir le glissement. Cette méthode permettrait de pouvoir mesurer l'effet du gant sur la force de préhension et la marge de sécurité (safety margin), et ainsi mieux analyser l'importance de l'effet de l'adhérence des gants sur la force de préhension par rapport aux effets d'autres paramètres des gants tels que l'épaisseur, la sensibilité tactile ou la souplesse. De même que pour la méthode mécanique, la capacité de réaliser des essais dans d'autres conditions serait souhaitable.

7. RÉFÉRENCES

1. Commission de la santé et de la sécurité du travail, *Dépôt de Données Centrales et Régionales (DDCR) - Données de 2003 à 2005, mises à jour en juillet 2006*, Montréal, QC, 2006
2. Batra, S.; Bronkema, L. A.; Wang, M. J., "Glove Attributes: Can They Predict Performance?". *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 14, no 3, 1994, p. 201-209.
3. Bensel, C. K., "The effects of various thicknesses of chemical protective gloves on manual dexterity". *Ergonomics*, vol. 36, no 6, 1993, p. 687-696.
4. Bishu, R. R.; Klute, G.; Kim, B., "The Effects of Extra Vehicular Activity (EVA) Gloves on Dexterity and Tactility". *Designing for Diversity. Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 37th Annual Meeting, Seattle, Washington, October 11-15, 1993. The Human Factors and Ergonomics Society, Santa Monica, California, Volume 2 1993*, p. 826-830.
5. Buhman, D. C.; Cherry, J. A.; Bronkema-Orr, L., "Effects of Glove, Orientation, Pressure, Load, and Handle on Submaximal Grasp Force". *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 25, no 3, 2000, p. 247-256.
6. Cochran, D. J.; Albin, T. J.; Bishu, R. R., "An Analysis of Grasp Force Degradation with Commercially Available Gloves". *A Cradle for Human Factors. Proceedings of the Human Factors Society 30th Annual Meeting, Dayton, Ohio, September 29-October 3, 1986. The Human Factors Society, Santa Monica, California, Volume 2 1986*, p. 852-855.
7. Groth, H.; Lyman, J., "Effects of surface friction on skilled performance with bare and gloved hands". *Journal of Applied Psychology*, vol. 42, no 4, 1958, p. 273-277.
8. Nelson, J. B.; Mital, A., "An ergonomic evaluation of dexterity and tactility with increase in examination/surgical glove thickness". *Ergonomics*, vol. 38, no 4, 1995, p. 723-733.
9. Riley, M. W.; Cochran, D. J.; Schanbacher, C. A., "Force Capability Differences Due To Gloves". *Ergonomics*, vol. 28, no 2, 1985, p. 441-447.
10. Shih, Y. C.; Wang, M. J. J., "The Effects of Weight Levels and Gloves on the Ability to Discriminate Weight Difference". *Ergonomics*, vol. 39, no 5, 1996, p. 729-739.
11. Johansson, R. S.; Westling, G., "Roles of glabrous skin receptors and sensorimotor memory in automatic control of precision grip when lifting rougher or more slippery objects". *Experimental Brain Research*, vol. 56, no 3, 1984, p. 550-564.
12. Westling, G.; Johansson, R. S., "Factors influencing the force control during precision grip". *Experimental Brain Research*, vol. 53, no 2, 1984, p. 277-284.

13. Bishu, R. R.; Bronkema, L. A.; Garcia, D.; Klute, G.; Rajulu, S., *Tactility as a Function of Grasp Force: Effects of Glove, Orientation, Pressure, Load, and Handle*, (Report No. NASA-TP-3474). National Aeronautics and Space Administration, Washington DC. Lyndon B. Johnson Space Center, Houston, Texas., 1994, 25 p.
14. Bronkema-Orr, L.; Bishu, R. R., "The Effects of Glove Frictional Characteristics and Load on Grasp Force and Grasp Control". *Human Centered Technology - Key to the Future Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society 40th Annual Meeting, Philadelphia, Pennsylvania, September 2-6, 1996. The Human Factors and Ergonomics Society, Santa Monica, California, Volume 1* 1996, p. 702-706.
15. Kinoshita, H., "Effect of Gloves on Prehensile Forces during Lifting and Holding Tasks". *Ergonomics*, vol. 42, no 10, 1999, p. 1372-1385.
16. Shibata, M.; Howe, R. D., "Effect of Gloving on Perceptual and Manipulation Task Performance". *ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition, Nashville, Nov. 14-19, 1999. Proc ASME Dynamic Systems & Control Division*, N. Olgac, ed., DSC-Vol.67, 1999.
17. Bradley, J. V., "Glove characteristics influencing control manipulability". *Human Factors*, vol. 11, no 1, 1969, p. 21-36.
18. Mital, A.; Kuo, T.; Faard, H. F., "A quantitative evaluation of gloves used with non-powered hand tools in routine maintenance tasks". *Ergonomics*, vol. 37, no 2, 1994, p. 333-343.
19. Rock, K. M.; Mikat, R. P.; Foster, C., "The effects of gloves on grip strength and three-point pinch". *J Hand Ther.*, vol. 14, no 4, 2001, p. 286-290.
20. Shih, R. H.; Vasarhelyi, E. M.; Dubrowski, A., "The Effects of Latex Gloves on the Kinetics of Grasping". *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 28, no 5, 2001, p. 265-273.
21. Vu-Khanh Vu, T.; Dolez, P.; Harrabi, L.; Lara, J.; Larivière, C.; Tremblay, G.; Nadeau, S., *Caractérisation de la souplesse des gants de protection par des méthodes mécaniques et une méthode biomécanique basée sur l'électromyographie de surface*, Rapport de recherche IRSST, R-506, 2007, 90 p.
22. Deeb, Joseph M., "Muscular fatigue and its effects on weight perception". *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 24, 1999, p. 223-233.
23. American Society for Testing and Materials, "Standard Test Method of Static and Kinetic Coefficients of Friction of Plastic Film and Sheeting," ASTM, ASTM: D 1894-01, Philadelphia, 2001.
24. American Society for Testing and Materials, "Standard Test Method for Coefficient of Friction, Yarn to Yarn," ASTM, ASTM: D 3412-01, Philadelphia, 2001.

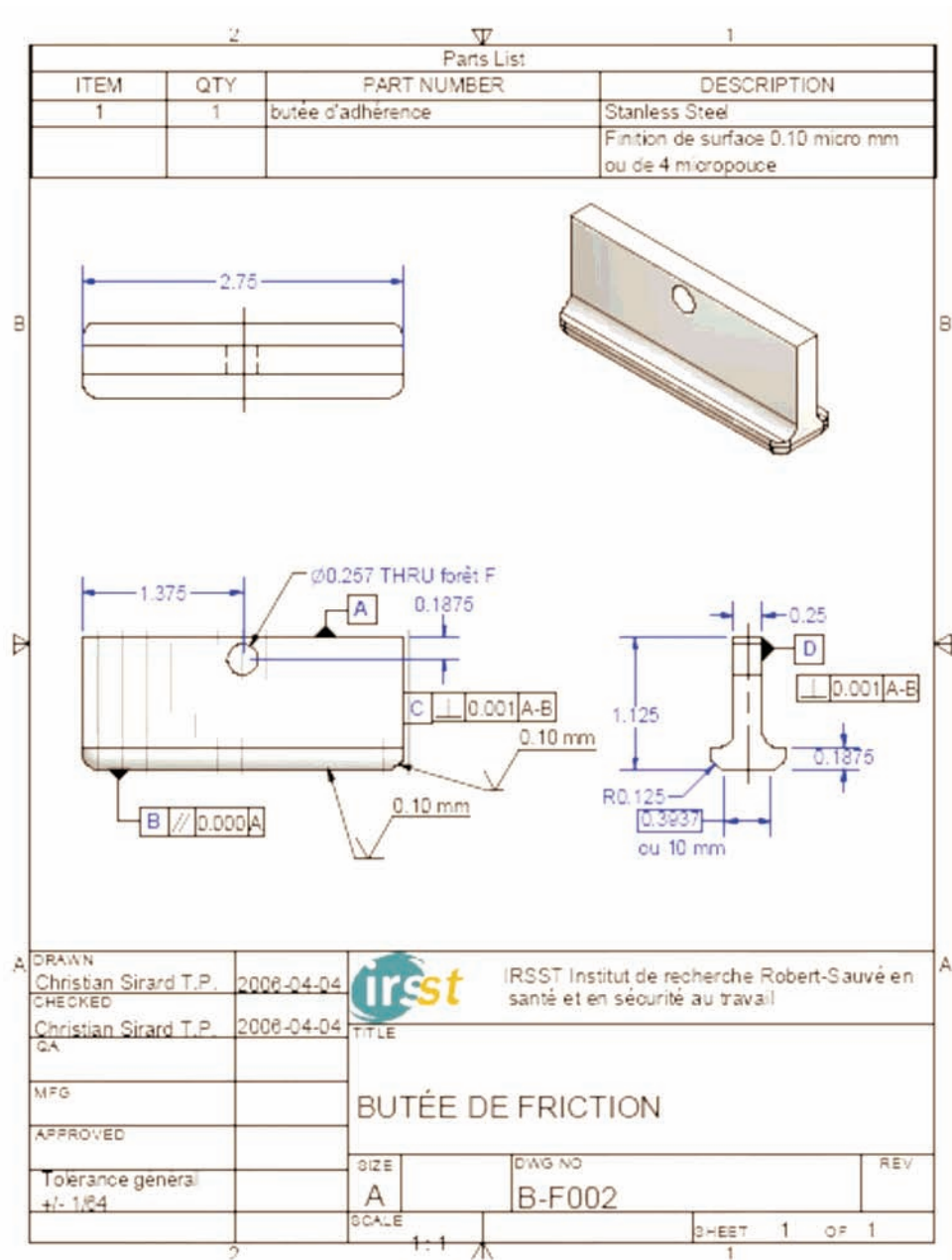
25. American Society for Testing and Materials, "Standard Test Method for Coefficient of Friction Yarn to Solid Material," ASTM, ASTM: D 3108-01, Philadelphia, 2001.
26. Tancous, J. J., "Coefficient of friction (static) for glove materials on automobile steering wheel". *American Leather Chemists Association - Journal*, vol. 50, no 6, 1955, p. 274-278.
27. Shih, Y. C.; Wang, M. J., "The influence of gloves during maximum volitional torque exertion of supination". *Ergonomics*, vol. 40, no 4, 1997, p. 465-475.
28. Larivière, C.; Plamondon, A; Tellier, C.; Lara, J.; Boutin, J., *Développement de tests biomécaniques pour l'évaluation de l'adhérence et de la souplesse des gants de protection*, Rapport de recherche IRSST, R-372, 2004, 58 p.
29. Lowe, B. D.; Freivalds, A., "Effect of carpal tunnel syndrome on grip force coordination on hand tools". *Ergonomics*, vol. 42, no 4, 1999, p. 550-564.
30. Elert, G., "Friction". *The Physics Hypertextbook* 2006.
31. Larsen-Basse, J., "Basic theory of solid friction". *ASM Handbook, Volume 18: Friction, lubrication and wear technology*, A.S.F.Metals (eds) 2002.
32. Fuller, D. D., "Friction". *Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers (8th Edition ed.)*, E. A. Avallone & T. I. Baumeister B.T. (eds), McGraw-Hill Book Company, 1958.
33. Saville, B. P., "Objective evaluation of fabric handle". *Physical Testing of Textiles: Woodhead Publishing Limited*, T. T. I. C. Press, 1999.
34. Comaish, S.; Bottoms, E., "The skin and friction: deviations from Amonton's laws, and the effects of hydration and lubrication". *British Journal of Dermatology*, vol. 84, no 1, 1971, p. 37-43.
35. Roy, "[www.roymech.co.uk/Useful Tables/Tribology/co_of_friect.htm#Factors](http://www.roymech.co.uk/Useful_Tables/Tribology/co_of_friect.htm#Factors)," *Friction factors* [online], 2006.
36. Blau, P. J., "Appendix: Static and kinetic friction coefficients for selected materials". *ASM Handbook, Volume 18: Friction, lubrication and wear technology*, A.S.F.Metals (eds) 2002.
37. Bobjer, O.; Johansson, S. E.; Piguet, S., "Friction between hand and handle. Effects of oil and lard on textured and non-textured surfaces; perception of discomfort". *Applied Ergonomics*, vol. 24, no 3, 1993, p. 190-202.
38. Kim, I.; Inooka, H., "Determination of Grasp Forces for Robot Hand Based on Human Capabilities". *Control Engineering Practice*, vol. 2, no 3, 1994, p. 415-420.

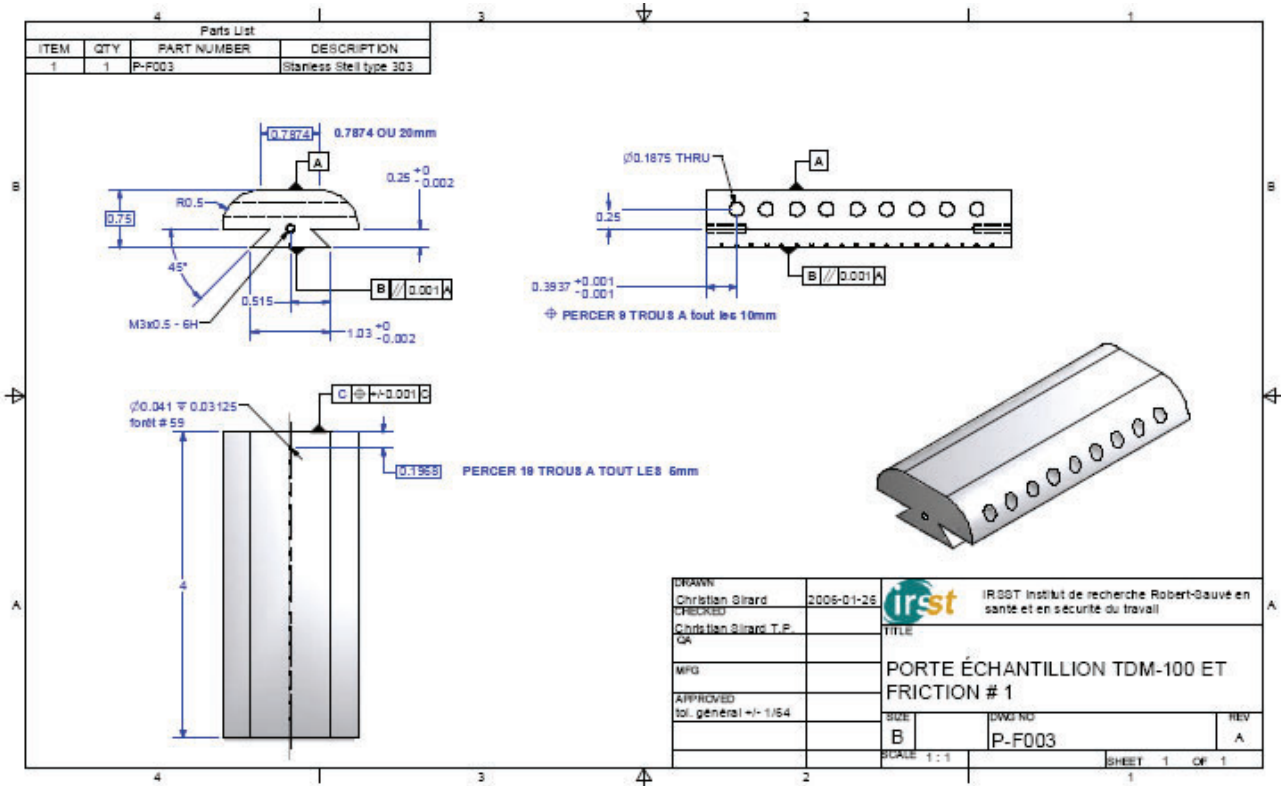
39. Kragelskii, I. V., "Friction Interaction of Solids". *Soviet Journal of Friction and Wear*, vol. 1, 1980, p. 7-10.
40. Marks, R.; Black, D., "Methodologies to produce and assess standardized trauma to the skin". *American Journal of Industrial Medicine*, vol. 8, no 4-5, 1985, p. 491-498.
41. Suh, N. P., *Tribophysics*, Prentice-Hall ed. New Jersey, 1986
42. Moore, D. F., "The friction and lubrication of elastomers". *International Series of Monographson - Materials Science and Technology*, G. V. Raynor (eds), Pergamon Press, 1972.
43. Amino, N.; Uchiyama, Y., "Relationships between the friction and viscoelastic properties of rubber". *Tire Science and Technology*, vol. 28, no 3, 2000, p. 178-195.
44. Kawabata, S., *The Standardization and Analysis of Hand Evaluation*, 2nd ed. Osaka, The Textile Machinery Society of Japon, 1980
45. Buchholz, B.; Frederick, L. J.; Armstrong, T. J., "An investigation of human palmar skin friction and the effects of materials, pinch force and moisture". *Ergonomics*, vol. 31, no 3, 1988, p. 317-325.
46. O'Meara, D. M.; Smith, R. M., "Static friction properties between human palmar skin and five grabrail materials". *Ergonomics*, vol. 44, no 11, 2001, p. 973-988.
47. O'Meara, D. M.; Smith, R. M., "Functional handgrip test to determine the coefficient of static friction at the hand/handle interface". *Ergonomics*, vol. 45, no 10, 2002, p. 717-731.
48. Sivamani, R. K.; Goodman, J.; Gitis, N. V.; Maibach, H. I., "Coefficient of friction: tribological studies in man - an overview". *Skin Res Technol*, vol. 9, no 3, 2003, p. 227-234.
49. Koudine, A. A.; Barquins, M.; Anthoine, P. H.; Aubert, L.; Lévêque, J. L., "Frictional Properties of Skin: Proposal of a New Approach". *International Journal of Cosmetic Science*, vol. 22, 2000, p. 11-20.
50. Wolfram, L. J., "Frictional Properties of Skin". *Cutaneous Investigation in Health and Disease*, J. L. Lévêque (eds). New York, Marcel Dekker, 1986, p. 49-57.
51. Highley, K. R.; Coomey, M.; DenBeste, M.; Wolfram, L. J., "Frictional properties of skin". *J Invest Dermatol*, vol. 69, no 3, 1977, p. 303-305.
52. Roberts, A. D.; Thomas, A. G., "Static Friction of Smooth Clean Vulcanized Rubber.". *Rubber Chemistry and Technology*, vol. 50, no 2, 1977, p. 266-271.

53. Roberts, A. D.; Brackley, C. A., "Surface Treatments to Reduce Friction: Rubber Glove Applications". *Abstracts of Papers. American Chemical Society*, vol. Las Vegas, Nevada, 1990.
54. Roberts, A. D., "Surface Treatments of Rubbers to Reduce Adhesion and Friction for Surgical Glove Applications". *Journal of Applied Polymer Science: Applied Polymer Symposium*, vol. 50, 1992, p. 321-330.
55. Roberts, A. D.; Brackley, C. A., "Friction of Surgeons' Gloves". *Journal of physics D: Applied Physics*, vol. 25, 1992, p. A28-A32.
56. Roberts, A. D.; Brackley, C. A., "Comfort and frictional properties of dental gloves". *J Dent*, vol. 24, no 5, 1996, p. 339-343.
57. Lara, J.; Turcot, D.; Daigle, R.; Boutin, J., *La résistance des gants de protection à la coupure - Développement d'une méthode d'essai*, Rapport de recherche IRSST, R-103, 1995, 28 p.
58. International Standard Organization, "Protective clothing - Mechanical properties - Determination of resistance to cutting by sharp objects," ISO: 13997, 1999.
59. American Society for Testing and Materials, "Standard Test Method for Measuring Cut Resistance of Materials Used in Protective Clothing," ASTM, ASTM: F 1790-05, Philadelphia, 2005.
60. Bong, D., "www.visionengineer.com/ref/friction.php," *Friction Force* [online], 2007.
61. Persson, B. N. J.; Albohr, O.; Mancosu, F.; Peveri, V.; Samoilov, V. N.; Sivebaek, I. M., "On the nature of the static friction, kinetic friction and creep". *Wear*, vol. 254, no 9, 2003, p. 835-851.
62. Savkoor, A. R., "Friction of rubber". *Rubber Chemistry and Technology*, vol. 39, no 2, 1966, p. 306-319.
63. Schallamach, A., "How does rubber slide". *Wear*, vol. 17, no 4, 1971, p. 301-312.
64. James, D. I., "Surface damage caused by polyvinyl chloride sliding on steel". *Wear-Usure-Verschleis*, vol. 2, no 3, 1959, p. 183-194.
65. James, D. I., "Measurement of friction between rubber-like polymers and steel". *Journal of Scientific Instruments*, vol. 38, no 7, 1961, p. 294-299.
66. Furuta, I.; Kimura, S. I.; Iwama, M., "Physical Constants of rubbery polymers". *Polymer Handbook*, J. Brandrup; E. H. Immergut; E. A. Grulke; A. Akihiro; D. R. Blocj (eds), John Wiley & Sons, 2005.
67. Schallamach, A., "Gummireibung (Friction of Rubber Vulcanizates)". *Gummi, Asbest, Kunststoffe*, vol. 28, no 3, 1975, p. 9.

68. Volynskii, A. L.; Grokhovskaya, T. Y.; Sanchez, A.; Lukovkin, G. M.; Bakeyev, N. F., "Mechanism of the migration of a low molecular weight component in the system natural rubber vulcanizate-low molecular weight hydrocarbon". *Polymer Science USSR (English Translation of Vysokomolekulyarnye Soyedineniya Series A)*, vol. 30, no 10, 1988, p. 2220-2227.

ANNEXE A : DESSINS TECHNIQUES DE LA BUTÉE ET DU PORTE-ÉCHANTILLON





ANNEXE B : INSTRUCTIONS D'UTILISATION DU TDM-100 MODIFIÉ POUR L'ADHÉRENCE

- Appuyer sur **ON** pour mettre le TDM et le boîtier de signal (en dessous de l'écran) sous tension.
- Lancer le logiciel de mesure de la coupure et configurer le système en entrant les paramètres appropriés apparaissant sur l'écran de l'ordinateur connecté au TDM.
- Bien nettoyer la butée avec de l'isopropanol en utilisant du papier kim wipes (une première fois mouillé avec de l'isopropanol et une deuxième fois à sec)
- Laisser sécher pendant environ 2 minutes.
- Bien centrer la butée avant le début de chaque test (elle doit être toujours à la même position avant le début du test), en utilisant l'afficheur du déplacement fixé au dessus du TDM.
- Fixer l'échantillon à tester sur le porte-échantillon.
- Mesurer le poids du porte-échantillon et de l'échantillon (environ 262 g). Ce poids servira à équilibrer le bras de levier du TDM (P_{eq})
- Mettre sur le plateau du TDM le poids correspondant à la force normale qu'on veut appliquer pour la friction (P_{Fn}) en plus du poids correspondant à l'équilibre du balancier. Sachant que la force appliquée sur le porte-échantillon correspond au double de la force appliquée sur le plateau du TDM, le poids total à mettre sur le plateau est le suivant : $P_{plateau} = (P_{Fn} + P_{eq})/2$. Par exemple, pour une force normale à appliquer de 5 N, $P_{plateau} = (510 \text{ g} + 262 \text{ g})/2 = 386 \text{ g}$.
- Mettre la butée de friction et l'échantillon en contact. Un délai de 20 secondes doit être maintenu entre la mise en contact et le début du test.
- Régler manuellement le signal, il faut qu'il soit à zéro avant le début de chaque test.
- Appuyer sur le bouton **Fichier** et choisir le répertoire d'enregistrement ou en créer un nouveau le cas échéant.
- Appuyer sur le bouton **RAZ** pour la remise à zéro.
- Appuyer sur le bouton **Départ** pour le démarrage du test.
- Appuyer sur la touche espace du clavier pour arrêter le test au moment désiré.
- Appuyer sur le bouton **+** pour le test suivant et en respectant les mêmes conditions et en suivant les mêmes étapes à chaque fois.
- Une nouvelle surface est toujours testée en déplaçant le porte échantillon de trois pas.

ANNEXE C : CARACTÉRISTIQUES DES 27 MODÈLES DE GANTS

Tableau - C.1 Caractéristiques des 27 modèles de gants testés

Compagnie	Modèle	Matériaux
Ansell	Canners & Handlers # 392	Caoutchouc naturel
Ansell	Hyflex 11-900	Mousse de nitrile sur tricot de coton
Ansell	Hycron 27-607	Nitrile sur tricot de coton
Ansell	Golden Grab It 16-300	Caoutchouc naturel et cuir sur tricot de coton
Ansell	Scorpio 8-352	Néoprène sur tricot de coton
Ansell	Grab It Safe 28-362	Caoutchouc latex naturel sur tricot de coton/kevlar
Ansell	Seams-Rite 20-115	PVC et doublure de coton
Ansell	PowerFlex 80-100	Caoutchouc naturel sur tricot de coton
Ansell	Snorkel 4-412	PVC/ nitrile sur tricot de jersey
Ansell	Hyd Tuf 52-547	Doublure en jersey, dos en coton, enduit en nitrile
Ansell	Grab It 6-620	Caoutchouc naturel sur doublure en jersey et coton
Ansell	The Duke 70-982	Tricot Safeknit CX et renforts en cuir
Ansell	Crusader 42-325	Nitrile sur isolant feutre non-tissé
Ansell	GoldKnit Kevlar 70-225	Tricot en kevlar
Ansell	Neox 9-022	Néoprène sur tricot en coton
Ansell	Winter Monkey Grip 23-193	PVC et doublure de jersey
Best	Nitri-Solve® 747	Nitrile
Best	Nitri-Pro® 7000P	Nitrile sur tricot de coton
Best	Original Nitri-Flex® 4000P	Nitrile sur tricot de coton
Best	Natural Rubber Latex HD® 55	Caoutchouc naturel
Best	Ultraflex Nitrile® 22-R	Nitrile sur tricot de coton
Best	Neo Hyde® 361	PVC sur tricot de coton
Best	Cannonball® 803-812	PVC et doublure en jersey
Best	KPG® 960	PVC sur tricot de coton
Best	Skinny Dip Aramid® 4811	Caoutchouc naturel sur tricot kevlar aramid
Best	Neo Grab® 6780-R	Néoprène sur doublure isolante
Best	Insulated Snowman 2950	Nitrile sur doublure molletonnée

ANNEXE D : FORMULAIRE DE CONSENTEMENT



ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
ET
**INSTITUT DE RECHERCHE ROBERT-SAUVÉ EN SANTÉ ET EN
SÉCURITÉ DU TRAVAIL**

FORMULAIRE D'INFORMATION ET DE CONSENTEMENT

Caractérisation de l'adhérence des gants de protection, mise au point d'une méthode dynamométrique de détermination des coefficients de friction tenant compte des interactions main-gant. Étude exploratoire.

COCHERCHEURS : Toan Vu-Khanh (Demandeur principal)

Professeur titulaire
Département de Génie mécanique
École de technologie supérieure (ÉTS)
(514) 396-8644

Jaime Lara
Chercheur
Équipe Sécurité-Ingénierie
IRSST
(514) 288-1551 poste 305

Yvan Petit (Responsable)
Professeur adjoint
Département de Génie mécanique
École de technologie supérieure (ÉTS)
(514) 396-8691

Jérôme Boutin
Professionnel scientifique
Équipe Sécurité-Ingénierie
IRSST
(514) 288-1551 poste 332

Chantal Gauvin
Professionnelle scientifique
Équipe Sécurité-Ingénierie
IRSST
(514) 288-1551 poste 357

ORGANISME SUBVENTIONNAIRE:

- Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST)



INFORMATION

Nature et objectif de l'étude

Nous vous invitons à participer à un projet de recherche sur le développement d'un montage expérimental servant à caractériser l'adhérence des gants de protection en tenant compte des interactions main-gant. Avant d'accepter de participer à ce projet, veuillez prendre le temps de lire et de comprendre les renseignements qui suivent. Nous vous invitons à poser toutes les questions que vous jugez utiles au chercheur ou à ses adjoints et à leur demander de vous expliquer les éléments qui ne sont pas clairs. Votre signature sera recueillie lors de la deuxième rencontre où l'expérimentation aura lieu.

L'étude se déroule à l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail.

Déroulement de l'étude et méthodes utilisées

Déroulement

L'étude à laquelle vous êtes sur le point de prendre part requiert environ 2 ½ heures afin de compléter toutes les étapes.

Tout d'abord, vous aurez une période d'adaptation aux différents gants. Vous devrez essayer les trois modèles et tâter une plaque de métal, similaire à celles qui seront utilisées lors de l'expérimentation. À la suite de cette période, vous devrez remplir la section pré-expérimentation du questionnaire qui devrait vous prendre environ 2 minutes par gant.

Par la suite, on mesurera la surface de contact de votre main avec le dynamomètre. Pour ce faire, vous devrez maintenir le dynamomètre avec la prise la plus confortable possible, idéalement le même positionnement des doigts et la même force de pincement que lors des essais. Cette mesure sera faite à main nue et sera répétée une seconde fois à la toute fin de l'expérimentation. Cette étape devrait prendre environ 2 minutes.

Ensuite, l'équipe de recherche vous expliquera le fonctionnement du montage expérimental. On vous demandera d'appliquer une force de pincement spécifique avec les doigts sur deux plaques de métal fixées à un dynamomètre. Le dynamomètre servira à mesurer cette force de pincement que vous appliquerez, laquelle vous sera renvoyée en feedback sur un écran d'ordinateur. De cette façon, vous serez en mesure d'atteindre une force de pincement cible, que nous vous demanderons de garder quelques secondes, le temps que l'unité de traction se mette en mouvement pour provoquer le glissement du dynamomètre. Entre



chaque essai, vous aurez deux minutes pour vous laver les mains à l'eau et au savon et vous reposer.

Pour exécuter les essais, vous prendrez place debout devant le montage sur une plate-forme qui sera ajustée en hauteur afin que l'angle entre votre avant-bras et votre bras soit d'environ 90°. Vous déposerez votre avant-bras sur le support et tiendrez le dynamomètre avec votre main droite. Un système ajustable servira à stabiliser votre avant-bras et votre main pendant le déplacement vertical du dynamomètre.

Une fois installé, il sera possible de débiter le test. Le test consiste en sept essais différents, que vous exécuterez dans un ordre aléatoire. Vous répèterez ces sept essais à trois reprises. Trois essais consistent à enfiler les trois modèles de gants et à maintenir les plaques de métal du dynamomètre, trois autres essais consistent à maintenir à main nue les plaques recouvertes du matériau de l'intérieur des gants et un dernier essai consiste à maintenir à main nue les plaques de métal. Vous ferez donc au total 21 essais. Durant la dernière répétition des sept essais, vous devrez remplir la partie per-expérimentation du questionnaire après chaque essai. Cette partie du questionnaire prend environ 2 minutes à répondre par essai.

À la fin de la séance, vous devrez répondre à la partie post-expérimentation du questionnaire qui porte sur l'expérimentation en général. Cette partie devrait vous prendre environ 5 minutes à répondre.

Si vous acceptez de participer à l'étude, vous donnez droit au chercheur d'utiliser toutes ces données (mesures dynamométriques et réponses aux questionnaires).

Méthodologie

Lors des essais avec le montage, deux données importantes seront recueillies, soit la force de préhension et la force de traction. Ces deux données permettent de déterminer par des équations physiques les coefficients de friction statique et dynamique. Selon l'hypothèse de départ, ces coefficients de friction qui sont directement reliés à l'adhérence des gants représentent les paramètres critiques de la caractérisation.

Ensuite, les réponses aux questionnaires de perception seront compilées. Leur analyse offrira de l'information supplémentaire sur l'appréciation subjective de l'adhérence des gants ainsi que sur l'expérimentation.



Risques, effets secondaires et désagréments

Étant donné que vous devez tenir les plaques en serre entre vos doigts, il est possible qu'une certaine fatigue musculaire s'installe. Advenant l'apparition d'une telle fatigue, vous pourrez arrêter l'essai et, si nécessaire, prolonger la période de repos qui est prévue entre chaque essai. Un certain stress pourrait possiblement être occasionné par le fait de participer à une recherche. Les personnes responsables des essais expérimentaux pourront vous rassurer. Veuillez noter que vous pourrez vous retirer de l'étude en tout temps sans préjudice et sans avoir à justifier votre décision. Finalement, il y a une possibilité de léger inconfort momentané dû au système de stabilisation de l'avant-bras.

Bénéfices et avantages

Vous ne retirerez aucun bénéfice personnel de votre participation à cette étude. Cependant, les résultats obtenus contribueront à l'avancement des connaissances dans ce domaine de la santé et de la sécurité au travail. Il est possible que les résultats de ce projet fassent l'objet d'une commercialisation, comme par exemple un appareil de caractérisation de l'adhérence des gants de protection. Cependant, le cas échéant, aucune retombée financière ne reviendra aux participants de l'étude.

Versement d'une compensation financière

Aucune compensation financière ne vous sera versée pour votre participation à cette étude.

Confidentialité

Les informations se rapportant à cette étude seront traitées confidentiellement. La liste des noms sera conservée à part dans un fichier informatique minimalement diffusé (i.e. ne sera consulté que par les membres actifs de l'équipe de recherche, c'est-à-dire les cochercheurs). Les questionnaires seront conservés sous clé dans le classeur de Mme Gauvin à l'IRSST et seules les personnes désignées (cochercheurs) auront accès à ces données. Les résultats de cette étude seront présentés à des conférences et publiés dans des revues; toutefois, en aucun cas, votre identité ne sera dévoilée. Toutes les données seront conservées pendant 10 ans suivant le dépôt du rapport des cochercheurs et pourront éventuellement être utilisées dans le cadre d'autres projets de même



nature. De tels travaux auront cependant préalablement été approuvés par un comité d'éthique à la recherche. La confidentialité sera toujours respectée.

À des fins de contrôle du projet de recherche, votre dossier pourra être consulté par une personne mandatée par le comité d'éthique de recherche de l'ÉTS, toujours conformément à une politique de stricte confidentialité.

Indemnisation en cas de préjudices

Si vous deviez subir quelque préjudice suite à toute procédure liée à l'étude, vous recevrez tous les soins médicaux nécessaires, sans frais de votre part. Toutefois, ceci ne vous empêche nullement d'exercer un recours légal en cas de faute reprochée à toute personne impliquée dans l'étude.

En participant à cette étude, vous ne renoncez à aucun de vos droits ni ne libérez les chercheurs ou les établissements impliqués de leurs responsabilités légales ou professionnelles.

Participation volontaire et retrait de l'étude

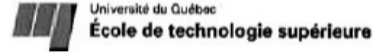
Votre participation à cette étude est volontaire. Vous êtes donc libre de refuser d'y participer. Vous pouvez également vous retirer de l'étude à n'importe quel moment, sans avoir à donner de raisons concernant votre décision. Toute nouvelle connaissance acquise durant le déroulement de l'étude qui pourrait affecter votre décision de continuer d'y participer vous sera communiquée sans délai. Si vous décidez de vous retirer de l'étude, les données vous concernant seront détruites.

Votre décision de ne pas participer à l'étude ou de vous en retirer n'aura aucune conséquence sur vos relations de travail avec vos collègues de l'IRSST ou de l'ÉTS.

Personnes à contacter

Si vous avez des questions à poser au sujet de cette étude, s'il survient un incident quelconque, ou si vous désirez vous retirer de l'étude, vous pouvez contacter en tout temps Monsieur Yvan Petit, chercheur responsable de cette étude, au (514)396-8691.

Si vous avez des questions à poser concernant vos droits en tant que sujet de recherche, ou si vous avez des plaintes ou commentaires à formuler, vous pouvez aussi communiquer avec le Président du Comité d'éthique de l'École de Technologie Supérieure au (514) 396-8829.



CONSENTEMENT

Caractérisation de l'adhérence des gants de protection, mise au point d'une méthode dynamométrique de détermination des coefficients de friction tenant compte des interactions main-gant. Étude exploratoire.

La nature de l'étude, les procédés à utiliser, les risques et bénéfices que comporte ma participation à cette étude ainsi que le caractère confidentiel des informations qui seront recueillies au cours de l'étude m'ont été expliqués.

J'ai eu l'occasion de poser toutes les questions concernant les différents aspects de l'étude et on y a répondu à ma satisfaction.

Je reconnais qu'on m'a laissé le temps voulu pour prendre ma décision.

J'accepte volontairement de participer à cette étude. Je demeure libre de m'en retirer en tout temps sans que cela nuise aux relations avec les intervenants et sans préjudices d'aucune sorte.

Je recevrai une copie signée de ce formulaire d'information et de consentement.

J'accepte que les données obtenues lors de cette étude soient réutilisées dans le cadre d'une étude ultérieure de même nature, conditionnelle à l'approbation du comité d'éthique à la recherche de l'ÉTS ou tout autre comité d'éthique à la recherche compétent.

- OUI _____ (initiales)
- NON _____ (initiales)

Nom du sujet (en lettres moulées) : _____

Signature: _____

Date : _____

Nom du responsable: (en lettres moulées): _____

Signature: _____

Date : _____

Nom de la personne qui obtient le consentement : (en lettres moulées): _____

Signature: _____

Date : _____

ANNEXE E : QUESTIONNAIRE DU TEST DE PERCEPTION

Questionnaire sur l'adhérence des gants de protection Pré/post expérimentation

Numéro d'identification du sujet: Âge: Sexe: M F Droitier
Gaucher

Veillez répondre à toutes les questions en cochant la case qui s'applique le mieux à votre situation. Si vous devez changer une réponse, rayez votre réponse originale puis marquez la bonne case. Apposez vos initiales à côté des changements que vous faites. En cas de doute au sujet d'une réponse, répondez au meilleur de vos connaissances. Ne marquez qu'une seule réponse par question.

Le questionnaire suivant fonctionne sous forme d'échelle, 1 étant toujours « peu » et 4, « très ». Vous devez indiquer votre appréciation de 1 et 4 sur ces gants à chacune de ces questions.

Pré expérimentation

	Gant #1	Gant #2	Gant #3	Main nue
CONFORT	Peu confortable	Très confortable		
1- En général, comment qualifiez-vous le confort de ce gant :	① ② ③ ④	① ② ③ ④	① ② ③ ④	
<i>Dans cette section, commentez le confort procuré par ces différents points :</i>				
2- La respirabilité (le niveau d'humidité à l'intérieur du gant)	Mauvais ① ② ③ ④	Très bon ① ② ③ ④	① ② ③ ④	① ② ③ ④
3- L'ajustement pour vos doigts et votre main	① ② ③ ④	① ② ③ ④	① ② ③ ④	
4- La souplesse	① ② ③ ④	① ② ③ ④	① ② ③ ④	
ADHÉRENCE	Peu adhérent	Très adhérent		
5- En général, comment qualifiez-vous l'adhérence de ce gant :	① ② ③ ④	① ② ③ ④	① ② ③ ④	① ② ③ ④
<i>Dans cette section, commentez le niveau d'adhérence offert par ces différentes interfaces :</i>				
6- L'interface entre la main et le gant.	① ② ③ ④	① ② ③ ④	① ② ③ ④	
7- L'interface entre le gant et l'objet.	① ② ③ ④	① ② ③ ④	① ② ③ ④	

Post expérimentation

FATIGUE MUSCULAIRE	Peu fatigant		Très fatigant
En général, comment qualifiez-vous votre fatigue musculaire?	①	②	③ ④
<i>Dans cette section, commentez le niveau de fatigue ressentie à ces différents endroits :</i>			
6- Dans les articulations de votre main	①	②	③ ④
7a- Dans les muscles de votre avant-bras (entre la main et le coude)	①	②	③ ④
7b- Dans les muscles de votre épaule	①	②	③ ④
L'EXPÉRIMENTATION	Très difficile		Très facile
En général, comment qualifiez-vous l'expérimentation?	①	②	③ ④
<i>Dans cette section, commentez l'effort demandé par l'expérimentation pour :</i>			
8- Maintenir la force constante	①	②	③ ④
9- Maintenir la position des doigts pendant le déplacement	①	②	③ ④
10- Reprendre la même prise pour chaque essai	①	②	③ ④
11- Maintenir la posture	①	②	③ ④

Questionnaire sur l'adhérence des gants de protection Per expérimentation

Numéro d'identification du sujet:

Veuillez répondre aux questions suivantes en inscrivant dans le tableau prévu à cet effet, le chiffre correspondant à votre choix. Chaque ligne représente une question et chaque colonne, une condition de test différente. Si vous devez changer une réponse, rayez votre réponse originale puis marquez votre nouvelle réponse. Apposez vos initiales à côté des changements que vous faites. En cas de doute au sujet d'une réponse, répondez au meilleur de vos connaissances. Ne marquez qu'une seule réponse par question.

Le questionnaire suivant fonctionne sous forme d'échelle, 1 étant toujours « peu » et 4, « très ». Vous devez indiquer votre appréciation de 1 et 4 sur ces gants à chacune de ces questions.

CONFORT	Peu confortable	②	③	Très confortable
1- En général, comment qualifiez-vous le confort de ce gant :	①	②	③	④
<i>Dans cette section, commentez votre appréciation du gant au niveau de :</i>				
2- La respirabilité (le niveau d'humidité à l'intérieur du gant)	①	②	③	④
3- L'ajustement pour vos doigts et votre main	①	②	③	④
ADHÉRENCE	Peu adhérent			Très adhérent
4- En général, comment qualifiez-vous l'adhérence de ce gant :	①	②	③	④
<i>Dans cette section, commentez le niveau d'adhérence offert par ces différentes interfaces :</i>				
5- L'interface entre la main et le gant.	①	②	③	④
6- L'interface entre le gant et l'objet.	①	②	③	④
FATIGUE MUSCULAIRE	Peu fatiguant			Très fatiguant
7- En général, comment qualifiez-vous votre fatigue musculaire?	①	②	③	④

	Main nue / métal	Gants / métal			Main nue / intérieur des gants		
		Gant #1	Gant #2	Gant #3	int. Gant #1	int. Gant #2	int. Gant #3
1 Confort général		<input style="width: 30px; height: 20px;" type="text"/>	<input style="width: 30px; height: 20px;" type="text"/>	<input style="width: 30px; height: 20px;" type="text"/>			
2 Respirabilité		<input style="width: 30px; height: 20px;" type="text"/>	<input style="width: 30px; height: 20px;" type="text"/>	<input style="width: 30px; height: 20px;" type="text"/>			
3 Ajustement		<input style="width: 30px; height: 20px;" type="text"/>	<input style="width: 30px; height: 20px;" type="text"/>	<input style="width: 30px; height: 20px;" type="text"/>			
4 Adhérence générale	<input style="width: 30px; height: 20px;" type="text"/>	<input style="width: 30px; height: 20px;" type="text"/>	<input style="width: 30px; height: 20px;" type="text"/>	<input style="width: 30px; height: 20px;" type="text"/>			
5 Interface main-gant		<input style="width: 30px; height: 20px;" type="text"/>	<input style="width: 30px; height: 20px;" type="text"/>	<input style="width: 30px; height: 20px;" type="text"/>	<input style="width: 30px; height: 20px;" type="text"/>	<input style="width: 30px; height: 20px;" type="text"/>	<input style="width: 30px; height: 20px;" type="text"/>
6 Interface gant-objet		<input style="width: 30px; height: 20px;" type="text"/>	<input style="width: 30px; height: 20px;" type="text"/>	<input style="width: 30px; height: 20px;" type="text"/>			
7 Fatigue générale	<input style="width: 30px; height: 20px;" type="text"/>	<input style="width: 30px; height: 20px;" type="text"/>	<input style="width: 30px; height: 20px;" type="text"/>	<input style="width: 30px; height: 20px;" type="text"/>	<input style="width: 30px; height: 20px;" type="text"/>	<input style="width: 30px; height: 20px;" type="text"/>	<input style="width: 30px; height: 20px;" type="text"/>

COMMENTAIRES

Inscrivez tous vos commentaires par rapport aux gants ou au test. Par exemple, vous pouvez vous exprimer sur le confort général procuré par les gants lors des tests ou vous pouvez comparer les gants entres eux.

ANNEXE F : TABLEAUX DE RESULTATS DES TESTS MECANIQUES

Tableau - F.1 Forme des courbes force-déplacement pour les 27 modèles de gants et les trois séries de mesure (s-d avec pic statique, d sans pic statique)

Modèle	série 1	série 2	série 3
Ansell 392	d	d	d
Ansell 11-900	s-d	s-d	s-d
Ansell 27-607	s-d	s-d	s-d
Ansell 16-300	d	d	d
Ansell 8-352	s-d	s-d	d
Ansell 28-362	d	d	d
Ansell 20-115	d	d	d
Ansell 80-100	d	d	d
Ansell 4-412	d	d	d
Ansell 52-547	s-d	s-d	s-d
Ansell 6-620	d	d	d
Ansell 70-982	s-d	d	s-d
Ansell 42-325	d	d	d
Ansell 70-225	d	d	d
Ansell 9-022	s-d	s-d	s-d
Ansell 23-193	s-d	s-d	s-d
Best 747	d	d	d
Best 7000P	s-d	s-d	s-d
Best 4000P	s-d	s-d	s-d
Best 55	d	d	d
Best 22-R	s-d	d	d
Best 361	d	d	d
Best 803-812	s-d	s-d	s-d
Best 960	d	d	d
Best 4811	d	d	d
Best 6780-R	d	d	d
Best 2950	s-d	s-d	s-d

Tableau - F.2 Coefficients de friction statique et dynamique pour les trois séries de mesure de chaque modèle de gant (valeurs moyennes et CV en pourcentage)

Modèle	Coefficient de friction statique*				Coefficient de friction dynamique			
	série 1	série 2	série 3	TOTAL	série 1	série 2	série 3	TOTAL
Ansell 392					0,9 (13)	0,5 (11)	0,4 (9)	0,7 (37)
Ansell 42-325					0,7 (18)	0,4 (18)	0,5 (38)	0,6 (29)
Ansell 70-225					0,2 (6)	0,2 (10)	0,2 (15)	0,2 (11)
Ansell 27-607	5,7 (10)	6,5 (4)	5,6 (11)	6,0 (10)	4,2 (10)	4,7 (6)	4,0 (15)	4,3 (12)
Ansell 52-547	2,5 (8)	2,8 (14)	3,1 (6)	2,8 (13)	2,5 (7)	2,4 (15)	2,8 (10)	2,6 (12)
Ansell 11-900	5,6 (26)	5,2 (17)	5,4 (14)	5,3 (19)	3,3 (12)	3,2 (5)	3,2 (8)	3,2 (9)
Ansell 9-022	4,7 (11)	7,1 (6)	5,0 (6)	5,6 (21)	3,1 (12)	2,3 (4)	2,4 (7)	2,6 (16)
Ansell 8-352	0,5 (5)	1,6 (24)		0,9 (67)	0,4 (10)	1,5 (21)	1,4 (35)	1,1 (54)
Ansell 20-115	0,5 (1)			0,5 (1)	0,6 (23)	0,7 (9)		0,7 (17)
Ansell 4-412					1,0 (10)	0,9 (7)	0,8 (15)	0,9 (12)
Ansell 70-982	0,5 (18)			0,5 (18)	0,4 (12)	0,4 (22)	0,3 (31)	0,4 (22)
Ansell 23-193	5,2 (8)	2,9 (17)	5,2 (15)	4,6 (27)	4,4 (9)	2,8 (13)	5,0 (10)	4,1 (25)
Best 803-812	0,4 (7)	0,5 (6)	0,4 (2)	0,4 (7)	0,4 (5)	0,6 (5)	0,5 (16)	0,5 (23)
Best 2950	2,4 (6)	2,5 (3)	2,0 (3)	2,3 (10)	2,1 (2)	2,3 (4)	1,9 (3)	2,1 (8)
Best 960					0,7 (6)	0,7 (14)	0,7 (12)	0,7 (11)
Best 6780-R					1,6 (4)	1,6 (13)	1,7 (8)	1,6 (9)
Best 55					0,4 (9)	0,4 (19)	0,4 (12)	0,4 (14)
Best 361					0,9 (8)	1,1 (5)	1,0 (5)	1,0 (9)
Best 7000P	5,1 (14)	6,7 (16)	4,3 (16)	5,4 (24)	3,5 (6)	4,4 (19)	3,4 (7)	3,7 (18)
Best 747					0,8 (3)	0,6 (18)	0,5 (13)	0,6 (24)
Best 4811					1,8 (12)	2,1 (12)	1,7 (7)	1,9 (14)
Best 4000P	4,5 (11)	4,0 (7)	3,3 (30)	3,9 (21)	3,0 (5)	2,6 (9)	2,4 (16)	2,7 (13)
Best 22-R					0,2 (37)	0,4 (32)	0,3 (9)	0,3 (31)

* Les cases vides dans les colonnes relatives au coefficient de friction statique correspondent au cas de type d où aucun pic correspondant à une valeur de coefficient de friction statique plus élevée que celle du coefficient dynamique n'a été obtenu.

Tableau - F.3 Coefficients de friction statique et dynamique et matériau de surface pour chaque modèle de gant (valeurs moyennes et CV en pourcentage)

Modèle	Matériau de surface	Coef. de friction statique (CV)	Coef. de friction dynamique (CV)
Ansell 70-225	tricot kevlar		0,2 (11)
Best 22-R	nitrile		0,3 (31)
Best 55	caoutchouc naturel		0,4 (14)
Ansell 70-982	cuir	0,5 (18)	0,4 (22)
Best 803-812	PVC	0,4 (7)	0,5 (23)
Best 747	nitrile		0,6 (24)
Ansell 42-325	nitrile		0,6 (29)
Best 960	PVC		0,7 (11)
Ansell 20-115	PVC	0,5 (1)	0,7 (17)
Ansell 392	caoutchouc naturel		0,7 (37)
Ansell 4-412	PVC/nitrile		0,9 (12)
Best 361	PVC		1,0 (9)
Ansell 8-352	néoprène	0,9 (67)	1,1 (54)
Best 6780-R	néoprène		1,6 (9)
Best 4811	caoutchouc naturel		1,9 (14)
Best 2950	nitrile	2,3 (10)	2,1 (8)
Ansell 52-547	nitrile	2,8 (13)	2,6 (12)
Ansell 9-022	néoprène	5,6 (21)	2,6 (16)
Best 4000P	nitrile	3,9 (21)	2,7 (13)
Ansell 11-900	nitrile	5,3 (19)	3,2 (9)
Best 7000P	nitrile	5,4 (24)	3,7 (18)
Ansell 23-193	PVC	4,6 (27)	4,1 (25)
Ansell 27-607	nitrile	6,0 (10)	4,3 (12)

ANNEXE G : PARTICULARITES DES COURBES FORCE- DEPLACEMENT

À l'intérieur des deux types de forme des courbes force horizontale – déplacement de la butée, certaines particularités ont été observées. Ils concernent principalement la présence d'un décalage dans le déplacement préliminaire de la butée avant le glissement, de bruit et d'oscillations dans le signal enregistré et d'un coefficient de friction dynamique non constant en fonction du déplacement de la butée.

Le phénomène de décalage dans le déplacement préliminaire de la butée avant glissement se manifeste par un changement de la valeur de la pente de la variation initiale linéaire de la force horizontale en fonction du déplacement de la butée, comme illustré sur la Figure - G.1 dans le cas d'un comportement de type s-d. Il se traduit par des valeurs du déplacement de la butée au pic de la force atteignant 5 mm. Ce comportement s'observe également pour des gants caractérisés par un comportement de type d, c'est-à-dire ne présentant pas de pic indicatif du coefficient de friction statique.

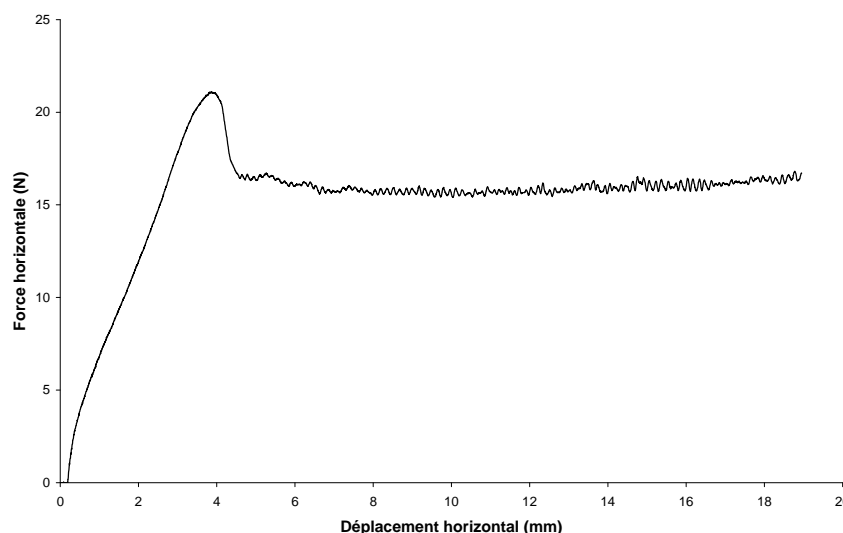


Figure - G.1 Variation de la force horizontale en fonction du déplacement de la butée avec comportement de type s-d montrant la présence d'un décalage dans le déplacement initial de la butée (gant Best 7000P)

Ce phénomène s'observe principalement pour les gants possédant une surface intérieure ouatée. Il apparaît également dans le cas d'un modèle de gant (Ansell 9-022) dont le revêtement intérieur collé mousseux a été enlevé avec plus ou moins de succès afin de ramener le bruit sur les mesures à un niveau acceptable. Pour un autre modèle de gants (Best 7000 P) dont certaines tailles possèdent une surface intérieure ouatée alors que d'autres présentent uniquement le renfort tricoté, des différences importantes de valeur du décalage du déplacement initial de la butée peuvent être observées selon que les échantillons mesurés possédaient une surface intérieure ouatée ou tricotée. En conséquence, ce décalage dans le déplacement préliminaire de la butée est

attribué à un processus de cisaillement se produisant dans l'épaisseur de l'échantillon testé, en particulier dans le revêtement intérieur ouaté ou mousseux du gant.

Afin d'évaluer l'effet de la présence de ce décalage sur les mesures concernées, une étude des corrélations entre les valeurs de la force maximale utilisée dans le calcul du coefficient de friction statique et du déplacement de la butée correspondant a été réalisée sur les quatre modèles de gant de type s-d les plus affectés, soit les modèles Ansell 9-022, Ansell 52-547, Ansell 27-607 et Best 7000P. Comme le montre la Figure - G.2 qui illustre le cas du modèle Best 7000P, la valeur de ce décalage n'a pas d'influence sur la force maximale mesurée. Les données présentant ce phénomène de décalage dans le déplacement préliminaire de la butée peuvent donc être utilisées pour le calcul des coefficients de friction.

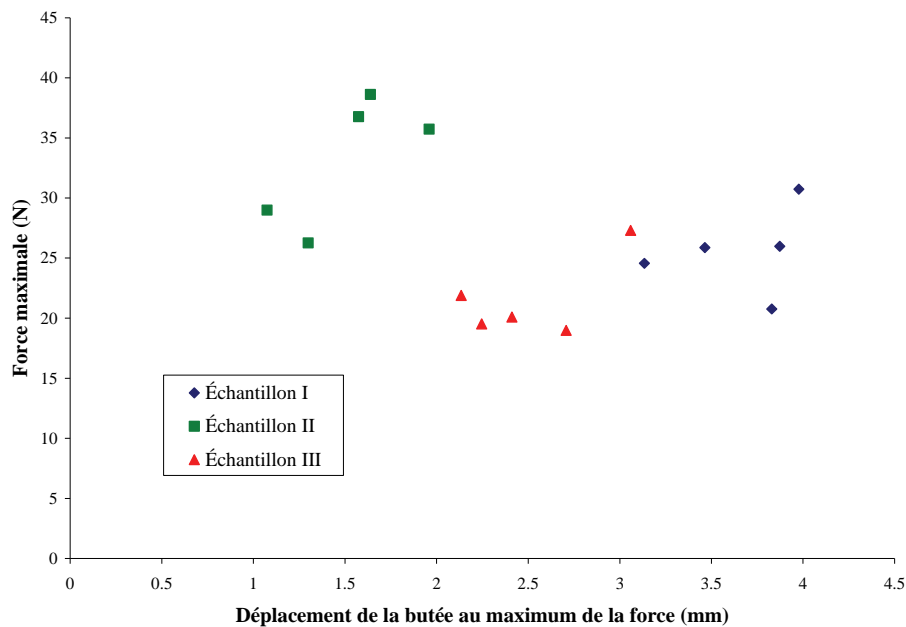


Figure - G.2 Variation de la force maximale en fonction de la valeur du déplacement de la butée correspondant pour les trois échantillons du modèle Best 7000P

Une seconde particularité observée lors des mesures concerne la présence de bruit dans le signal enregistré. De même que pour le phénomène de décalage dans le déplacement préliminaire de la butée, ce bruit est attribué à une immobilisation imparfaite de l'échantillon sur le porte-échantillon. En particulier, il a été possible de réduire son amplitude en arrachant le revêtement ouaté ou mousseux présent sur la surface intérieure de certains modèles de gants.

Dans certains cas, des oscillations périodiques de grande amplitude ont pu être observées, comme le montre la Figure - G.3. Deux causes potentielles peuvent être invoquées pour expliquer l'origine de ces oscillations. D'une part, étant donnée la nature rugueuse de la surface de certains gants, il est possible qu'elles reproduisent la morphologie du matériau testé : une étude de la corrélation entre la fréquence de ces oscillations et la périodicité du fini de surface des gants pourrait permettre d'évaluer la justesse de cette hypothèse. Par ailleurs, il a été montré

que le phénomène de friction des élastomères peut dans certains cas être associé à la production d'ondes de Schallamach [63], dont ces oscillations pourraient éventuellement être la manifestation.

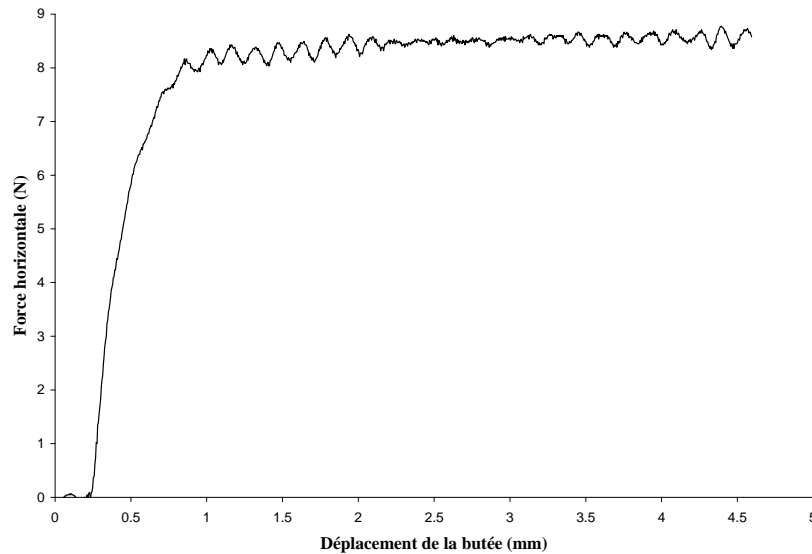


Figure - G.3 Oscillations dans la variation de la force horizontale en fonction du déplacement de la butée (Gant Best 6780-R)

Une dernière particularité observée pour certains modèles de gants concerne le plateau qu'est supposée atteindre la force horizontale lors du déplacement de la butée. En effet, pour ces modèles de gants, la force continue d'augmenter graduellement de façon linéaire sans atteindre de plateau, même après un déplacement de la butée d'une quinzaine de millimètres, comme l'illustre l'exemple de la Figure - G.4. La valeur plateau de la force horizontale permet le calcul du coefficient de friction dynamique.

Plusieurs hypothèses peuvent être invoquées pour tenter d'expliquer ce phénomène. Par exemple, des auteurs ont montré que le processus d'usure par abrasion, menant à la formation de petits rouleaux à la surface du matériau orientés perpendiculairement à la direction de déplacement de la sonde, peut modifier la valeur du coefficient de friction [64]. Dans le cas où la déformation de la surface du matériau est faible, ces rouleaux agissent comme lubrifiant, menant à une réduction du coefficient de friction, alors que pour un matériau subissant une déformation importante, les pertes par hystérésis dans les rouleaux amènent à une augmentation du coefficient de friction [65]. Une augmentation graduelle de la force horizontale en fonction du déplacement pourrait éventuellement être causée par une accumulation de ces débris sur la surface de l'échantillon.

Dans le cas de nos mesures, les gants qui ont manifesté un tel comportement sont formés de caoutchouc naturel. Or, le caoutchouc naturel est un matériau possédant une grande élasticité, avec un module d'Young situé autour de 1,3 MPa, mais un très faible caractère viscoélastique, avec une valeur de $\tan \delta$ de 0,016 [66]. L'attribution du phénomène à cette cause implique donc de vérifier si la grande élasticité du caoutchouc compense pour sa faible viscoélasticité dans la génération de pertes par hystérésis.

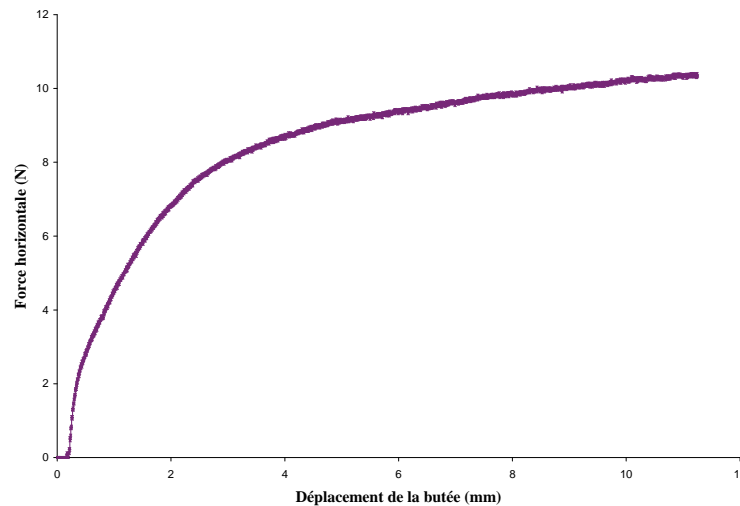


Figure - G.4 Variation de la force horizontale en fonction du déplacement de la butée montrant l'absence d'atteinte d'un plateau (Gant Ansell 16-300)

Par ailleurs, lors de la génération de forces de friction entre deux corps, un mécanisme de dissipation d'énergie prend place et peut donner lieu à une élévation de température au niveau de l'interface [42]. Dans le cas des caoutchoucs, selon les valeurs de la vitesse de glissement, une augmentation substantielle de la température à l'interface peut être produite [67]. Dans la configuration d'une surface échantillon se déplaçant sur une surface métallique qui correspond au TDM modifié, le coefficient de diffusivité de l'échantillon est important, en particulier dans le cas des vitesses de déplacement élevées. Le caoutchouc naturel offrant une faible conductivité thermique par rapport aux autres caoutchoucs étudiés [66] et la force de friction, donc le coefficient de friction dynamique, augmentant avec la température jusqu'à environ 50°C pour les caoutchoucs [42], l'attribution du phénomène d'augmentation graduelle de la force de friction avec la distance de déplacement à un phénomène de génération de chaleur est donc une hypothèse à considérer sérieusement.

Une autre explication possible est que le déplacement imposé durant ces mesures n'est pas suffisant pour que la force horizontale atteigne le plateau, par exemple en raison d'un phénomène de cisaillement dans l'épaisseur du gant.

Une dernière hypothèse est liée au phénomène de migration vers la surface des espèces de faible poids moléculaire fréquemment observé dans le cas du caoutchouc naturel [68]. La butée qui glisse sur la surface de l'échantillon caractérisée enlève progressivement la couche superficielle de ces espèces de plus faible poids moléculaire, révélant au fur et à mesure des espèces de plus grand poids moléculaire : la nature du matériau caractérisé se modifie donc au cours de la mesure jusqu'à ce que la zone de volume aie été atteinte. Dans le cas des tests effectués avec le TDM, la distance parcourue est relativement faible et ne permettrait pas d'atteindre cette profondeur de matière enlevée.

Dans le cas des gants pour lesquels la force horizontale n'atteint pas de plateau, c'est-à-dire principalement des gants en caoutchouc naturel, aucune valeur de coefficient de friction dynamique n'a pu être déterminée.