



Équipements de protection

Études et recherches

■ RAPPORT R-506



Caractérisation de la souplesse des gants de protection par des méthodes mécaniques et biomécaniques

*Toan Vu-Khanh
Patricia Dolez
Lotfi Harrabi
Jaime Lara*

*Christian Larivière
Guy Tremblay
Sylvie Nadeau*



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

2007

ISBN : 978-2-89631-147-7 (version imprimée)

ISBN : 978-2-89631-148-4 (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,

août 2007



Équipements de protection

Études et recherches

■ RAPPORT R-506

Caractérisation de la souplesse des gants de protection par des méthodes mécaniques et biomécaniques

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.

Volet mécanique :
Toan Vu-Khanh¹, Patricia Dolez¹, Lotfi Harrabi¹ et Jaime Lara²

Volet biomécanique :
Christian Larivière², Guy Tremblay¹ et Sylvie Nadeau¹

¹École de Technologie Supérieure (ÉTS)

²Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail



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

CONFORMÉMENT AUX POLITIQUES DE L'IRSST

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

SOMMAIRE

Le port de gants de protection permet de diminuer le nombre et la gravité des lésions aux mains, mais ces gants sont souvent trop épais et/ou trop rigides. L'utilisation de ces gants mal adaptés se traduit par un effort musculaire accru pour faire une même tâche, ce qui limite leur utilisation par les travailleurs. Présentement, il existe des tests normalisés permettant de quantifier la souplesse des textiles. Cependant, les tests mécaniques de ce type ne peuvent pas être utilisés pour caractériser la souplesse des gants et encore moins tenir compte de l'effet possible joué par l'interface main-gant sur la souplesse telle que ressentie par les sujets. Conséquemment, un premier test biomécanique a été développé dans une étude antérieure (projet # 099-249) et les résultats ont démontré un certain potentiel à caractériser la souplesse des gants. Toutefois, des modifications étaient requises afin de raffiner la méthode. Ces modifications étaient nécessaires afin d'évaluer la sensibilité plus fine de cet outil potentiel. Les objectifs principaux de l'étude sont donc de caractériser la souplesse d'une plus large gamme de gants de protection (n = 28 gants + 1 condition main nue) avec (1) des tests mécaniques dont le **test de la double courbure**, qui est une adaptation de la norme ASTM 4032, et le **test Kawabata** et (2) des tests avec sujets humains dont un **test de perception** et un **test biomécanique**, version améliorée. Le troisième objectif est de vérifier l'association entre ces quatre tests de manière à documenter leur validité de critère concurrente.

Les résultats obtenus par la méthode de la double courbure ont permis de répartir l'ensemble des vingt-huit gants en six catégories basées sur les valeurs de travail initial. Les classements établis à partir des mesures de la force maximale et du travail total, qui ont pu être effectuées sur dix modèles de gants, correspondent exactement. La comparaison avec le classement basé sur les mesures du travail initial pour chacun des modèles de gants montre également un bon accord, en particulier entre les deux catégories concernées. Les légères différences observées quant à l'ordre à l'intérieur des catégories peuvent être attribuées à l'influence du coefficient de friction des gants concernés. Ceci démontre le potentiel de la méthode de la double courbure, en particulier par l'analyse de la déformation initiale, pour la caractérisation de la souplesse des gants de protection.

Le test biomécanique a été réalisé chez trente sujets (quinze hommes et quinze femmes), à l'aide de deux sessions de mesures identiques. L'étude a permis de démontrer (1) que le genre influence les résultats mais pas la grandeur de la main, (2) qu'il n'est possible de différencier que les gants qui offrent une certaine différence de souplesse (sensibilité moyenne), (3) que la fidélité test-retest variait de pauvre à modérée dépendant du muscle et de la condition expérimentale et (4) qu'environ douze sujets sont nécessaires pour obtenir une mesure de souplesse relativement précise. Malgré tout, ce protocole peut encore être amélioré afin d'augmenter la discrimination entre les types de gants. Ainsi, la fatigue musculaire, le genre et la taille des gants induisent de la variation dans les mesures biomécaniques, ce qui peut nuire à la discrimination entre les types de gants. Le contrôle de ces variables favorisera des mesures plus fidèles et donc, plus discriminantes.

Des corrélations élevées ont été obtenues entre les critères mécaniques et les deux critères obtenus chez les sujets humains, ce qui suppose que le rôle joué par l'interface main-gant n'est pas très important, du moins pour le type de tâche étudiée ici (prise globale). Le test de la double

courbure démontre les meilleures corrélations avec les tests de perception et biomécanique, comparativement à la méthode Kawabata. Ces corrélations sont si élevées ($r > 0,88$) qu'il est possible de conclure que le test biomécanique n'est pas nécessaire pour bien caractériser la souplesse des gants. Quelques facteurs peuvent expliquer le fait que la méthode de la double courbure caractérise la souplesse des gants de protection de manière plus proche de ce qui est mesuré avec les sujets humains par rapport à la méthode Kawabata. D'une part, elle soumet les gants à des déformations multidirectionnelles, qui simulent de manière plus réaliste les conditions d'utilisation réelles des gants, alors que la technique Kawabata applique des flexions uniaxiales. D'autre part, elle teste les gants dans leur intégralité, c'est-à-dire que les mesures de souplesse sont faites sur les deux épaisseurs paume et dos en même temps.

En résumé, cette étude est la première à valider des tests mécaniques de souplesse de gants de protection avec des critères obtenus chez des sujets humains. Ils démontrent qu'il est possible de prédire les effets qu'a un gant rigide sur la fonction musculaire à partir d'un nouveau test mécanique, le test de la double courbure, réalisé sur des échantillons de gants. Le test de la double courbure, en plus d'apporter essentiellement la même information que les tests avec sujets humains, est beaucoup plus simple, requiert moins de ressources (moins coûteux) car moins sujet aux variations dans les mesures, et est plus sensible aux différences fines en terme de souplesse.

TABLE DES MATIÈRES

1.	INTRODUCTION.....	1
1.1	L'IMPORTANCE DU SUJET.....	1
1.2	ORIGINE DE LA PROBLÉMATIQUE DE SANTÉ ET SÉCURITÉ DU TRAVAIL.....	1
1.3	ORIGINALITÉ SCIENTIFIQUE OU TECHNIQUE DE L'OBJET D'ÉTUDE.....	2
1.4	BUT DE L'ACTIVITÉ ET OBJECTIFS SPÉCIFIQUES.....	4
2.	MÉTHODOLOGIE.....	5
2.1	MATÉRIAUX.....	5
2.2	TESTS MÉCANIQUES.....	5
2.2.1	<i>Mesure de la résistance aux agresseurs mécaniques.....</i>	<i>5</i>
2.2.1.1	Résistance à la coupure.....	5
2.2.1.2	Résistance à la perforation.....	6
2.2.2	<i>Mesures de la souplesse en laboratoire.....</i>	<i>7</i>
2.2.2.1	Méthode Kawabata.....	8
2.2.2.1.1	Principe de la mesure.....	8
2.2.2.1.2	Conditions opératoires.....	10
2.2.2.2	Méthode de la double courbure.....	10
2.2.2.2.1	Principe de la mesure.....	12
2.2.2.2.2	Conditions opératoires.....	15
2.3	TESTS DE PERCEPTION ET BIOMÉCANIQUE AVEC SUJETS HUMAINS.....	15
2.3.1	<i>Sujets.....</i>	<i>15</i>
2.3.2	<i>Test de perception.....</i>	<i>16</i>
2.3.3	<i>Test biomécanique.....</i>	<i>17</i>
2.3.3.1	Tâches.....	17
2.3.3.1.1	Contractions maximales volontaires.....	17
2.3.3.1.2	Contractions en pallier.....	18
2.3.3.2	Techniques de mesures.....	18
2.3.3.2.1	Dynamométrie.....	18
2.3.3.2.2	Électromyographie.....	19
2.3.3.2.3	Mesures de la posture du membre supérieur.....	19
2.3.3.3	Procédures.....	20
2.3.3.4	Traitement des signaux EMG.....	20
2.3.4	<i>Analyses statistiques.....</i>	<i>21</i>
2.3.4.1	Influence des variables confondantes associées aux procédures expérimentales.....	21
2.3.4.2	Influence des variables confondantes associées aux sujets.....	21
2.3.4.3	Sensibilité à la souplesse des gants.....	22
2.3.4.4	Analyse des erreurs.....	22
2.4	ASSOCIATION ENTRE LES DIFFÉRENTS CRITÈRES DE SOUPLESSE.....	23
3.	RÉSULTATS.....	24
3.1	CARACTÉRISATION DE LA RÉSISTANCE AUX AGRESSEURS MÉCANIQUES.....	24
3.2	CARACTÉRISATION DE LA SOUPLESSE AVEC DES MÉTHODES MÉCANIQUES.....	24

3.2.1	<i>Méthode Kawabata</i>	24
3.2.2	<i>Méthode de la double courbure</i>	26
3.2.2.1	Force maximale et travail total	26
3.2.2.2	Travail initial.....	27
3.2.2.3	Comparaison entre les classements donnés par la méthode de la double courbure	28
3.2.2.4	Effet de l'épaisseur sur le travail initial	28
3.3	TESTS DE PERCEPTION ET BIOMÉCANIQUES AVEC SUJETS HUMAINS	31
3.3.1	<i>Test de perception</i>	31
3.3.2	<i>Mesure du niveau d'activation musculaire</i>	32
3.3.2.1	Influence des variables confondantes associées aux procédures expérimentales	32
3.3.2.1.1	Standardisation de la tâche.....	32
3.3.2.1.2	Fatigue musculaire	33
3.3.2.2	Influence des variables confondantes associées aux sujets.....	34
3.3.2.2.1	Effet du genre.....	34
3.3.2.2.2	Effet des caractéristiques anthropométriques	34
3.3.2.3	Sensibilité à la souplesse des gants.....	35
3.3.2.4	Fidélité test-retest (activation musculaire et posture)	37
3.3.2.5	Analyses Bootstrap	38
3.4	ASSOCIATION ENTRE LES DIFFÉRENTS CRITÈRES DE SOUPLESSE.....	40
3.4.1	<i>Comparaison des résultats obtenus par les deux méthodes mécaniques</i>	40
3.4.2	<i>Comparaison entre les résultats des méthodes mécaniques et des méthodes avec sujets humains</i>	41
4.	DISCUSSION	43
4.1	TESTS MÉCANIQUES	43
4.1.1	<i>Association entre la résistance aux agresseurs mécaniques, coupure et perforation, et les mesures de souplesse</i>	43
4.1.2	<i>Souplesse mesurée par la méthode de la double courbure</i>	43
4.2	TESTS DE PERCEPTION ET BIOMÉCANIQUES AVEC SUJETS HUMAINS	44
4.2.1	<i>Évaluation de la présence de variables confondantes</i>	44
4.2.2	<i>Sensibilité aux conditions de gants</i>	45
4.2.3	<i>Évaluation des erreurs</i>	47
4.3	ASSOCIATION ENTRE LES DIFFÉRENTS CRITÈRES DE SOUPLESSE.....	48
5.	CONCLUSIONS	50
6.	RECOMMANDATIONS	51
7.	BIBLIOGRAPHIE	83

1. INTRODUCTION

1.1 L'importance du sujet

Les blessures aux mains, aux doigts et aux poignets comptent pour environ 18% de l'ensemble des lésions indemnisées par la CSST avec des déboursés de 138 millions de dollars pour les années 1998-2000 [1]. Dans certains secteurs industriels tels que l'industrie des produits en métal, des produits métal-électriques, des produits métalliques d'ornement, des services à l'extraction minière et des industries du bois, elles peuvent atteindre jusqu'à 29%. Les heurts, coincements, écrasements, coupures et piqûres avec des objets coupants ou pointus, sont les principales blessures et les agents causaux prépondérants.

1.2 Origine de la problématique de santé et sécurité du travail

Plusieurs facteurs rendent difficile l'utilisation des gants de protection, dont leur manque de souplesse découlant du type de matériau utilisé pour leur fabrication. La rigidité et l'épaisseur des matériaux peuvent exiger un plus gros effort pour effectuer une activité de préhension. De plus, il n'existe pas de matériaux de gants résistant aux agresseurs mécaniques multiples, coupure et piqûre simultanées. Pour se protéger, les travailleurs doivent ainsi souvent enfiler deux gants un par-dessus l'autre, l'un résistant à la coupure et l'autre résistant à la piqûre. Ce type de situation peut mener à une forte résistance, de la part des travailleurs, au port de gants de protection, ce qui a pour conséquence l'augmentation des blessures directes (coupures et écorchures des mains par exemple).

Depuis plusieurs années, les recherches à l'IRSST portent sur la caractérisation de la résistance des gants de protection à la coupure et à la perforation, et sur l'étude de leur souplesse, de leur adhérence et de leurs effets sur la performance humaine lors de tâches manuelles. Plusieurs des méthodes développées à l'IRSST sont reconnues tant au niveau national qu'international (ISO13998 et ASTM F1342 pour la perforation et ISO 13997 et ASTM F 1790 pour la coupure [2,3,4,5]). D'autre part, les résultats de ces travaux ont fait l'objet d'un rapport de recherche et d'une publication [6,7]. Le développement de gants de protection efficaces et fonctionnels a mené à l'élargissement de la recherche interdisciplinaire dans le domaine et à des partenariats institutionnels intéressants. L'état des recherches actuelles a confirmé la nécessité :

- (1) de poursuivre les efforts de caractérisation des matériaux des gants de protection à la piqûre et à la coupure;
- (2) de poursuivre les efforts de caractérisation du comportement biomécanique des membres supérieurs en rapport avec l'utilisation des gants de protection;
- (3) de consacrer des efforts à la caractérisation de la souplesse des matériaux des gants de protection afin d'éclairer les chercheurs et les fabricants dans le développement de gants de protection fonctionnels, confortables et protégeant adéquatement les mains. Les organismes de normalisation sont également intéressés à l'établissement de normes concernant le niveau de souplesse des matériaux de gants.

1.3 Originalité scientifique ou technique de l'objet d'étude

L'étude de la souplesse des gants de protection composés de plusieurs matériaux différents est, à notre connaissance, un sujet peu exploré. La norme ISO 17235 [8] présente une méthode d'essai pour caractériser la souplesse du cuir. Pour sa part, la norme ISO 5979 [9] traite des textiles revêtus de caoutchouc ou de plastique. Dans ce dernier cas, la souplesse est caractérisée par la technique de la boucle plate. Il s'agit ici de former une boucle avec le matériau à tester pour ensuite le soumettre à une pression. L'hypothèse fondamentale de cette méthode est une relation inversement proportionnelle entre la souplesse et la hauteur de la boucle formée précédemment suite à l'application de ladite pression. Finalement, la méthode la plus utilisée dans l'industrie textile est celle développée par Kawabata en 1980 [10]. Dans ce cas, on caractérise la souplesse des tissus par des mesures de la rigidité en flexion uniaxiale du matériau. Afin de permettre la comparaison entre les différentes méthodes, seules les valeurs de rigidité selon les deux directions principales des gants ont été considérées dans cette étude.

Cependant, les sollicitations subies par les gants lorsqu'ils sont utilisés sont de type multidirectionnel et le comportement en souplesse dans ce cas peut ne pas être caractérisé de manière satisfaisante par des tests uniaxiaux. La norme ASTM D 4032 qui caractérise la rigidité des tissus, utilise une sonde cylindrique à tête plate pour forcer un carré d'étoffe dans un trou, ce qui correspond à des déformations equi-biaxiales [11]. Cette méthode a été modifiée afin de caractériser la souplesse des gants de protection et est décrite dans ce rapport sous la dénomination « méthode de la double courbure » : elle devrait permettre de caractériser la souplesse des gants d'une manière qui corresponde mieux aux types de sollicitations subies lors de leur usage. Les résultats obtenus avec la méthode de la double courbure seront comparés aux données issues de mesures utilisant la méthode Kawabata ainsi qu'aux résultats des tests de perception et biomécanique.

De toutes les méthodes permettant d'évaluer la souplesse des matériaux textiles, aucune ne considère la complexité des effets produits par l'interface main-gant. Nelson et al. [12] ont comparé l'effet de la variation de l'épaisseur des gants sur la sensibilité tactile des individus. Bien qu'ils aient négligé la fatigue et ses effets sur la performance au travail à long terme, les auteurs ont conclu, lors de cette étude, que l'épaisseur des gants n'influence pas la capacité d'un individu à identifier la taille des objets qu'il touche ni à accomplir sa tâche dans les délais requis. Bien que les procédés de caractérisation de la souplesse permettent de différencier des matériaux, les conséquences sur le système musculo-squelettique sont, à notre connaissance, peu connues et peu documentées. Ainsi, selon les connaissances actuelles, des gants pouvant se différencier d'un point de vue purement mécanique peuvent être jugés tout à fait équivalents d'un point de vue biomécanique et sensori-moteur.

La plupart des études considérant les aspects biomécaniques ont évalué l'effet du port de gants sur le déploiement de la force maximale de préhension. Selon Mital et al.[13] le port d'un gant diminue de 7 à 30% la force maximale de préhension. Une étude récente confirme cette plage de valeurs (5-23%) pour différents types de gants [14]. Cependant, ce type d'évaluation requiert la production de plusieurs contractions maximales, supposant le concours de sujets sains (sans douleur) et motivés, ainsi qu'un nombre limité de contractions musculaires dans une même

session de mesure afin de ne pas introduire l'effet confondant de la fatigue musculaire. De plus, une telle procédure d'évaluation des gants ne permet pas de contrôler les différences interindividuelles au niveau de la force maximale. Ceci rend la comparaison des résultats d'études difficile, voire impossible. Pour contourner ces difficultés, une méthode d'évaluation basée sur des mesures d'électromyographie (EMG) de surface a été proposée [6,7]. Nous appellerons cette méthode « test biomécanique ». Elle consiste à mesurer le niveau d'activité musculaire (muscles fléchisseurs et extenseurs des doigts et du poignet) correspondant à une contraction sous-maximale dont l'intensité (en proportion de la force maximale) est mesurée par un dynamomètre. On parvient ainsi à limiter le nombre de contractions maximales et à contrôler les différences interindividuelles au niveau de la force maximale. Comme le port des gants diminue la force maximale de préhension, il devrait en résulter une plus grande activité musculaire pour produire une même force externe (mesurée par dynamométrie). L'idée est entièrement originale, les études EMG réalisées jusqu'à maintenant pour évaluer les gants de protection ne comportant que des contractions maximales [15,13,16]. Dans ces dernières études, aucune différence n'avait été observée en ce qui concerne l'activation EMG des différents gants et avec raison, puisqu'une force maximale était demandée à chaque fois. Cela peut paraître évident mais certains auteurs interprètent ces résultats comme signifiant que le port de gants n'implique pas de différence en ce qui a trait à l'activation musculaire [17].

L'étude de Larivière et al. (2003) [6] était exploratoire et a nécessité un protocole de mesure particulier afin de permettre non seulement une quantification du niveau d'activation musculaire, mais aussi de la fatigue musculaire engendrée par le port de gants. Ces deux paramètres EMG ont été obtenus avec une seule tâche impliquant une contraction de préhension soutenue (1 minute) à une intensité correspondant à 35% de la force maximale. Les résultats de cette étude nous ont permis de conclure que la mesure du niveau d'activation musculaire est la plus prometteuse. En plus d'être sensible aux différentes conditions expérimentales (port de deux gants différents), les erreurs de mesure qui lui sont associées peuvent être jugées convenables. Quant à la fatigue musculaire, cette variable a été évaluée trop instable pour permettre une mesure EMG fidèle. La principale recommandation découlant de l'étude a donc été de remplacer la contraction permettant de générer de la fatigue (contraction de 1 minute) par une contraction de courte durée (ex. : 5 s) permettant de quantifier notre variable d'intérêt, c'est-à-dire le niveau d'activation musculaire. Une stratégie basée sur la mesure répétée (5 à 10 essais) de chaque condition expérimentale (pour chaque gant) a été proposée afin de rehausser la fidélité de la mesure. Ce nouveau protocole a l'avantage de permettre l'évaluation d'un plus grand nombre de gants dans une même session de mesure. L'ancien protocole impliquant une contraction d'une minute avait nécessité une période minimale de repos de 15 minutes, diminuant le nombre de gants pouvant être évalués. Le type de contractions musculaires (courte durée, intensité modérée) demandé dans le nouveau protocole proposé, lorsqu'elles sont espacées d'une période de repos beaucoup plus courte (1 – 2 min), ne mène pas à une accumulation de fatigue musculaire. Rappelons que la fatigue musculaire influence les signaux EMG et devient une variable confondante si elle est cumulée au cours de la session d'évaluation.

Le développement du test biomécanique nécessite de documenter ses qualités métrologiques, notamment en ce qui a trait à la fidélité test-retest des résultats ainsi que leur validité. La validité peut être documentée en vérifiant la capacité du test à détecter des différences entre des gants ayant une souplesse différente. Cependant, cela requiert la définition de cette souplesse avec les

meilleurs critères disponibles actuellement. Les méthodes mécaniques énumérées ci-haut peuvent jouer ce rôle mais elles ne prennent pas en considération l'interface gant-main. Il n'y a qu'un autre critère qui puisse potentiellement intégrer cette information. Ce critère, qui est fréquemment utilisé en ergonomie pour documenter des phénomènes complexes pour lesquels aucune mesure objective n'est disponible, fait appel aux perceptions des sujets. Il s'agit d'un critère subjectif (psychophysique) faisant appel aux notions de perception de l'effort [18].

1.4 But de l'activité et objectifs spécifiques

Le but principal de cette activité est de documenter la souplesse de différents gants et de poursuivre le développement du test biomécanique.

Les objectifs principaux et spécifiques consisteront à :

- 1) Caractériser la souplesse de gants de protection (n = 28 gants) composés de matériaux différents par des méthodes de laboratoire (méthodes mécaniques) utilisées pour les textiles. Au besoin, mettre au point une nouvelle méthode d'essai adaptée spécifiquement aux gants de protection.
- 2) Caractériser la souplesse à l'interface main-gant avec la méthode biomécanique modifiée, mais cette fois-ci pour une plus large gamme de gants de protection (n = 28 gants + 1 condition main nue) afin de mieux documenter la sensibilité de cette méthode. Cependant, avant de répondre à cet objectif principal, trois objectifs spécifiques seront réalisés afin de déterminer quelles variables EMG, parmi les différents muscles et combinaisons de muscles investigués (n = 8), sont les plus prometteuses :
 - 2.1. Vérifier si le genre et les caractéristiques anthropométriques de la main influencent les résultats afin de ne conserver, si possible, que les variables EMG qui ne sont pas influencées par ces variables confondantes potentielles;
 - 2.2. Évaluer la sensibilité des variables EMG à détecter des différences entre différents types de gants;
 - 2.3. Évaluer l'effet des variations dans les mesures EMG (erreurs de la mesure).
- 3) Vérifier l'association entre (1) les tests mécaniques de souplesse (méthode Kawabata et de la double courbure), (2) les variables biomécaniques (EMG) et (3) la perception de l'effort. Cet objectif est associé à ce que l'on nomme la validité de critère concurrente.

2. MÉTHODOLOGIE

Dans un premier temps, nous avons sélectionné des gants de protection qui ont été caractérisés selon leur résistance à la coupure et à la perforation par les techniques et méthodes développées à l'IRSST. Par la suite, nous avons caractérisé la souplesse de ces mêmes gants de protection suivant les méthodes mécaniques, psychophysiques et biomécaniques décrites ci-dessous.

2.1 Matériaux

Au total, vingt-huit modèles de gants différents ont été sélectionnés parmi les produits offerts par les compagnies Best et Ansell de manière à couvrir un large éventail de souplesse. Le Tableau A-1, en Annexe A, donne les noms des différents modèles de gants, ainsi que leur épaisseur totale (couches paume et dos incluant une éventuelle doublure) mesurée au milieu de la paume et les matériaux constituant ces gants.

Les épaisseurs totales des gants se répartissent entre 1,1 et 8,6 mm. En termes de matériaux, la majorité des modèles ont une structure composite, comprenant une doublure, le plus souvent tricotée, imprégnée ou enduite d'un polymère. Les autres types de gants sont soit faits d'élastomère pur ou d'un tricot seul. Les photos en Annexe A-2 et A-3 montrent les différents modèles de gants testés dans le cadre de cette étude.

2.2 Tests mécaniques

Les 28 gants sélectionnés pour cette étude ont été soumis à des tests pour caractériser leurs propriétés mécaniques, soit la résistance à la coupure et à la perforation ainsi que la souplesse. Les sections qui suivent décrivent les méthodes de laboratoire utilisées pour caractériser les gants de protection.

2.2.1 *Mesure de la résistance aux agresseurs mécaniques*

2.2.1.1 Résistance à la coupure

La résistance à la coupure a été caractérisée à l'aide d'un appareil TDM 100 développé à l'IRSST (voir Figure 1) et suivant le protocole décrit dans la norme ISO 13997 [2]. Cet appareil permet de mesurer la distance que doit parcourir une lame de 70 mm de long (type GRU-GRU, modèle 88-0121, fabriquée par American Razor Co¹) pour couper un matériau placé sur un porte-échantillon semi-circulaire d'un rayon de $38,0 \pm 0,5$ mm, lorsqu'une force normale est appliquée. Les échantillons ont été pris de la paume des gants, coupés selon un angle de 45° par rapport au sens machine de la partie tricot, et fixés sur le porte-échantillon avec un ruban adhésif ayant les surfaces collantes des deux côtés. La dimension des échantillons était de 25 mm de large et de 100 mm de long. Collée directement au-dessous du matériau testé, une feuille d'aluminium de 8 mm de large, placée le long de la partie centrale de l'échantillon, sert à

¹ American Safety Razor Co., Razor Blade Lane, Verona, VA 24482, U.S.A.

détecter la coupe du matériau par contact électrique avec la lame. Trois charges différentes ont été utilisées et les distances de parcours de la lame pour provoquer la coupure du matériau ont été mesurées avec une précision de 0,01 mm. Un minimum de cinq essais pour chaque charge pour un total d'au moins quinze essais ont été réalisés. La résistance à la coupure est définie comme étant la charge nécessaire pour couper le matériau avec un parcours de lame de 20 mm (voir Figure 2). Pour les essais, le protocole de la norme ASTM F 1790-05 « *Standard Test Method for Measuring Cut Resistance of Materials used in Protective Clothing* » a été utilisé.

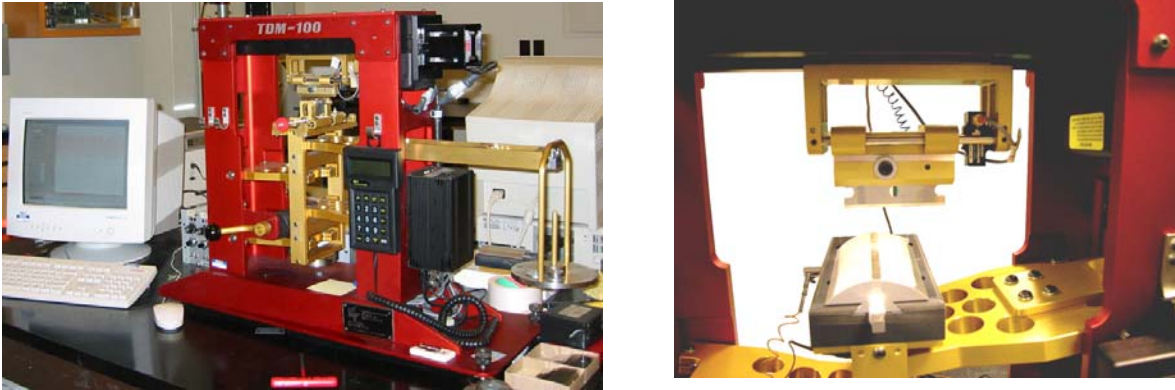


Figure 1. Vues du montage pour les tests de coupure

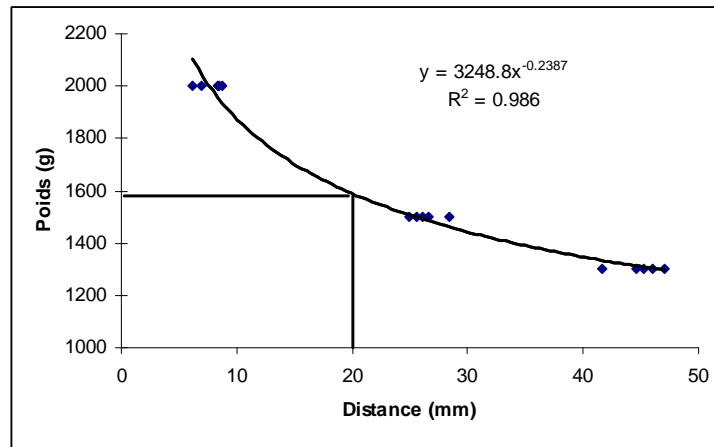


Figure 2. Exemple typique des résultats obtenus lors de la caractérisation de la résistance d'un gant (Best 937C) à la coupure

2.2.1.2 Résistance à la perforation

La résistance des gants à la perforation a été caractérisée en utilisant le protocole développé à l'IRSST dans une recherche précédente [19] et qui fait partie de la nouvelle norme ASTM sur la perforation [3]. Brièvement, cette méthode utilise une sonde droite de 1 mm de diamètre avec une pointe arrondie avec un rayon de 0,5 mm. Cette sonde est fixée directement sur une cellule de charge qui est, à son tour, fixée au bras mobile d'un appareil de type Instron (voir Figure 3) se déplaçant à une vitesse contrôlée de 500 mm/min. Le porte-échantillon qui est composé des deux

plaquettes ayant un trou chanfreiné de 10 mm de diamètre est fixé au bras immobile de l'appareil de mesure. Au fur et à mesure que la sonde pénètre le matériau, la force mesurée augmente jusqu'à provoquer la rupture du matériau. Le maximum de la force mesurée à la rupture du matériau (voir Figure 4) sert à déterminer la résistance du matériau à la perforation. Pour chaque matériau, un nombre de dix essais est réalisé.

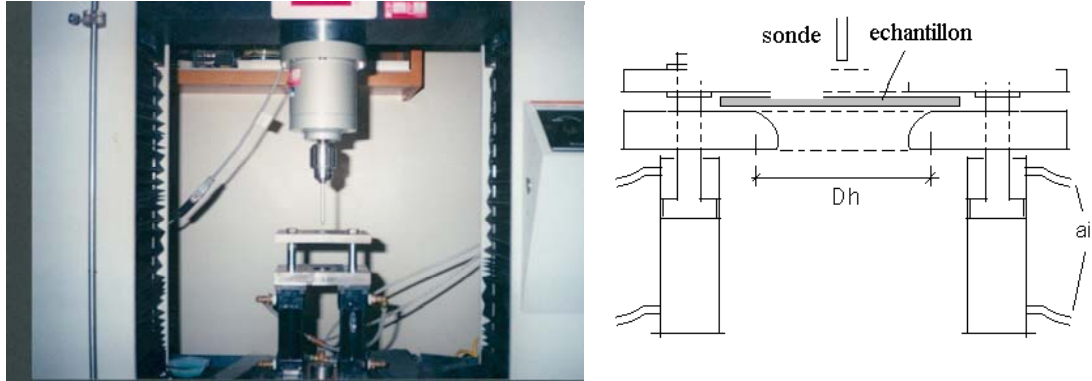


Figure 3. Vue du montage pour les tests de perforation

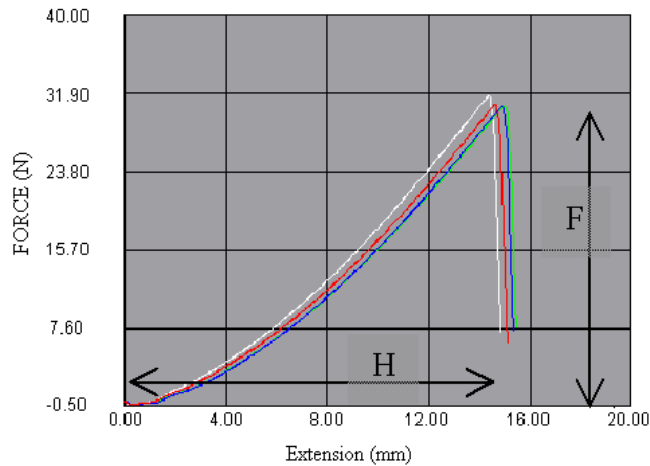


Figure 4. Résultats typiques des tests de perforation

2.2.2 Mesures de la souplesse en laboratoire

Deux techniques ont été utilisées pour évaluer la souplesse par des tests en laboratoire. Des mesures de rigidité en flexion par la méthode Kawabata ont été réalisées par le Centre des Technologies Textiles (Groupe CTT). Par ailleurs, un dispositif de mesure de la rigidité basé sur des déformations à double courbure a été développé à l'École de Technologie Supérieure (ÉTS).

2.2.2.1 Méthode Kawabata

Le système d'évaluation Kawabata est largement utilisé dans l'industrie textile pour caractériser les propriétés mécaniques et l'état de surface des étoffes textiles [10,20]. Il comporte quatre instruments de mesure rassemblés sous la dénomination KESF : (1) FB1 : Tension et cisaillement; (2) FB2 : Flexion; (3) FB3 : Compression et (4) FB4 : Rugosité et friction.

Par le biais de cinq tests, identifiés dans le Tableau 1, seize paramètres caractérisant différentes propriétés mécaniques ainsi que l'état de surface des matériaux textiles sont mesurés.

Tableau 1 : Caractéristiques des matériaux textiles déterminées par la méthode Kawabata (d'après [21])

<i>Test</i>	<i>Paramètre</i>	<i>Désignation</i>
Tension	LT	Linéarité des courbes d'extension
	WT	Énergie de tension
	RT	Résilience de tension
Cisaillement	G	Module de cisaillement
	2HG	Hystérésis de la force de cisaillement à 0,5'
	2HG5	Hystérésis de la force de cisaillement à 5'
Flexion	B	Rigidité à la flexion
	2HB	Hystérésis du moment de flexion
Compression latérale	LC	Linéarité et courbe de compression de l'épaisseur
	WC	Énergie de compression
	RC	Résilience de compression
Caractérisation de surface	MIU	Coefficient de friction
	MMD	Déviation de MIU par rapport à la moyenne
	SMD	Rugosité géométrique
Construction de l'étoffe	W	Masse par unité de surface
	T ₀	Épaisseur

2.2.2.1.1 Principe de la mesure

Dans le système d'évaluation Kawabata, le test qui caractérise la souplesse est la mesure de la rigidité en flexion, cette rigidité étant inversement proportionnelle à la souplesse. La rigidité est mesurée de manière uniaxiale, dans les directions longitudinales et transverses du matériau.

Un appareil de mesure en flexion, de type KES-FB2 (Kato Tech Co.), a été utilisé pour ces mesures réalisées par le CTT (voir Figure 5). Par rapport aux appareils basés sur le principe du cantilever, ce dispositif a l'avantage de courber l'ensemble de l'échantillon selon un arc de courbure constante [22], ce qui correspond à une déformation en pure flexion. Cet appareil permet de caractériser la rigidité de films minces comme les textiles (tissés, tricotés et non-tissés), le cuir, le caoutchouc et les fibres.



Figure 5 : Photo du dispositif de mesure KES-FB2 (gracieuseté de Kato Tech Co.)

Le principe de fonctionnement est illustré sur la Figure 6. Une extrémité de l'échantillon est maintenue dans un mandrin fixe, relié à un torque mètre, tandis que l'autre est placée dans le mandrin mobile [22]. Le mandrin mobile suit une orbite fixe tout en s'inclinant de manière à maintenir une courbure uniforme sur la longueur de l'échantillon.

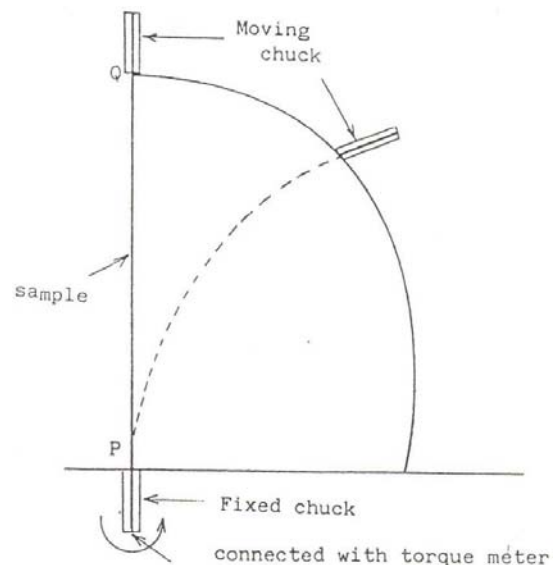


Figure 6 : Principe de la mesure (tiré de [22])

Le moment angulaire de flexion M est enregistré en fonction de la valeur de l'angle de courbure K de l'échantillon au cours du déplacement du mandrin mobile entre les courbures $-2,5$ et $2,5$ cm^{-1} (aller et retour). La Figure 7 illustre la forme de la courbe ainsi obtenue. La rigidité est égale au rapport du moment de flexion M par la courbure K et est calculée comme la pente de la courbe $M = f(K)$ pour des courbures situées entre -1 et $+1$ cm^{-1} . Elle s'exprime en $\text{gf}\cdot\text{cm}^2/\text{cm}$ ou en $\mu\text{Nm}^2/\text{m}$.

$$\text{Rigidité en flexion} = \frac{M}{K}$$

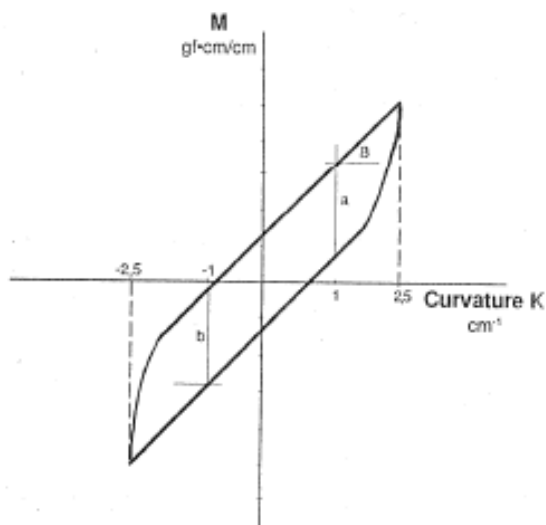


Figure 7 : Variation du moment de flexion en fonction de la courbure de l'échantillon (tiré de [22])

2.2.2.1.2 Conditions opératoires

Les échantillons ont été découpés dans la paume du gant, longitudinalement et transversalement, et comprennent le cas échéant la doublure. Pour chaque modèle de gant et dans chacune des deux directions (longitudinale et transverse), trois répliques ont été mesurées sur des échantillons différents.

La taille des échantillons a été déterminée par itérations successives afin que les valeurs de moment mesurées restent à l'intérieur de la gamme de détection de l'appareil, soit entre $0,002$ et 50 $\text{gf}\cdot\text{cm}$.

2.2.2.2 Méthode de la double courbure

La norme ASTM D 4032 de mesure de la rigidité des tissus [11] utilise un piston plongeur à tête cylindrique plate de $25,4$ mm de diamètre pour insérer dans un trou de $38,1$ mm de diamètre une pièce d'étoffe de dimensions 4 pouces par 8 pouces pliée en deux. La Figure 8 montre un

exemple d'appareil utilisé pour réaliser cette mesure. Le plongeur force le passage du carré de tissu à travers le trou percé dans la plaque.

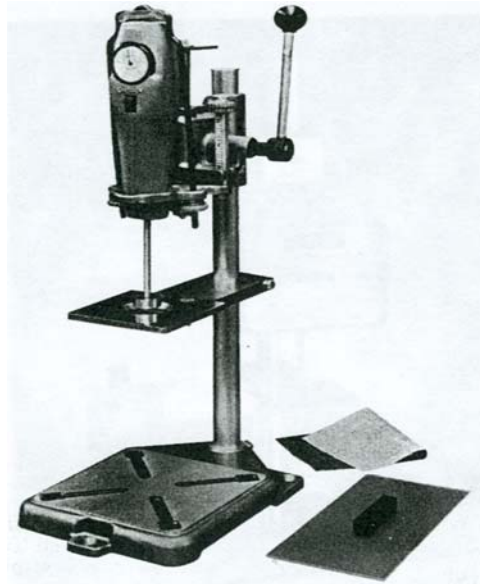


Figure 8 : Dispositif de mesure utilisé dans la norme ASTM 4032 (reproduit de [11])

Dans la norme, la force maximale pour faire entrer le morceau d'étoffe dans le trou est utilisée comme indicatif de la rigidité du matériau, cette rigidité étant elle-même inversement proportionnelle à la souplesse. Dans le cadre d'une étude sur le confort des étoffes textiles, des auteurs [23] ont extrait un autre paramètre des mesures réalisées selon cette norme, soit le travail nécessaire pour faire passer la totalité du morceau de tissu à travers le trou. En effet, ce travail est proportionnel à l'énergie de déformation, elle-même inversement proportionnelle à la souplesse.

Dans le cas des gants de protection, l'épaisseur des matériaux, étant comparativement plus grande à celle des tissus pour lesquels est prévue la norme ASTM D 4032, rend l'utilisation de la technique telle quelle impossible. Une technique de mesure de la souplesse des gants de protection a donc été développée à l'ÉTS sur le principe de la norme ASTM D 4032. Trois modifications principales ont été apportées au dispositif de mesure. Dans un premier temps, afin de tenir compte de l'épaisseur beaucoup plus importante des gants par rapport aux étoffes pour lesquelles la norme est destinée, le jeu radial entre le diamètre du plongeur et celui du trou a été augmenté à 10,6 mm. Par ailleurs, afin de limiter la concentration des contraintes au bas de la tête de la sonde et de mieux simuler les déformations subies par les gants de protection dans des conditions d'usage normales [24], une forme conique-sphérique a été adoptée pour l'extrémité du plongeur, produisant ainsi des déformations à double courbure telles qu'utilisées par Laroche et Vu-Khanh [25]. La dernière modification par rapport à la configuration proposée par la norme consiste à maintenir le diamètre du plongeur égal à sa valeur à la sortie de la partie conique jusqu'à son extrémité supérieure, afin de pouvoir tenir compte de l'influence des doigts des gants sur la mesure de souplesse.

Les dessins techniques correspondants au dispositif ainsi développé sont donnés en Annexe B-4. La Figure 9 schématise les deux parties du dispositif, soit le plongeur et la plaque trouée. Ce dispositif peut être utilisé avec une machine de type Instron qui applique la force sur le plongeur et enregistre le déplacement de celui-ci.

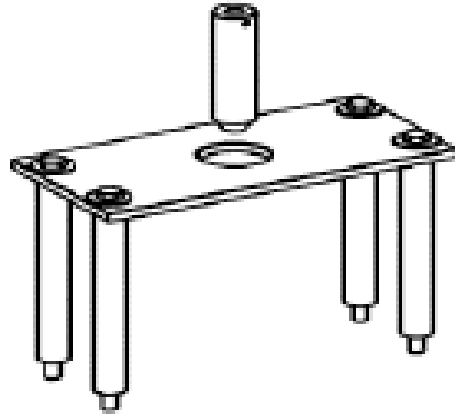


Figure 9 : Schéma du dispositif de mesure de la souplesse avec déformation à double courbure

Les mesures présentées dans ce rapport ont été réalisées avec une machine Instron 1137 fonctionnant en mode compression. La Figure 10 montre le dispositif de mesure installé dans la machine de traction avec un gant positionné au-dessus du trou et orienté avec la paume vers le haut.

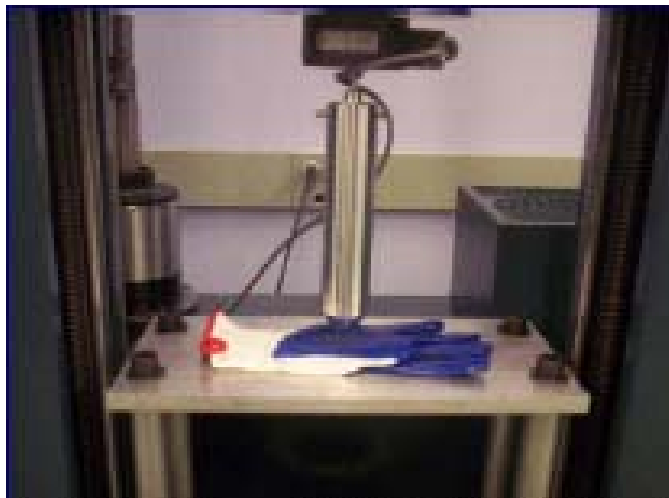


Figure 10 : Photo du montage expérimental de mesure de la souplesse

2.2.2.2.1 Principe de la mesure

La force nécessaire pour faire pénétrer le gant dans le trou de diamètre égal à 57 mm à l'aide du plongeur cylindrique à base sphérique-conique de diamètre égal à 35,8 mm est mesurée en fonction du déplacement du plongeur. La Figure 11 donne un exemple de la courbe ainsi

obtenue. Dans certains cas, un nombre plus élevé de maxima principaux et secondaires peuvent être présents. Ces maxima peuvent généralement être associés au passage des doigts du gant se produisant au niveau de la section cylindrique de la sonde.

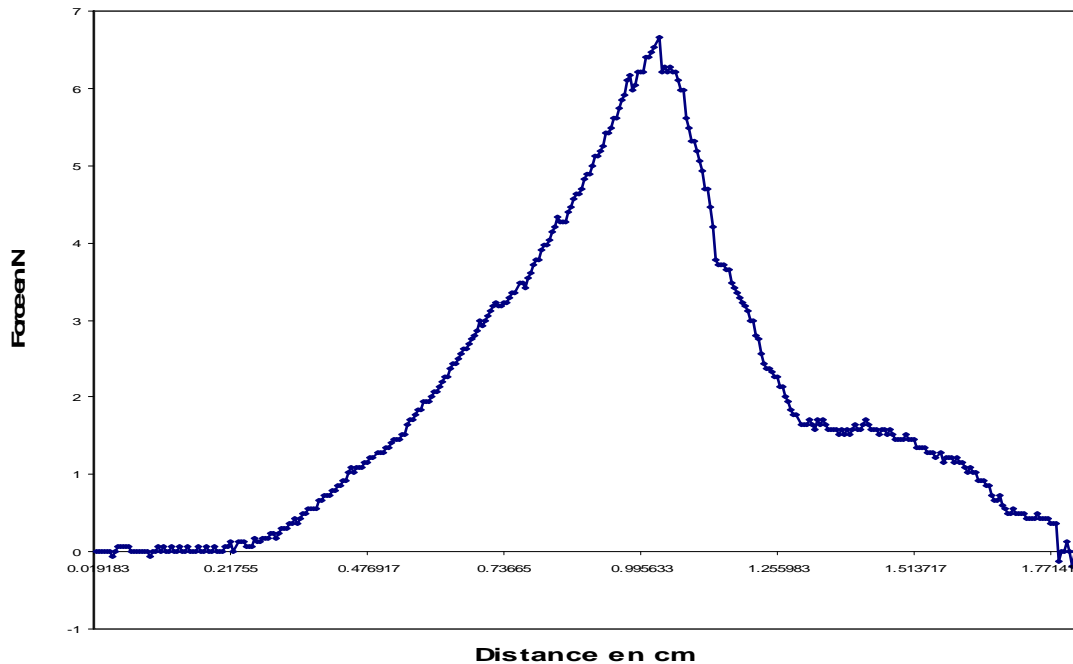


Figure 11 : Exemple de courbe obtenue par mesure de la force exercée sur le plongeur pour faire passer la totalité du gant à travers le trou

En accord avec la littérature, deux paramètres peuvent être extraits de ces courbes : la force maximale et le travail nécessaire pour faire passer la totalité du gant à travers le trou à l'aide de la sonde. Cependant, ces deux paramètres subissent l'influence parasite de deux caractéristiques des gants. D'une part, le coefficient de friction de la surface des gants intervient par le biais du phénomène d'adhérence qui se développe entre le gant et l'aluminium constituant la plaque trouée, en particulier au niveau du passage de la section cylindrique de la sonde. Or, selon la nature du matériau constituant le gant et le traitement de surface ayant été appliqué lors de la fabrication, les valeurs de coefficient de friction peuvent varier grandement d'un modèle de gant à un autre. D'autre part, l'épaisseur des gants, dont dépend la souplesse, produit un effet additionnel et non souhaité lors du passage de la section cylindrique de la sonde au niveau du trou. L'utilisation de la force maximale et du travail total doit donc être considérée avec prudence lors de la réalisation d'études comparatives des performances en terme de souplesse pour des gants d'épaisseur ou de composition différente.

Par contre, l'influence parasite de ces deux facteurs peut être fortement limitée si l'analyse est réalisée uniquement dans la partie initiale du déplacement de la sonde, en particulier avant que la partie cylindrique de celle-ci n'arrive au niveau du trou. Les bornes qui ont été choisies pour cette analyse de la déformation initiale correspondent à un déplacement de 10 mm de la sonde à partir du début de la déformation du gant. Cette distance de 10 mm est égale à la moitié de la hauteur de la zone sphérique-conique de la sonde, où l'influence de la friction et de l'épaisseur du gant est limitée. Les Figures 12(a) et (b) schématisent les configurations du dispositif

correspondant aux positions de la sonde entre lesquelles l'analyse de la déformation initiale est réalisée.

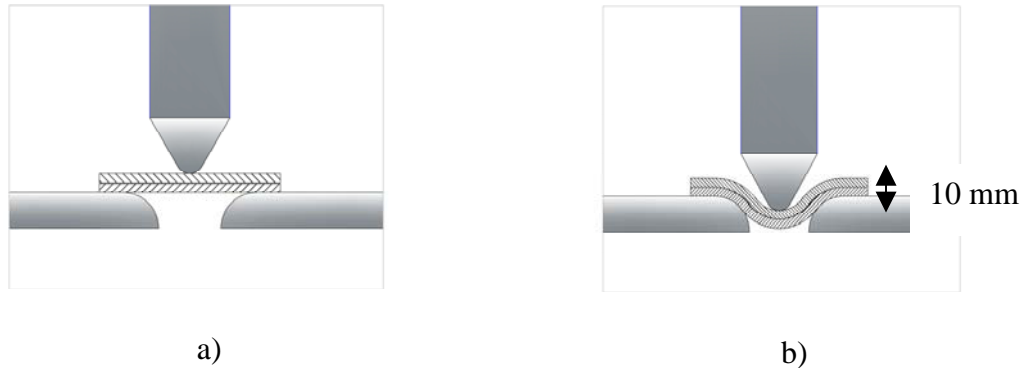


Figure 12 : a) Configuration du dispositif correspondant à la limite inférieure de l'analyse et b) Configuration du dispositif correspondant à la limite supérieure de l'analyse

En pratique, l'épaisseur totale des gants (couches dos et paume) dans la zone correspondant à l'endroit en contact avec l'extrémité de la sonde est mesurée. Ceci permet de déterminer pour chaque modèle de gant les valeurs des deux bornes correspondant aux configurations illustrées dans les Figures 12(a) et (b) par rapport au zéro du déplacement pris au niveau de la surface supérieure de la plaque trouée.

Le travail est proportionnel à l'énergie de déformation, elle-même inversement proportionnelle à la souplesse. Par conséquent, ce paramètre est utilisé pour réaliser l'analyse de la déformation initiale du gant. La Figure 13 montre deux exemples des parties initiales de courbes expérimentales force-déplacement, auxquelles a été appliquée l'analyse de la déformation initiale en terme de travail. Étant donné que ces deux modèles de gants ont des épaisseurs différentes, les valeurs des bornes d'intégration de la force ne sont pas les mêmes. Par contre, la distance d'intégration est dans les deux cas égale à 10 mm.

Afin d'éliminer l'effet des petites imperfections de la mesure dans le calcul du travail, les courbes expérimentales de force en fonction du déplacement de la sonde sont lissées par une équation de régression polynomiale d'ordre 3, qui donne dans tous les cas un coefficient de détermination supérieur à 0,99.

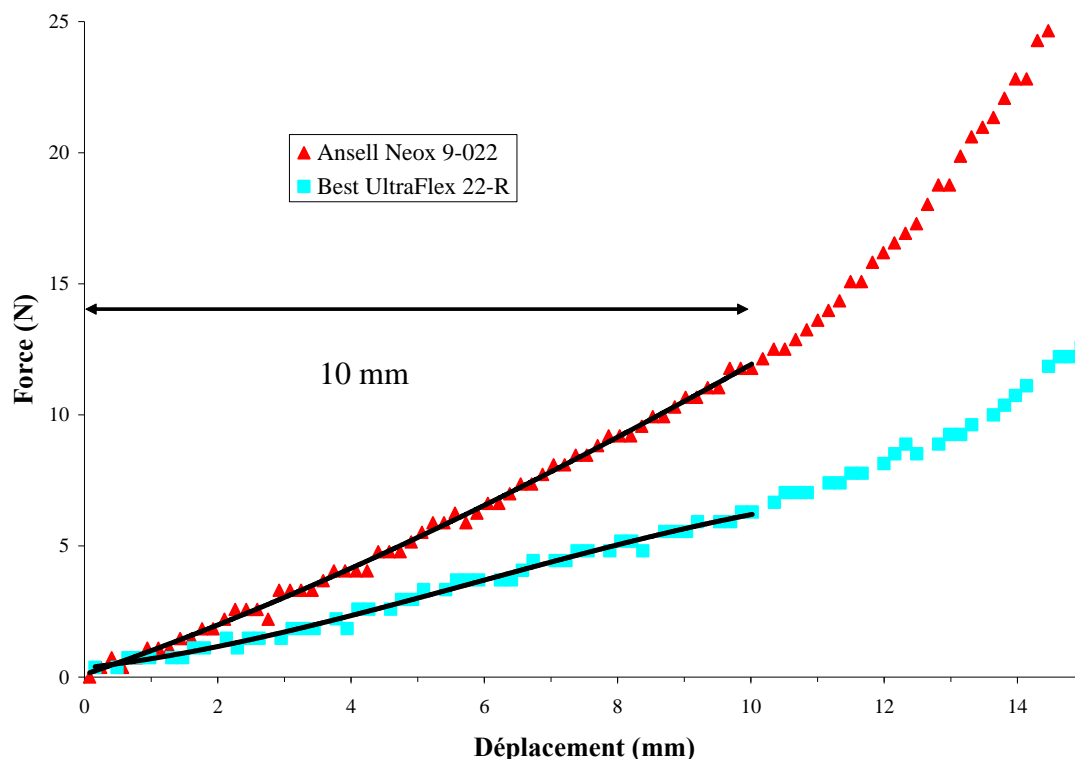


Figure 13 : Exemple de courbes force-déplacement avec calcul du travail initial

2.2.2.2 Conditions opératoires

Chacun des vingt-huit modèles de gants sélectionnés pour cette étude a été mesuré selon la technique de la double courbure. Chaque gant a été testé dans son intégralité, la face paume vers le haut (voir Figure 10). Pour chaque modèle de gant, les mesures ont été prises sur cinq échantillons différents.

2.3 Tests de perception et biomécanique avec sujets humains

2.3.1 Sujets

Trente sujets (quinze hommes et quinze femmes) âgés entre 20 et 55 ans ont été sélectionnés sur une base volontaire (Tableau 2). Ces sujets ont lu puis signé un formulaire de consentement conforme aux règles définies par le comité d'éthique de la recherche de l'ÉTS. La strate d'âge proposée (20 à 55 ans) correspond à une population de travailleurs. Les principaux critères d'exclusion sont (1) la présence d'une maladie systémique ou dégénérative (arthrite, rhumatisme, sida, cancer, sclérose en plaques ou autre), (2) la présence de problèmes musculo-squelettiques (chirurgie, douleurs, inflammations) ou de malformations congénitales relatives aux membres supérieurs, (3) la présence de troubles neurologiques et (4) une réponse positive au questionnaire d'aptitude à l'activité physique (QAAP). Un dernier critère d'exclusion concernait la grandeur de

la main car le dynamomètre de préhension de forme cylindrique d'une circonférence de 14 cm (diamètre : 4,4 cm) n'était pas bien adapté aux personnes ayant de petites mains. Ceci nous oblige à exclure les percentiles inférieurs de la population présentant une circonférence de la paume inférieure à 15,2 cm ou une longueur de la main inférieure à 16 cm. Ces valeurs sont issues d'un protocole standardisé (BSI Standards 001785) impliquant un dynamomètre de même type (diamètre: 4,0 cm) et permettant de quantifier la capacité de différents gants à atténuer les vibrations [26]. Le diamètre de la poignée du dynamomètre correspond au diamètre de la prise de puissance de 95^e percentile de la population masculine (4,3 cm) selon Diffrient et al. [24], ce qui est supérieur aux recommandations de Kong et Lowe [27] quant aux diamètres de poignée maximisant la perception de confort dans une population et la force maximale exercée par les différents doigts. Certaines mesures anthropométriques des mains ont été recueillies à l'aide des repères et des conventions recommandées dans HumanScale 6 de Diffrient [24]. Les cinq mesures retenues sont présentées dans le Tableau 2 et les Tests-t indiquent s'il y a une différence significative entre les genres.

Tableau 2 : Caractéristiques démographiques et mesures (cm) anthropométriques de la main dominante du sujet

	Femmes (n=15)		Hommes (n=15)		Test-t Valeur P
	Moyenne	Écart-type	Moyenne	Écart-type	
Âge (an)	27,8	9,5	24,9	4,9	0,2641
Stature (m)	1,64	0,06	1,83	0,09	0,0000
Poids (kg)	63,5	13,1	83,1	19,8	0,0042
Largeur de la paume	8,5	0,5	10,1	1,2	0,0000
Longueur de la paume	9,8	0,4	11,7	1,2	0,0000
Circonférence paume	19,1	0,9	23,4	2,4	0,0000
Longueur de la main	17,3	0,9	20,1	1,8	0,0000
Largeur de la main	9,3	0,7	11,3	1,1	0,0000

Les mesures anthropométriques de la main (en cm) sont décrites en Annexe A-4.

2.3.2 Test de perception

Afin d'éviter que les sujets n'utilisent leurs perceptions ressenties lors des tests biomécaniques, une évaluation psychophysique de la souplesse des gants a été réalisée par chaque sujet avant les tests biomécaniques. Ces tests ont été réalisés avec vingt-sept paires de gants, un des modèles de gants (modèle Best Cannonball® 803) n'étant pas disponible en nombre suffisant pour fournir un gant neuf à chaque sujet. Par contre, une condition contrôle (à main nue) a été ajoutée au protocole expérimental. Pour le test psychophysique, une procédure en deux étapes a été utilisée. Premièrement, le sujet devait classer en ordre de rigidité les gants en les essayant un à un. Cela permettait d'identifier le gant le moins rigide et le gant le plus rigide de manière à définir les points d'ancrage (extrêmes) de la distribution qui allait être définie par les chiffres de 1 à 10 (1 = aucune rigidité; 10 = rigidité extrême). Par la suite, chaque gant devait être caractérisé avec un chiffre variant entre ces deux extrêmes. Le sujet pouvait essayer tous les gants le nombre de fois voulu pour bien les classer. Afin de permettre une évaluation itérative, les gants étaient déposés dans des bacs (n=10) qui correspondaient à l'évaluation (1-10) faite par les sujets et cette évaluation devait comprendre au minimum un gant à chacune des extrémités de

l'échelle. Cette stratégie permet d'éliminer les différences interindividuelles, comme c'est le cas du test biomécanique (utilisation d'une charge relative à la force maximale), et permet de s'assurer que l'étendue des cotes couvrira toute l'échelle. Cela permettra de faire de cette évaluation subjective un outil sensible aux différences fines entre les gants.

Voici les consignes données aux sujets :

- Vous devez placer les gants dans les paniers en fonction de la souplesse de ces derniers et non en fonction du confort, de la taille ou quoi que ce soit d'autre.
- Vous devez placer le gant le plus souple dans ce panier (le premier) et le gant le moins souple dans celui-ci (le dernier). Vous pouvez placer plus d'un gant dans ces deux paniers si vous les jugez équivalents en terme de souplesse.
- Ensuite, vous devez placer les autres gants dans les paniers en les essayant le nombre de fois que vous voulez. Il n'y a pas de contrainte de temps. Il est possible de ne mettre aucun gant dans certains paniers si vous le jugez ainsi.

2.3.3 Test biomécanique

2.3.3.1 Tâches

Le test biomécanique comprend des contractions maximales volontaires et des contractions en pallier à 35% de la force maximale volontaire (FMV). Pour toutes ces tâches, la position du membre supérieur a été standardisée de la façon suivante : l'avant-bras de la main dominante est appuyé sur une table, en position de demi-pronation supination, le coude fléchi à 120° et l'épaule en légère abduction (voir Figure 14). Une fois l'avant bras appuyé sur la table, le sujet devait replacer son olécrane (coude) en contact avec un coussinet positionné à l'arrière de ce dernier. Des marqueurs sur le dynamomètre et sur la tablette sur lequel il reposait permettaient de repositionner le dynamomètre au même endroit à chacun des essais. Finalement, un marqueur était positionné au centre du dynamomètre afin que le sujet remplace toujours sa main au même endroit.

2.3.3.1.1 Contractions maximales volontaires

Des contractions maximales volontaires ont été réalisées pour établir la force maximale volontaire (FMV) de préhension ainsi que l'amplitude maximale du signal EMG des muscles impliqués. Trois contractions maximales ont été faites avec le dynamomètre de préhension suivies de trois autres contractions pour solliciter plus spécifiquement les muscles extenseurs du poignet. Ces trois dernières contractions étaient faites avec l'avant-bras en pronation (contre la surface de la table) et consistaient à exercer un effort isométrique en extension du poignet contre une résistance manuelle produite par l'expérimentateur. Chaque contraction maximale consistait à développer progressivement la force jusqu'à l'atteinte du maximum vers la 3^e seconde, puis à soutenir cette force pendant une seconde, et à relâcher. La valeur maximale de force recueillie lors des trois contractions de préhension sert de FMV pour établir la charge relative lors du test de souplesse. Deux minutes de repos étaient accordées entre chaque contraction [28].

Deux procédures reconnues pour leur efficacité ont été utilisées pour favoriser l'atteinte d'une contraction maximale volontaire, c'est à dire l'emploi (1) d'une rétroaction visuelle de la force produite en temps réel (moniteur placé devant le sujet) et (2) et d'encouragements verbaux provenant de l'expérimentateur [29].

2.3.3.1.2 Contractions en pallier

Pour l'évaluation de la souplesse de chaque type de gant, deux contractions musculaires isométriques de 5 secondes à 35% de la FMV étaient réalisées de façon consécutive, en laissant 60 secondes de repos entre chaque essai. Après chaque essai, le sujet devait enlever et remettre le gant en question de manière à éliminer toute erreur systématique dans les résultats correspondant au type de gant évalué. Une rétroaction visuelle de la force de préhension appliquée sur le dynamomètre était fournie sur un moniteur placé devant le sujet de manière à ce que la force soit maintenue constante tout au long de l'effort. Le sujet devait positionner un curseur entre deux bornes positionnées à $\pm 5\%$ FMV de la force visée (35% FMV).

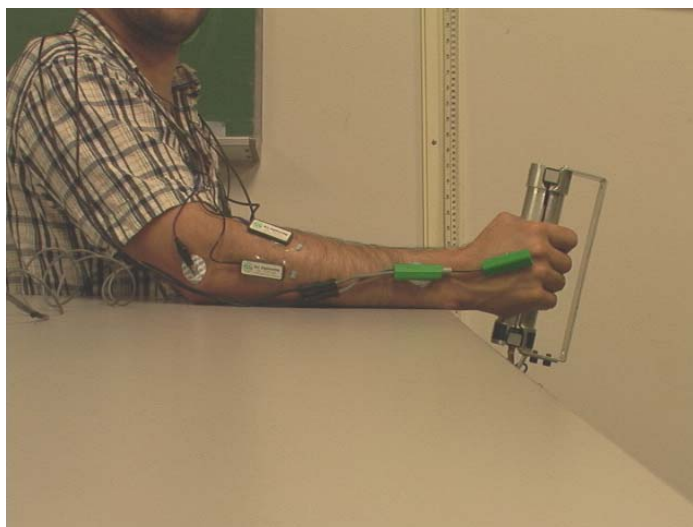
2.3.3.2 Techniques de mesures

2.3.3.2.1 Dynamométrie

Le dynamomètre utilisé (Figure 14A) est décrit dans un projet antérieur [6]. Les signaux de forces étaient enregistrés avec une fréquence d'échantillonnage de 1024 Hz (imposé par la cueillette du signal EMG). Le dynamomètre n'était pas fixé sur la table pour s'assurer que les efforts produits soient en préhension seulement.



(A)



(B)

Figure 14: Méthode d'évaluation de l'effort et du niveau d'activation musculaire en fonction des matériaux des gants de protection utilisés. Dynamomètre de préhension (A) et montage expérimental utilisé pour l'évaluation biomécanique de la souplesse des gants (B). En B, le dynamomètre est positionné debout sur une tablette ajustable en hauteur (n'est pas apparent sur cette photo).

2.3.3.2.2 Électromyographie

Quatre paires d'électrodes de surface (B&L Active EMG Electrode – narrow pad spacing, Tustin, CA, USA) ont été utilisées. La peau était préparée selon le protocole du « Surface ElectroMyoGraphy for the Non-Invasive Assessment of Muscles » (SENIAM) [30]. Les électrodes étaient maintenues en place à l'aide de collerettes adhésives. De plus, une électrode jetable de type snap-on (avec gel) Meditrace était positionnée sur l'épicondyle latéral du bras dominant. Les électrodes étaient positionnées sur les principaux muscles impliqués dans les tâches de préhension, soit (1) le fléchisseur commun superficiel des doigts/poignet ou FCD (flexor digitorum superficialis), (2) le grand palmaire ou GP (flexor carpi radialis), (3) le premier radial ou PR (extensor carpi radialis longus) et (4) l'extenseur commun des doigts ou ECD (extensor digitorum) selon la procédure de Basmajian et al. [31] (Figure 15 A et B). Les signaux EMG étaient filtrés (filtre passe-bande variant entre 12-2700 Hz et 12-3000 Hz selon l'électrode) et pré amplifiés (gain variant entre 328 et 356 selon l'électrode) à la source, numérisés avec un taux d'échantillonnage de 1000 Hz et enregistrés sur disque pour les analyses ultérieures.

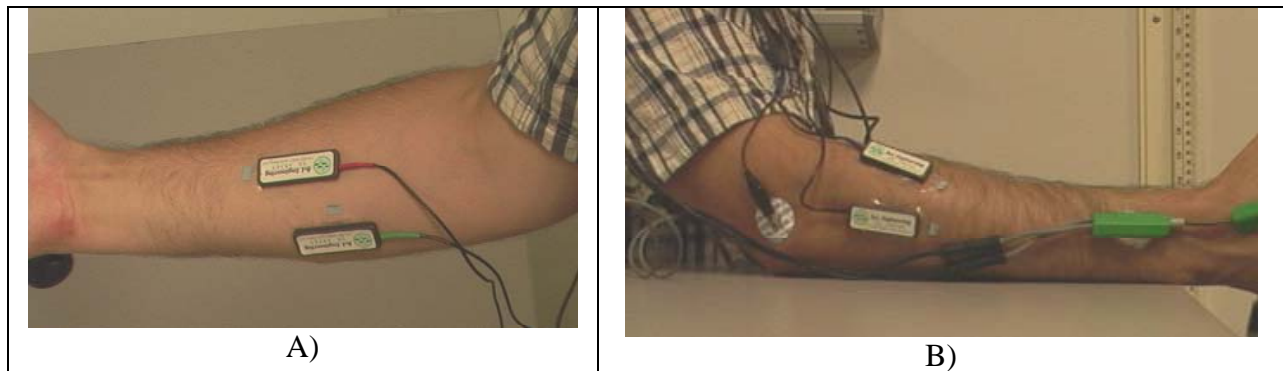


Figure 15 : Positionnement des électrodes de surface au niveau des fléchisseurs (A) et extenseurs (B) des doigts et du poignet dominant pour l'évaluation de la souplesse des gants

2.3.3.2.3 Mesures de la posture du membre supérieur

Il est important de standardiser la posture du poignet et du coude entre les sujets et entre les différents gants, de manière à assurer les mêmes longueurs musculaires et le recrutement des mêmes muscles et ainsi diminuer la variabilité des mesures EMG. Des procédures ont été établies dans ce sens et nous voulons évaluer si ces procédures ont été efficaces à l'aide de mesures cinématiques qui seront analysées a posteriori (après les sessions de mesure). Nous avons rejeté l'idée d'utiliser des électrogoniomètres afin de donner un biofeedback permettant de contrôler la posture durant les collectes de données car cela rendrait le tout trop complexe dans une perspective de mesure de normalisation.

Les angles de flexion/extension et de déviation radiale/cubitale du poignet de la main dominante ont été enregistrés à l'aide d'un électrogoniomètre bi-axial (modèle AG-65, Biometrics). La procédure pour fixer l'électrogoniomètre était conforme à celle décrite par Hansson et al. [32].

Des photographies numériques du plan sagittal de la main dominante du sujet ont été prises pour mesurer l'angle au coude. Ces photographies permettent la visualisation de marqueurs positionnés sur le poignet, le coude et l'épaule, dont les coordonnées ont été numérisées. Nous ne pouvions installer un électrogoniomètre au coude par manque d'espace sur le bras des sujets.

2.3.3.3 Procédures

Le protocole de mesure a compris, de façon séquentielle, les étapes suivantes :

1. Lecture, complétion et signature du formulaire de consentement et du questionnaire QAAP;
2. Prise des mesures anthropométriques;
3. Test d'évaluation psychophysique;
4. Positionnement des électrodes de surface et de l'électrogoniomètre;
5. Exécution de la position de référence pour l'électrogoniomètre;
6. Exécution des cinq contractions maximales volontaires (espacées d'un repos d'une minute);
7. Exécution de deux contractions en pallier sans gant;
8. Exécution de deux contractions en pallier pour chaque condition expérimentale (27 gants + 1 condition contrôle sans gant). L'ordre de présentation de ces conditions a été tiré au hasard;
9. Exécution de deux contractions en pallier sans gant.

Ce protocole comprend quatre essais à main nue (étapes 7 et 9) utilisés afin de vérifier (a posteriori) s'il y a eu apparition de fatigue musculaire au cours du protocole. Ces essais sont indépendants de la condition main nue comprise dans les vingt-huit conditions expérimentales.

Tous les sujets ont dû refaire le même protocole de mesure afin d'évaluer la fidélité test-retest des mesures EMG, et cela en utilisant le même ordre aléatoire pour les deux sessions d'évaluation afin de contrôler les effets résiduels possibles d'une condition à l'autre. Une période minimale de deux semaines d'écart entre les deux sessions de mesures était nécessaire de manière à éliminer les effets d'apprentissage sur la force de préhension (Kroll 1963) [25]. La première session de mesures a duré environ 3h30 alors que la deuxième session a duré environ 2h30.

2.3.3.4 Traitement des signaux EMG

L'amplitude RMS (Root Mean Square) du signal EMG a été calculée pour chaque fenêtre d'analyse, cette dernière se situant dans la zone cible de 35% de la force maximale (+/- 5 %). Cette valeur a ensuite été normalisée, pour chaque muscle individuellement, selon l'équation suivante :

$$TUM = \left[\frac{RMS}{RMS_{max}} \right] \times 100$$

où TUM représente le taux d'utilisation musculaire et RMS_{max} est la valeur RMS maximale recueillie à travers toutes ($n = 3$) les contractions maximales volontaires. Finalement, en plus des TUM individuels ($n = 4$ muscles), d'autres indices EMG ont aussi été créés en combinant différents muscles soit (1) les deux muscles fléchisseurs (FCD-GP), (2) les deux muscles

extenseurs (PR-ECD), (3) les deux principaux muscles antagonistes (FCD-ECD) et (4) tous les muscles. Nous avons donc huit indices EMG (4 muscles + 4 combinaisons de muscles) pour chaque condition expérimentale.

Pour détecter la présence de fatigue musculaire au cours du protocole de mesure, une analyse des signaux EMG recueillis lors des contractions en pallier (sans gant) au début et à la fin du protocole (voir section procédures, étapes 6 et 8) a été réalisée. Ainsi, en plus des TUM, des analyses spectrales (transformée en ondelettes) ont aussi été réalisées afin de calculer la fréquence moyenne instantanée (FMI) selon une procédure détaillée ailleurs [33].

À moins d'avis contraire (analyse des erreurs : fidélité test-retest et analyses bootstrap détaillées plus loin), avant d'être acheminé aux analyses statistiques, le score moyen des deux essais et deux sessions de mesures a été calculé pour chacune des variables décrites ci-haut (mesures de dynamométrie et de posture du poignet et du coude, TUM, FMI).

2.3.4 Analyses statistiques

2.3.4.1 Influence des variables confondantes associées aux procédures expérimentales

Avant de procéder aux analyses principales de l'étude (validité, fidélité test-retest), la qualité du protocole expérimental a été évaluée (ANOVA pour mesures répétées) en ce qui a trait au contrôle de (1) la force relative exercée, (2) l'extension du poignet, (3) la déviation latérale du poignet et (4) l'angle du coude entre les conditions expérimentales ($n = 28$). La possibilité qu'il y ait eu accumulation de fatigue musculaire au cours du protocole a aussi été évaluée en comparant les TUM et les FMI des conditions à main nue réalisées avant et après les vingt-huit conditions expérimentales.

2.3.4.2 Influence des variables confondantes associées aux sujets

Les variables confondantes associées aux sujets sont le genre et les caractéristiques anthropométriques. Le possible effet de genre a été évalué en réalisant des tests-t de Student pour données non paires, et cela pour chaque combinaison de muscle ($n = 8$) et chaque condition expérimentale ($n = 28$).

Afin d'évaluer le possible effet des caractéristiques anthropométriques, des corrélations de Pearson ont été calculées entre les mesures anthropométriques (largeur de la paume, longueur des doigts, circonférence de la paume, épaisseur de la paume, circonférence de la main, largeur de la main) et les TUM. Ces corrélations n'ont été réalisées que pour la condition à main nue et deux modèles de gants offrant différentes tailles afin d'éliminer l'effet confondant dû à un mauvais ajustement. Ces deux modèles, identifiés dans la section résultats, représentent aussi différents niveaux de rigidité (petit et moyen) à la lumière des résultats de l'évaluation psychophysique (section résultats : Tableau 4), de manière à évaluer le possible effet de la rigidité sur la relation entre les caractéristiques anthropométriques et les TUM. Un autre modèle de gant a aussi été sélectionné pour sa très grande rigidité. Cependant, les gants de ce type

n'offrent généralement qu'une seule grandeur, ce qui pourra faire ressortir l'effet d'un mauvais ajustement dans des conditions extrêmes, si cet effet existe.

2.3.4.3 Sensibilité à la souplesse des gants

Des analyses ont été réalisées afin d'évaluer la sensibilité des TUM à détecter des différences en ce qui a trait aux contraintes biomécaniques produites par la rigidité des matériaux utilisés dans la fabrication des gants de protection. Des ANOVA avec mesures répétées ont été réalisées pour comparer les vingt-huit conditions expérimentales, et cela pour chaque combinaison de muscles ($n = 8$). Les tests à posteriori ont été effectués avec le test de Tuckey. Il est évident que le nombre de comparaisons a posteriori est très important, ce qui est discutable d'un point de vue statistique. Toutefois, ce premier niveau d'analyse permettra de donner une idée générale des muscles ou combinaisons de muscles les plus sensibles aux différents gants.

Afin d'être plus rigoureux sur le plan statistique, une autre analyse a été réalisée afin de réduire le nombre de conditions à comparer. Pour ce faire, des regroupements ont été faits à l'aide de l'évaluation psychophysique présentée au Tableau 4 (section résultats). Ainsi, l'intervalle 0-2 de l'évaluation psychophysique constitue le premier groupe, l'intervalle 2-4 le deuxième groupe, l'intervalle 4-6 le troisième groupe, l'intervalle 6-8 le quatrième groupe et l'intervalle 8-10 le cinquième groupe. Le Tableau 3 présente la dispersion des gants à l'intérieur de ces groupes. À l'intérieur de chaque groupe, un gant offrant le meilleur ajustement (le plus nombre de grandeurs possibles) a été sélectionné (voir dernière colonne du Tableau 3), ceci afin de contrôler la possible variable confondante associée à un mauvais ajustement du gant. Une autre série d'ANOVA ($n = 8$ combinaisons de muscles) avec mesures répétées a donc été réalisée pour comparer ces cinq gants.

Tableau 3. Dispersion des gants à l'intérieur des regroupements. Les numéros de gants correspondent aux numéros affichés dans le tableau 4

Groupe	Définition selon l'évaluation psychophysique *	Numéro des gants sélectionnés †	Gant sélectionné dans le groupe (tailles disponibles)
1	0 à 2	12,15,25	12 (7,8 et 9)
2	2 à 4	11,13,14,20,23,24	14 (7,8,9 et 10)
3	4 à 6	8,9,21,22,26	21 (7,8 et 9)
4	6 à 8	3,4,5,6,7,10,18,19,27	5 (8,9 et 10)
5	8 à 10	1,2,16,17	2 (8 et 10)

* Résultats de la colonne « MOY » du Tableau 4 de la section « résultats »

† Les gants correspondants sont décrits dans le Tableau 4 de la section « résultats ».

2.3.4.4 Analyse des erreurs

De manière à mieux juger de la pertinence des mesures utilisées (choix des mesures), deux types d'analyse ont été utilisés pour évaluer l'amplitude des erreurs relatives aux taux d'utilisation

musculaire (TUM) estimés avec l'EMG ainsi que leur impact vis-à-vis de leur utilisation dans un contexte de développement de tests pour normalisation.

1) La première analyse consistait à estimer les erreurs de mesure au moyen d'une étude de la fidélité test-retest. Elle a été réalisée à l'aide de toutes les mesures (2 essais \times 2 jours) prises chez les trente sujets, et cela pour chaque condition expérimentale ($n = 28$). L'analyse de la fidélité, basée sur la théorie générale de la fidélité [34], permet non seulement d'identifier les sources de variabilités (variances inter-sujets, inter-essais, inter-jours, interactions doubles et triples), mais aussi d'estimer le nombre d'essais nécessaires pour obtenir des TUM fidèles.

Deux indices ont été utilisés pour quantifier le niveau de fidélité : le coefficient de corrélation intra-classe (CCIC) (type 2,1 [35]) et l'erreur standard de mesure (ESM). L'ESM est exprimée dans l'unité de la variable d'intérêt (% MVE) et aussi en pourcentage de la moyenne des mesures (similaire au coefficient de variation), que nous nommerons %ESM. Le CCIC et l'ESM donnent des informations complémentaires.

2) La seconde analyse était une simulation pour déterminer le nombre de sujets nécessaires pour obtenir une valeur moyenne (avec une précision donnée), pour une variable donnée, qui représentait le mieux possible la « moyenne réelle » (sans erreur) correspondant au gant à caractériser. Ainsi, dans un contexte de développement de tests pour normalisation, des analyses de type « bootstrap » ont été réalisées. Cette information est nécessaire pour élaborer une procédure d'évaluation normative pour quantifier un paramètre donné (ici, les TUM) relatif à un gant donné. Les détails de l'analyse sont détaillés dans Larivière et al. [6].

2.4 Association entre les différents critères de souplesse

Les résultats obtenus avec les méthodes de mesure de la souplesse en laboratoire, c'est-à-dire la technique Kawabata et la méthode de la double courbure, ont été corrélés (corrélations de Pearson ou Spearman, selon le cas) entre elles et avec les résultats issus des tests de perception et des tests biomécaniques (TUM).

Les TUM et les résultats de l'évaluation psychophysique ont été moyennés à travers les trente sujets afin d'obtenir un seul score pour chaque gant, pour chaque muscle et combinaisons de muscles ($n=8$). Dans le cas des mesures mécaniques, la technique de Kawabata impliquait la production de trois réplicats et pour la méthode de la double courbure, cinq gants différents étaient testés pour chaque modèle : les résultats sont exprimés en terme de moyenne réalisée sur ces mesures et d'écart-type.

3. RÉSULTATS

Cette section est séparée en quatre sous-sections, lesquelles concernent (1) la caractérisation de la résistance à la coupure et à la perforation, (2) la caractérisation de la souplesse avec des méthodes mécaniques, (3) les tests de perception et biomécaniques avec sujets humains et (4) l'étude de la corrélation entre les différents critères de souplesse.

3.1 Caractérisation de la résistance aux agresseurs mécaniques

L'ensemble des gants a été caractérisé par rapport à la résistance à la coupure et à la perforation et les résultats sont présentés au Tableau B-1 en Annexe B.

3.2 Caractérisation de la souplesse avec des méthodes mécaniques

3.2.1 Méthode Kawabata

Les résultats sont présentés dans le Tableau B-2 dans l'Annexe B pour les vingt-huit modèles de gants sélectionnés pour l'étude. Dans chaque cas, les valeurs de rigidité sont données pour les directions longitudinales et transverses, de même que les valeurs d'écart type et de coefficient de variation correspondant.

Deux modèles de gants n'ont pu être testés de manière satisfaisante : dans le cas du gant Ansell The Duke 70-982, d'épaisses coutures en X dans le centre de la paume ont complètement empêché la mesure, tandis que pour le gant Best Insulated Snowman 2950, la doublure interne trop épaisse n'a pu être incluse dans la mesure.

Les Figures 16 et 17 présentent les résultats de rigidité mesurée respectivement selon les directions longitudinale et transverse du gant sous forme d'histogrammes incluant les écarts-types.

À part quelques exceptions présentant de très grands écarts-type, la majorité des modèles de gants sont caractérisés par des valeurs de rigidité en flexion bien définies. L'ensemble des valeurs mesurées est réparti sur plus d'une décade, ce qui permet une bonne séparation des performances. On peut noter que certains gants présentent des valeurs de rigidité très similaires, par exemple les modèles Ansell Neox 9-022 et Best Neo Grab 6780-R. Dans le cas de certains modèles de gants, les valeurs de rigidité dans les sens longitudinaux et transverses sont identiques aux erreurs d'incertitude près, alors que pour d'autres gants, les valeurs peuvent différer de plus d'un facteur 2. Il est intéressant de noter que, même pour des modèles de gants fait d'élastomère pur, comme le Best Natural Rubber Latex HD® 55, c'est-à-dire un matériau isotrope, des différences importantes (jusqu'à 50%) de la valeur de la rigidité en flexion entre la direction longitudinale et transverse ont été mesurées.

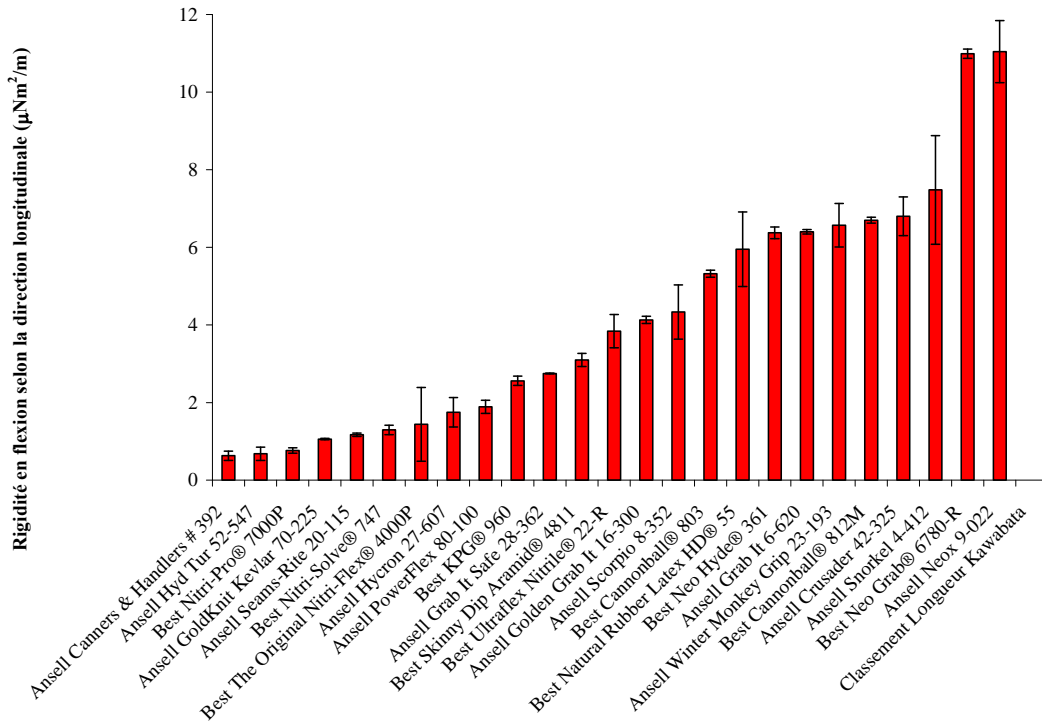


Figure 16 : Rigidité en flexion mesurée selon la direction longitudinale du gant

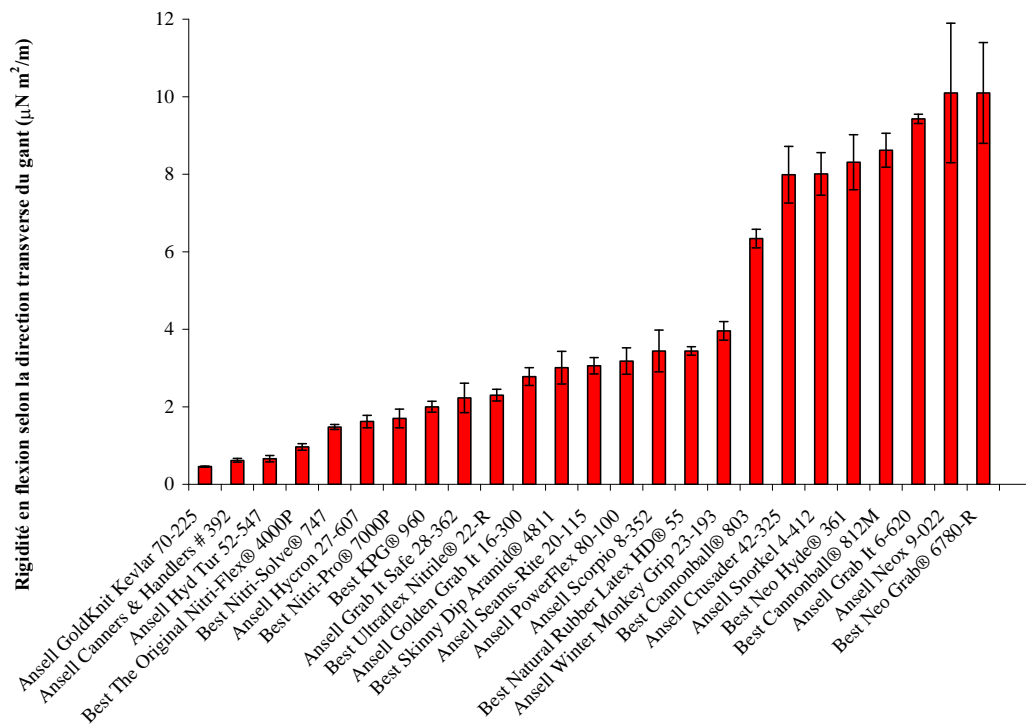


Figure 17 : Rigidité en flexion mesurée selon la direction transverse du gant

En conséquence, deux classements ont été établis pour comparer les performances en souplesse des différents modèles de gants : d'un côté, les mesures effectuées selon la direction longitudinale du gant et d'un autre côté, celles réalisées selon la direction transverse, ont été ordonnées selon une échelle de souplesse décroissante (voir Tableau B-3 dans l'Annexe B), la position 1 correspondant au gant le plus souple. Les deux modèles de gants n'ayant pu être caractérisés dans les mêmes conditions que les autres ont été exclus de ce classement : le classement s'effectue donc sur un total de vingt-six modèles de gants.

Ce classement met en évidence la difficulté à utiliser les mesures de rigidité en flexion uniaxiale pour qualifier la souplesse des gants de protection. En effet, des différences de rigidité importantes ont été mesurées selon les directions longitudinale et transverse du gant, se traduisant par des différences dans le classement allant jusqu'à 8 places sur un total de 26 modèles de gants classés. De plus, la déformation subie par le gant lors de son utilisation est très différente d'une flexion uniaxiale. Afin de vérifier si le comportement en déformation uniaxiale permet d'approximer de manière satisfaisante les déformations subies par les gants lors de leur utilisation, les classements des gants sur l'échelle de souplesse, pour les mesures prises dans les directions longitudinales et transverses, ont été comparés aux classements établis par les autres méthodes de caractérisation, en particulier le test de perception et les mesures biomécaniques (voir section 3.4).

3.2.2 Méthode de la double courbure

Les vingt-huit modèles de gants sélectionnés ont été testés selon la méthode de la double courbure. Pour dix de ces gants, la totalité de la courbe force-déformation a pu être obtenue. Dans le cas des dix-huit autres modèles, les effets combinés de la rigidité élevée, de la friction et de l'épaisseur du gant au niveau du passage de la partie cylindrique de la sonde, plus particulièrement au niveau des doigts, ont amené à un dépassement de la charge maximale de la cellule de force utilisée. Par conséquent, seuls dix modèles de gants ont pu être caractérisés en termes de force maximale et de travail total pour faire passer l'entièreté du gant à travers le trou.

3.2.2.1 Force maximale et travail total

Les résultats de force maximale et de travail total obtenus pour les dix modèles de gants sont présentés dans le Tableau B-5 dans l'Annexe B. Tant les valeurs de force maximale que celles de travail total se répartissent sur plus d'une décade pour les dix gants concernés, et à une exception près, montrent des valeurs de coefficient de variation très acceptables.

De la même façon que pour les résultats obtenus par la méthode Kawabata, ces dix modèles de gants ont été classés sur une échelle de souplesse décroissante (voir Tableau B-6 dans l'Annexe B, la position 1 correspondant au gant le plus souple) en utilisant d'une part la valeur mesurée de la force maximale et d'autre part la valeur du travail pour faire passer la totalité du gant à travers le trou : le classement obtenu est identique pour les deux paramètres, ce qui démontre la fiabilité de la méthode de la double courbure et indique que l'influence des deux facteurs parasites (friction et épaisseur au niveau de la section cylindrique de la sonde) est similaire sur les deux paramètres mesurés, la force maximale et le travail total.

3.2.2.2 Travail initial

Les courbes mesurées pour les vingt-huit modèles de gants ont permis de calculer le travail initial correspondant aux premiers 10 mm de déformation du gant. Ces résultats sont présentés dans le Tableau B-7 dans l'Annexe B qui donne également l'épaisseur du gant mesurée au niveau de la paume et ayant servi à fixer les bornes d'intégration de la force. Ils sont également présentés sur la Figure 18 sous forme d'histogramme incluant l'écart-type.

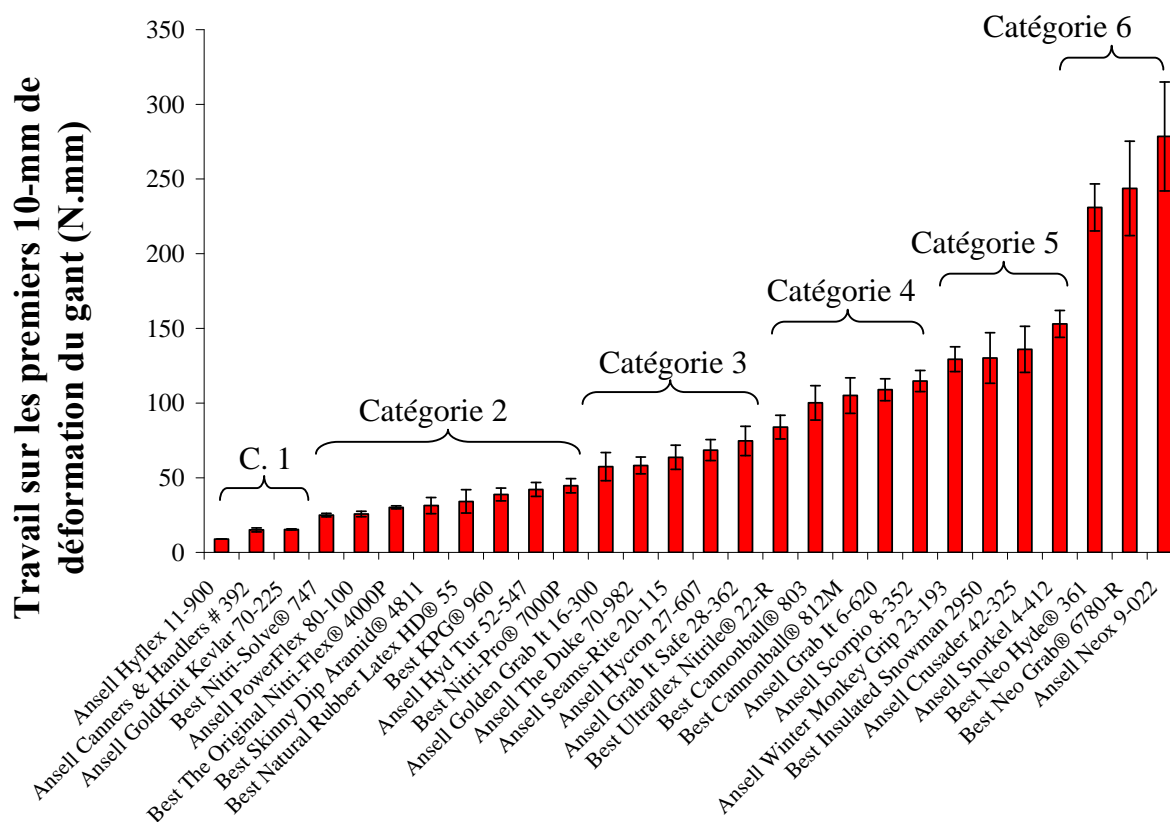


Figure 18 : Travail initial selon la méthode de la double courbure et répartition en six catégories

Les valeurs du travail initial calculé sur les premiers 10 mm de déformation du gant se répartissent sur plus d'une décade et montrent généralement des coefficients de variation inférieurs à 15%. À partir de ces valeurs, il est possible de répartir l'ensemble des vingt-huit gants mesurés en six catégories, la catégorie 1 correspondant aux gants les plus souples :

- Catégorie 1 : travail compris entre 5 et 20 N.mm
- Catégorie 2 : travail compris entre 20 et 50 N.mm
- Catégorie 3 : travail compris entre 50 et 80 N.mm
- Catégorie 4 : travail compris entre 80 et 120 N.mm
- Catégorie 5 : travail compris entre 120 et 170 N.mm
- Catégorie 6 : travail compris entre 200 et 350 N.mm.

Le Tableau B-8 dans l'Annexe B donne la répartition des gants à l'intérieur de ces six catégories, ainsi que leur classement sur l'échelle de souplesse décroissante. Cette répartition des gants en catégories offre l'avantage, par rapport à la classification sur une échelle de souplesse décroissante, de tenir compte de l'incertitude de mesure et apparaît donc comme un outil plus pratique à des fins de comparaison des performances des gants entre eux.

3.2.2.3 Comparaison entre les classements donnés par la méthode de la double courbure

La comparaison entre les classements obtenus d'une part par la force maximale et le travail total et d'autre part par le travail initial est illustrée dans le Tableau B-9 dans l'Annexe B pour les dix gants qui ont pu être mesurés dans leur totalité. La répartition des gants en catégories est également indiquée. Le Tableau B-9 dans l'Annexe B, montre que les différences de classement restent à l'intérieur des catégories déterminées par les valeurs de travail initial. Ceci indique que l'influence de la friction et de l'épaisseur des gants sur l'analyse en terme de force maximale et de travail total reste mineure par rapport à la mesure de la souplesse elle-même. Ce résultat démontre le potentiel de la méthode de la double courbure pour la caractérisation comparative de la souplesse des gants de protection.

Les différences de classement qui sont observées, en particulier au niveau de certains gants de la catégorie 2, sont attribuables à l'influence du coefficient d'adhérence des gants : par exemple, le gant Ansell PowerFlex 80-100, qui passe d'une position 5 selon le travail initial à une position 9 selon la force maximale et le travail total sur l'échelle de souplesse décroissante, est fait d'un matériau qui adhère fortement à l'aluminium, tandis que le gant Best The Original Nitri-Flex® 4000P, qui passe d'une position 6 selon le travail initial à une position 8 selon la force maximale et le travail total, possède une rugosité de surface importante créée par des canaux profonds et sans orientation préférentielle.

3.2.2.4 Effet de l'épaisseur sur le travail initial

Une analyse de l'effet de la friction sur les mesures de travail initial est réalisée par le biais de l'influence de l'épaisseur du gant. De manière à pouvoir identifier de manière plus précise l'ordre de l'effet de l'épaisseur du matériau sur la souplesse du gant de protection caractérisée par le travail initial, deux modèles ont été utilisés pour décrire le système correspondant à la mesure par la méthode de la double courbure.

Tout d'abord, le matériau du gant peut être simulé par une plaque circulaire simplement supportée (voir Figure 19) et soumise à une contrainte en son centre. Le déplacement vertical d au centre du disque s'exprime en fonction de la force F appliquée selon l'équation suivante obtenue à partir des lois de la mécanique des plaques et des coques [36]:

$$d = \frac{3F(1-\nu)a^2}{4\pi E h^3} \left[\frac{3+\nu}{1+\nu} \right]$$

Avec E le module d'Young, ν le coefficient de Poisson et h l'épaisseur du matériau. Étant donné que la souplesse est inversement proportionnelle à l'énergie de déformation, donc au travail, l'équation ci-dessus suggère que la souplesse varie avec l'inverse du cube de l'épaisseur.

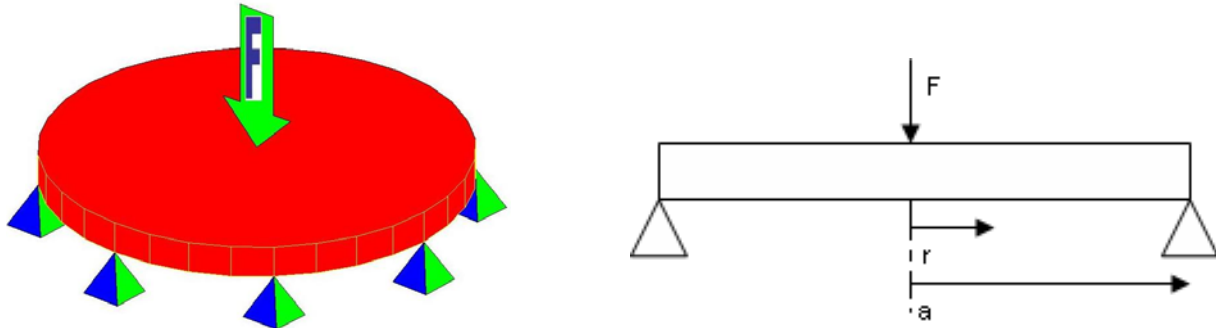


Figure 19 : Schéma du modèle de plaque circulaire simplement supportée

La Figure 20 présente la variation du travail initial mesuré par la méthode de la double courbure (inversement proportionnel à la souplesse) en fonction du cube de l'épaisseur des gants. Parmi les 28 modèles de gants mesurés, certains possèdent des compositions comparables et des épaisseurs différentes : deux modèles de gants en caoutchouc, quatre modèles de composite tricot de coton et caoutchouc nitrile, deux en composite tricot de coton et néoprène et trois en tricot de jersey enduit de PVC.

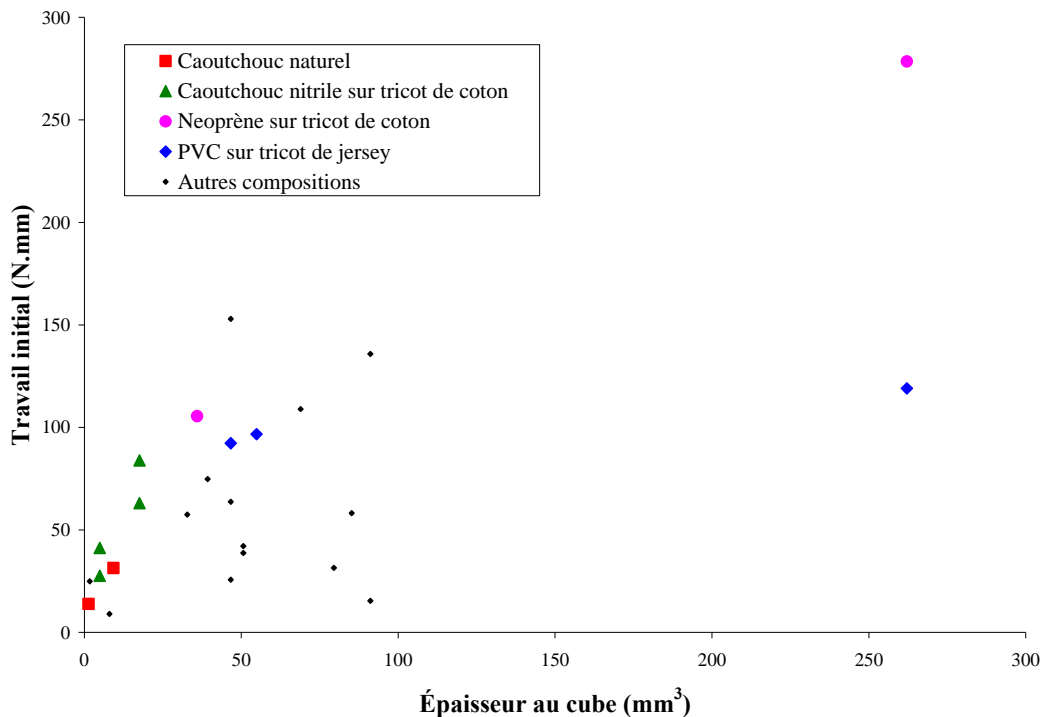


Figure 20 : Variation du travail initial (méthode de la double courbure) en fonction du cube de l'épaisseur

Aucune concordance n'est observée entre l'équation donnée par le modèle de la plaque circulaire simplement supportée et les mesures du travail initial par la méthode de la double courbure tant au niveau de l'ensemble des gants que pour les différentes compositions mises en évidence. Ceci peut s'expliquer par le fait que la théorie des plaques s'applique principalement aux matériaux rigides, alors que les gants sont faits de membranes souples.

Un deuxième modèle a été établi pour les membranes souples, mais dans une configuration encadrée. Dans le cas d'une membrane élastomère circulaire soumise à une contrainte centrale appliquée par la sonde à tête conique-sphérique, une description théorique a été établie en utilisant le formalisme de Mooney-Rivlin [37]. La force appliquée F s'exprime en fonction des rapports d'élongation λ_i par :

$$F = 4hC_1 \left[3R(1 - \lambda_0^{-6})(1 + \alpha\lambda_0^2) + \pi(R_2 - R_1)\cos\theta \left(\frac{\bar{\lambda}_1}{\lambda_2} + \frac{\bar{\lambda}_2}{\lambda_1} - \frac{2}{\lambda_1^3\lambda_2^3} + \alpha \left(2\bar{\lambda}_1\bar{\lambda}_2 - \frac{1}{\lambda_1^3\lambda_2} - \frac{1}{\lambda_2^3\lambda_1} \right) \right) \right]$$

avec h l'épaisseur de la membrane, C_1 et C_2 les constantes de Mooney-Rivlin du matériau, $\alpha = C_2/C_1$, R et λ_0 respectivement le rayon de courbure et le rapport d'élongation correspondant à la zone sphérique de la sonde et θ , R_1 , R_2 , λ_1 et λ_2 respectivement l'angle, les rayons de courbure et les rapports d'élongation de la zone conique de la sonde. Dans cette configuration, la souplesse est inversement proportionnelle à l'épaisseur du matériau.

La Figure 21 illustre la variation du travail initial mesuré par la méthode de la double courbure (inversement proportionnel à la souplesse) en fonction de l'épaisseur des gants. Dans cette figure, les différents types de compositions de gants pour lesquels des modèles d'épaisseurs différentes ont été mesurées sont identifiés. On peut voir qu'autant dans l'allure générale de la courbe que pour les différentes compositions de gants identifiées, un accord relativement satisfaisant est observé entre le modèle de la membrane circulaire encadrée en élastomère et les mesures du travail initial réalisées par la méthode de la double courbure au niveau de l'influence de l'épaisseur du gant testé. Ceci est d'autant plus appréciable que les gants identifiés avec des compositions similaires sont produits par deux compagnies différentes, et peuvent présenter des différences tant au niveau des détails de la formulation du polymère que de la qualité de la fibre textile.

Les résultats présentés à la Figure 21 montrent que le travail initial pour déformer le matériau du gant varie d'une manière relativement proportionnelle à l'épaisseur du matériau ce qui démontre que l'effet de la friction a été rendu négligeable dans la caractérisation de la souplesse des gants par la méthode de la double courbure grâce à l'analyse de la déformation initiale des gants. En effet, le phénomène de friction est indépendant du matériau testé.

La méthode de la double courbure, en particulier par le biais de son analyse en terme de travail initial, permet donc une mesure de la souplesse des gants de protection qui ne soit pas perturbée par l'influence parasite du coefficient de friction du matériau.

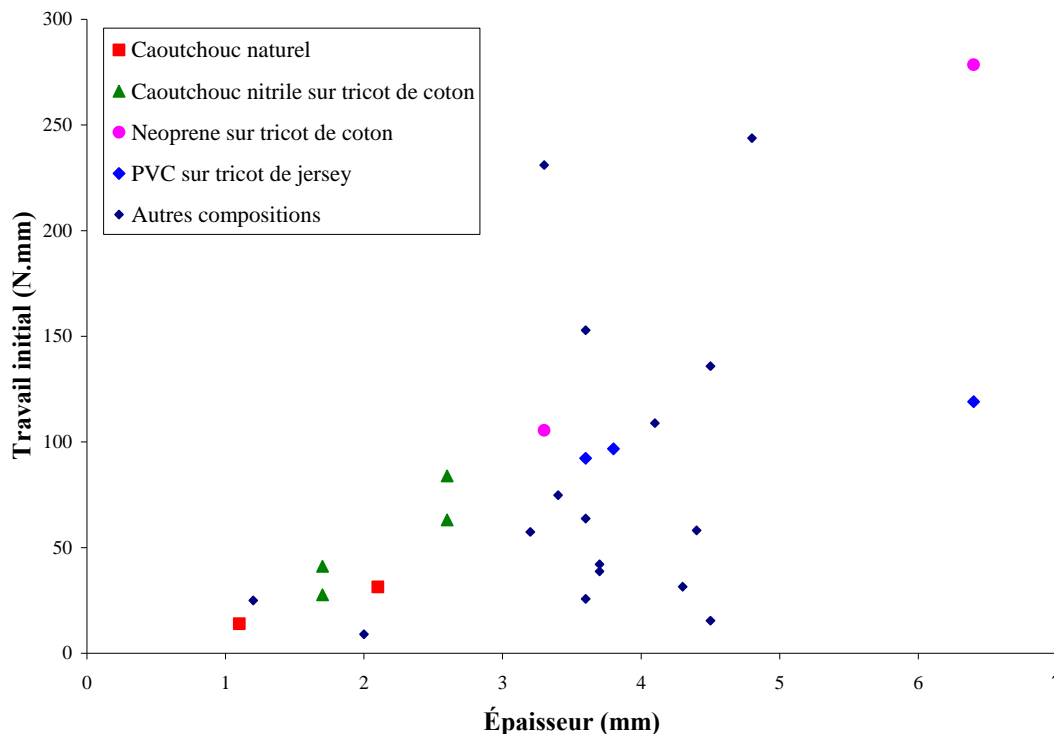


Figure 21 : Variation du travail initial (méthode de la double courbure) en fonction de l'épaisseur

3.3 Tests de perception et biomécaniques avec sujets humains

Les tests de perception et biomécaniques avec sujets humains ont été réalisés avec vingt-sept paires de gants, un des modèles de gants (modèle Best Cannonball® 803) n'étant pas disponible en nombre suffisant pour fournir un gant neuf à chaque sujet. Par contre, une condition contrôle (à main nue) a été ajoutée au protocole expérimental.

3.3.1 Test de perception

Le Tableau 4 présente les résultats des tests de perception. Ce tableau fournit des informations sur les valeurs moyennes des cotes données aux gants par les sujets, les valeurs maximales et minimales ainsi que le rang du gant parmi les vingt-sept évalués, le rang 1 étant le plus souple et le rang 27 le plus rigide.

Selon l'évaluation psychophysique des sujets, c'est le gant 15 qui est perçu comme le plus souple alors que le gant 1 serait le plus rigide (voir Tableau 4). L'analyse ANOVA s'est révélée significative et plusieurs différences significatives ont été relevées avec les tests à posteriori (Tableau C-2 en Annexe C).

Tableau 4 : Résultats des tests de perception fait avec l'échelle psychophysique 1 à 10

Gants	Compagnie	Modèle	MIN	MAX	MOY	E-T	RANG
1	Ansell	Neox 9-022	8	10	9,53	0,63	27
2	Ansell	Snorkel 4-412	6	10	8,53	1,17	24
3	Ansell	Winter Monkey Grip 23-193	3	9	6,43	1,55	16
4	Ansell	Crusader 42-325	5	9	6,9	1,42	20
5	Ansell	Grab It Safe 28-362	3	9	6,6	1,81	17
6	Ansell	Grab It 6-620	5	9	7,77	1,14	23
7	Ansell	Golden Grab It 16-300	3	9	6,87	1,53	19
8	Ansell	The Duke 70-982	2	8	4,27	1,41	10
9	Ansell	Seams-Rite 20-115	2	9	5,47	1,66	12
10	Ansell	Hycron 27-607	4	9	6,77	1,41	18
11	Ansell	Hyd Tur 52-547	1	6	3,2	1,16	6
12	Ansell	GoldKnit Kevlar 70-225	1	5	1,73	0,91	2
13	Ansell	Hyflex 11-900	1	4	2,27	1,01	4
14	Ansell	PowerFlex 80-100	1	6	3,33	1,06	7
15	Ansell	Canners & Handlers # 392	1	2	1,1	0,31	1
16	Best	Insulated Snowman 2950	2	10	8,6	1,77	25
17	Best	Neo Grab® 6780-R	7	10	9,47	0,73	26
18	Best	Neo Hyde® 361	4	10	7,5	1,43	22
19	Best	Ultraflex Nitrile® 22-R	2	10	7	1,89	21
20	Best	Natural Rubber Latex HD® 55	1	5	2,83	1,18	5
21	Best	Skinny Dip Aramid® 4811	2	8	4,67	1,47	11
22	Best	Nitri-Pro® 7000P	2	10	5,47	1,85	12
23	Best	KPG® 960	1	7	3,7	1,29	8
24	Best	The Original Nitri-Flex®	1	7	3,7	1,56	8
25	Best	Nitri-Solve® 747	1	4	1,83	0,91	3
26	Best	Cannonball® 812M	2	9	5,93	1,76	14
27	Ansell	Scorpio 8-352	1	10	6,17	2,42	15

3.3.2 Mesure du niveau d'activation musculaire

3.3.2.1 Influence des variables confondantes associées aux procédures expérimentales

3.3.2.1.1 Standardisation de la tâche

La force relative moyenne variait entre 33,9 et 34,5% FMV entre les vingt-huit conditions expérimentales (ANOVA : $P < 0,05$). Plusieurs différences ($n = 19$) ont été relevées avec les tests à posteriori mais elles ont peu de valeur sur le plan physiologique, la différence entre les deux extrémités étant seulement 0,6%.

Les angles aux poignets démontrent une déviation radiale variant entre 16° (condition 1) et 20° (condition 9) en moyenne, entre les vingt-huit conditions expérimentales (ANOVA : $P < 0,05$).

Ces deux conditions sont les seules à être significativement différentes ($P < 0,05$) d'après les tests de Tuckey, le reste des conditions expérimentales variant entre 17 et 18°.

L'extension du poignet variait entre 20° (condition 16) et 33° (condition 28 : main nue) en moyenne, entre les vingt-huit conditions expérimentales (ANOVA : $P < 0,05$). Les tests a posteriori ont révélé 11 comparaisons significativement différentes, dont sept d'entre-elles sont dues à la plus grande extension lors de la condition à main nue (Figure 22). Les conditions avec gants variaient entre 20° et 30°. Toutes ces conditions de gants correspondent à un modèle de gant qui n'avait qu'un seul choix de grandeur pour les sujets et qui était généralement trop grand. D'ailleurs, les 3 autres gants qui ont une différence significative avec les gants 16 et 1 sont des gants très ajustés et minces (gants 12, 13 et 21).

L'angle au coude a varié de façon non-significative (ANOVA : $P > 0,05$) entre 104° et 106° en moyenne entre les vingt-huit conditions expérimentales.

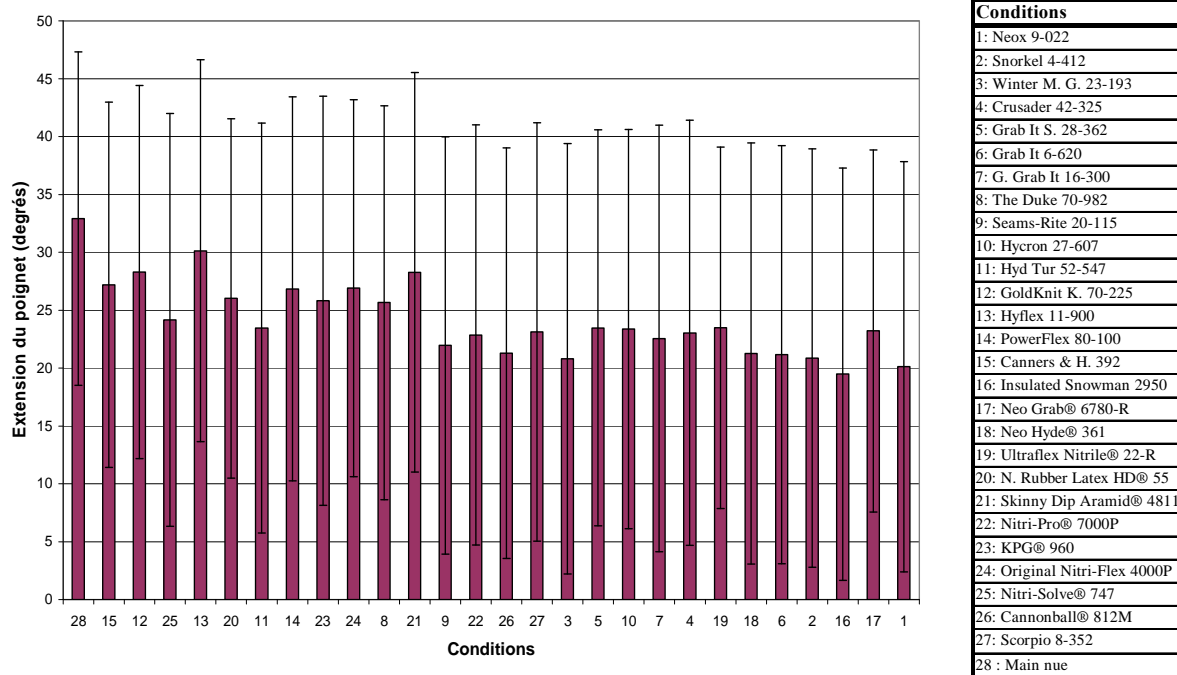


Figure 22 : Extension du poignet mesurée au poignet lors des tests biomécaniques. Les conditions de gants ont été ordonnées à la lumière du niveau de rigidité moyen (rang) obtenu avec les résultats de l'évaluation psychophysique (section résultats, Tableau 4)

3.3.2.1.2 Fatigue musculaire

Les essais à main nue réalisés au début et à la toute fin du protocole (avant et après les 28 conditions expérimentales) ont démontré une augmentation significative des TUM de trois des quatre muscles et une augmentation significative de la fréquence moyenne instantanée (FMI) d'un seul muscle, soit le premier radial (Tableau 5).

Tableau 5. Comparaison des essais de contrôle réalisés au début et à la fin du protocole

Variable	Muscle	Phase du protocole		ANOVA probabilités
		Début	Fin	
TUM (taux d'utilisation musculaire) en % MVE	FCD	17 (8)	22 (12)	0,000
	GP	21 (8)	24 (11)	0,020
	PR	29 (10)	31 (10)	0,069
	ECD	26 (8)	29 (10)	0,013
FMI (fréquence moyenne Instantanée) en Hz	FCD	119 (21)	117 (19)	0,316
	GP	128 (18)	127 (19)	0,654
	PR	142 (17)	145 (18)	0,046
	ECD	159 (16)	158 (16)	0,633

Lexique :

FCD : Fléchisseur commun superficiel des doigts/poignet

GP : Grand palmaire

PR : Premier radial

ECD : Extenseur commun des doigts

3.3.2.2 Influence des variables confondantes associées aux sujets**3.3.2.2.1 Effet du genre**

Les TUM étaient significativement (ANOVA : $P < 0,05$) plus élevés chez les femmes que chez les hommes pour les muscles FCD, GP et PR (exemple pour FCD : Figure 23). Les tests a posteriori ont confirmé cet effet systématique dans 24 des 27 conditions expérimentales ($n = 28$), dépendant du muscle, et cela même pour la condition à main nue. Les différences significatives entre les genres sont en moyenne de 10% MVE (étendue : 4 à 14 % MVE) pour les FCD, de 7% (étendue : 4 à 14 % MVE) pour le GP et de 8% MVE (étendue : 6 à 11% MVE) pour le PR. Aucune différence significative n'a été obtenue pour le muscle ECD (ANOVA : $P = 0,15$).

3.3.2.2.2 Effet des caractéristiques anthropométriques

Il n'y a aucune corrélation significative entre les mesures anthropométriques de la main et les TUM, pour la condition à main nue et pour les deux conditions de gants qui permettait un bon ajustement. Il s'agissait d'un gant de faible rigidité (gant 15 du Tableau 4 ; rang 1; grandeurs de 6 ½ à 11) et un gant de rigidité moyenne (gant 22 du Tableau 4 ; rang 12; grandeurs de 8 à 10). En fait, il y a une seule exception ($r = -0,36$; $P = 0,048$) qui a été observée dans la condition de gant souple entre la longueur de la main et le TUM du muscle FCD. Par contre, plusieurs corrélations significatives ($n = 8$) ont été obtenues dans le cas du gant de grande rigidité (gant 1 du Tableau 4 : rang 27) qui ne permettait pas un bon ajustement (grandeur 10 seulement), telles qu'exposées dans le Tableau C-4 en Annexe C. Ces corrélations semblent donc dépendre du manque d'ajustement.

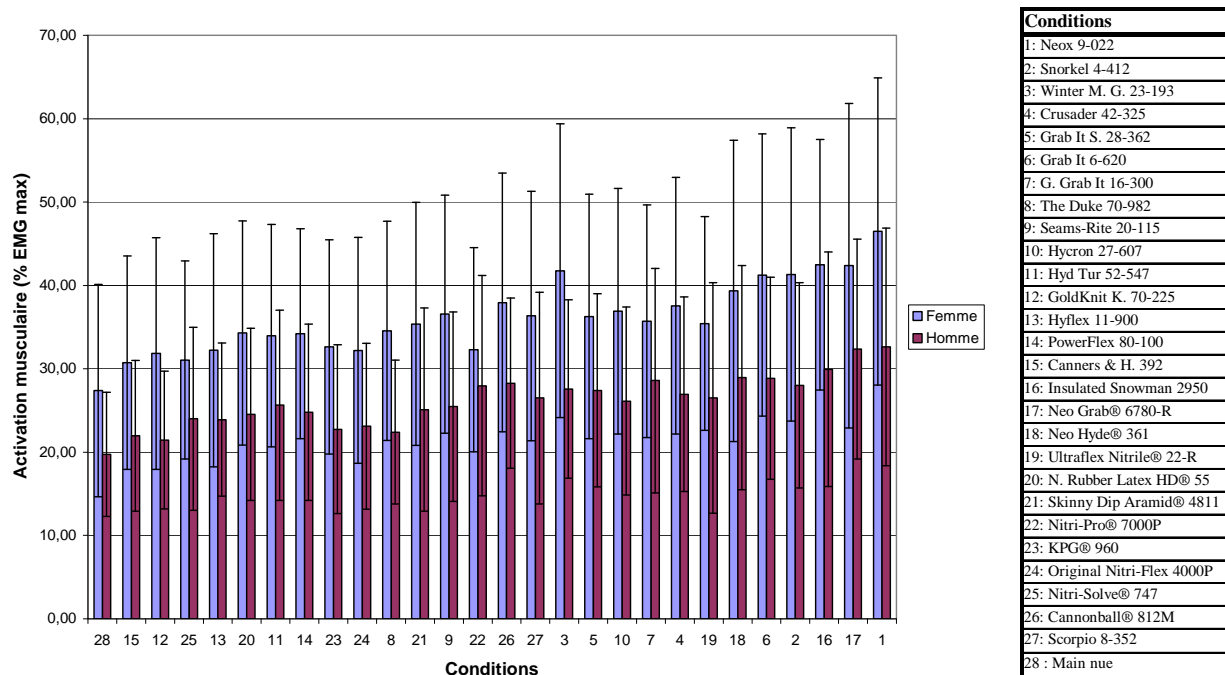


Figure 23 : Pourcentages d’activation musculaire du fléchisseur commun des doigts obtenus en fonction du sexe pour chacun des gants. Les conditions de gants ont été ordonnées à la lumière du niveau de rigidité moyen (rang) obtenu avec les résultats de l’évaluation psychophysique (Tableau 4)

3.3.2.3 Sensibilité à la souplesse des gants

Les analyses ANOVA avec mesures répétées (n = 28 conditions de gants) ont démontré que des différences significatives sont présentes pour tous les muscles et toutes les combinaisons de muscles évaluées (Tableau 6). La représentation graphique de ces résultats donnant pratiquement la même chose entre les différents muscles, un seul exemple type est illustré (Figure 24).

Les Tableaux C-5 à C-12, en Annexe C, présentent les différences significatives retrouvées entre les différentes conditions de gants qui ont été calculées à partir des tests de Tukey ($p < 0,05$). Dans ces tableaux, les conditions de gants ont été ordonnées à la lumière du niveau de rigidité (rang) obtenu avec les résultats de l’évaluation psychophysique (section résultats, Tableau 4), i.e. du moins rigide au plus rigide. Ces tableaux démontrent que, plus les groupes sont éloignés, plus le nombre de différences significatives augmente. À titre d’exemple, les gants du groupe 1 et les gants du groupe 5 sont significativement différents dans 96% des comparaisons. À l’opposé, il n’y a que 2 différences significatives sur 144 comparaisons entre les gants des groupes 1 et 2. Dans le Tableau 6 ci-dessous, le nombre de différences significatives entre les conditions de gant est rapporté pour donner un aperçu de la sensibilité des TUM. Le nombre de différences significatives varie entre 67 (ECD) et 134 (GP).

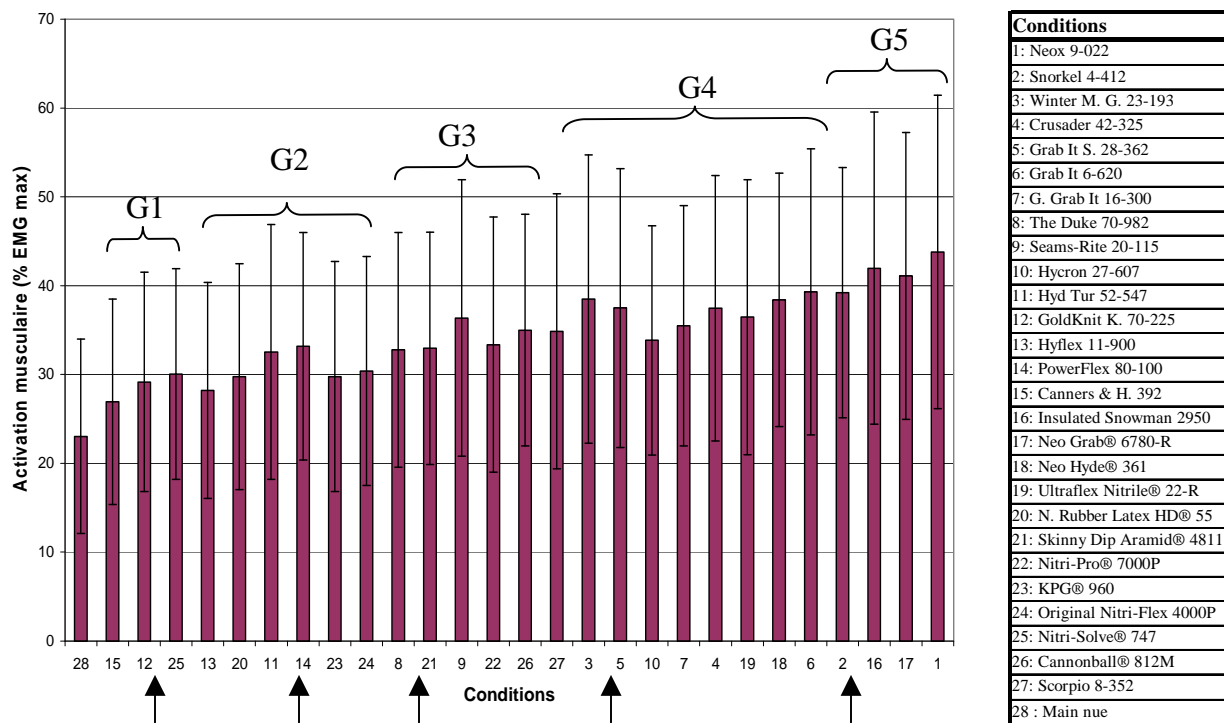


Figure 24 : Pourcentages d'activation musculaire du grand palmaire (GP) en fonction des conditions expérimentales. Les conditions de gants ont été ordonnées à la lumière du niveau de rigidité moyen (rang) obtenu avec les résultats de l'évaluation psychophysique (section résultats, Tableau 4). Les sous-groupes de gants (G1 à G5, selon l'évaluation psychophysique) sont identifiés. Les flèches identifient le gant sélectionné dans chacun de ces cinq sous-groupes pour réaliser des analyses plus spécifiques (gants 12, 14, 21, 5 et 2).

Tableau 6. Synthèse des résultats statistiques portant sur la comparaison des taux d'utilisation musculaires (TUM) entre les différentes conditions de gants (n = 28)

Muscles ^a	Étendue des TUM ^b (% MVE)	ANOVA Probabilité	Tests à posteriori ^c Nombre de différences
FCD	20 - 37	0,000	80
GP	23 - 44	0,000	134
PR	31 - 47	0,000	68
ECD	29 - 46	0,000	67
FCD-GP	22 - 41	0,000	125
PR-ECD	30 - 46	0,000	111
FCD-ECD	24 - 41	0,000	106
Moy4	26 - 43	0,000	126

^a FCD : Fléchisseur commun des doigts; GP : Grand palmaire; PR : Premier radial; ECD : Extenseur commun des doigts; Moy4 : moyenne des scores des quatre muscles. ^b Étendue des TUM à travers les 28 conditions de gants; ^c Le nombre de différences significatives entre les conditions de gant a été compté pour donner un aperçu de la sensibilité des TUM à détecter des différences (voir les tableaux C-5 à C-12 à l'Annexe C pour plus de détails).

Des ANOVA ont aussi été menées pour comparer cinq gants sélectionnés dans cinq sous-groupes de gants classés selon l'évaluation psychophysique. Avant de décrire ces résultats, il est important d'observer qu'à l'intérieur de chaque sous-groupe constitué de 3 à 9 gants, très peu de différences significatives ont été observées (Annexe C : Tableaux C-5 à C-12). Cela montre l'homogénéité des gants, à l'intérieur de chaque sous-groupe, en ce qui concerne leur rigidité. Cela supporte aussi notre démarche de retenir, de façon semi-arbitraire (de préférence, des modèles permettant un bon ajustement), un seul gant par sous-groupe tel que décrit dans la section statistique. Les résultats correspondants étaient tous significatifs en ce qui concerne les ANOVA (Tableau 7) avec un effet similaire à ce qui est illustré à la Figure 24 (dans cette figure, les gants en question sont identifiés par des flèches). Les tests à posteriori ont révélé qu'il n'était pas possible d'obtenir des différences significatives entre les groupes de gants voisins. GP, FCD-GP et Moy4 démontrent le plus de sensibilité avec quatre différences significative, toutes ces différences impliquant le groupe 5 (gant très rigide).

Tableau 7. Synthèse des résultats statistiques portant sur la comparaison des taux d'utilisation musculaires (TUM) entre les différentes conditions de gants (n = 5 gants sélectionnés selon leur niveau de rigidité)

Muscles ^a	ANOVA	Tests a posteriori ^c
	Probabilité	Identification des groupes différents
FCD	0,000	G1 < G4 et G5; G2 < G5
GP	0,000	G1 < G4 et G5; G2 < G5; G3 < G5
PR	0,007	G1 < G4 et G5
ECD	0,007	G1 < G4 et G5
FCD-GP	0,000	G1 < G4 et G5; G2 < G5; G3 < G5
PR-ECD	0,000	G1 < G4 et G5
FCD-ECD	0,000	G1 < G4 et G5; G2 < G5
Moy4	0,000	G1 < G4 et G5; G2 < G5; G3 < G5

^a FCD : Fléchisseur commun des doigts; GP : Grand palmaire; PR : Premier radial; ECD : Extenseur commun des doigts; Moy4 : moyenne des scores des quatre muscles. ^b Étendue des TUM à travers les 28 conditions expérimentales; ^c Seulement les groupes pour lesquels des différences significatives ont été obtenues sont identifiés.

3.3.2.4 Fidélité test-retest (activation musculaire et posture)

L'étude de fidélité démontre d'abord que les sujets ont répété la même FMV entre les deux sessions (CCIC : 0,97; ESM : 5 % MVE; %ESM : 7%).

Les différentes proportions de variance correspondant aux TUM des 8 muscles ou combinaisons de muscles montrent que la variance se situe au niveau du Sujet, de l'interaction Sujet×Jour et de l'interaction Sujet×Essai×Jour (Tableau 8).

Tableau 8 : Sources de variance (moyenne (écart-type)^a), exprimées en pourcentage (%) de la variance totale, pour chaque terme des ANOVA utilisées pour effectuer les analyses de fidélité

Muscle ^b	Sources de variance						
	Sujet (S)	Essai (E)	Jour (J)	S×E	S×J	E×J	S×E×J
FCD	34 (10)	0 (0)	1 (2)	1 (1)	49 (11)	0 (1)	15 (5)
GP	48 (6)	0 (0)	2 (2)	1 (2)	36 (7)	0 (1)	14 (5)
PR	43 (8)	0 (0)	1 (2)	1 (1)	46 (8)	0 (0)	9 (3)
ECD	52 (11)	0 (0)	0 (1)	2 (2)	38 (11)	0 (0)	8 (3)
FCD-GP	42 (8)	0 (0)	2 (2)	1 (2)	41 (9)	0 (1)	14 (5)
PR-ECD	49 (7)	0 (0)	0 (0)	1 (1)	41 (6)	0 (0)	8 (3)
FCD-ECD	45 (7)	0 (0)	0 (1)	1 (1)	43 (7)	0 (0)	10 (4)
Moy4	46 (6)	0 (0)	1 (2)	1 (1)	42 (8)	0 (0)	10 (3)

^a Chaque source de variance a été calculée pour chaque condition expérimentale (n = 28) alors seules les moyennes et écart-types correspondant à l'ensemble des gants sont rapportées; ^b FCD : Fléchisseur commun des doigts; GP : Grand palmaire; PR : Premier radial; ECD : Extenseur commun des doigts; Moy4 : moyenne des scores des quatre muscles

Les figures de l'Annexe C-13 montrent les indices de fidélité (CCIC, ESM, %ESM) estimés en fonction des différentes stratégies de mesures impliquant de 2 à 10 essais et de 1 à 3 jours, et cela pour chaque muscle ou combinaisons de muscles. Ces figures démontrent que la mesure de plusieurs essais n'apparaît pas très efficace pour améliorer la fidélité. Au contraire, faire la moyenne des mesures prises à des jours différents produit une amélioration considérable de la fidélité. Cependant, même si nous ne considérons que les combinaisons de muscles les plus prometteuses au point de vue de la fidélité (PR-ECD et Moy4), il faudrait cumuler 3 jours de mesure pour obtenir une excellente fidélité (CCIC > 0,75 et %ESM < 10%).

Les écart-types des figures de l'Annexe C-13 montrent que la fidélité varie en fonction des conditions expérimentales. Afin de voir si la fidélité varie en fonction de la rigidité des gants, les courbes ont été refaites mais en fonction de 5 catégories de rigidité (0-2, 2-4, 4-6, 6-8, 8-10) telles que définies avec l'échelle de psychophysique (cotes moyennes à travers les 30 sujets). Les résultats, exprimés graphiquement à l'Annexe C-14 (combinaison PR-ECD), suggèrent une moins bonne fidélité avec des gants plus rigides. Afin de mieux quantifier ce phénomène, des corrélations ont été réalisées (n = 28 gants) entre la cote moyenne de l'échelle psychophysique et les indices de fidélité (CCIC, ESM ou %ESM) obtenus chez les 30 sujets, et cela pour chaque muscle (n = 8). En résumé, des corrélations significatives ont été obtenues surtout avec l'indice ESM (dans 7/8 combinaisons de muscles; r entre 0,40 et 0,80), contrairement aux indices CCIC et %ESM (2/8 dans chaque cas). Les ESM augmentent donc (moins bonne fidélité) en fonction de la rigidité des gants, ce qui appuie ce qui est observé graphiquement.

3.3.2.5 Analyses Bootstrap

Étant donné que les TUM sont systématiquement différents entre les hommes et les femmes, et cela pour tous les muscles et toutes les conditions expérimentales, des analyses bootstrap ont été réalisées en fonction de trois scénarios, i.e. en utilisant un échantillon constitué (1) d'hommes seulement, (2) de femmes seulement et (3) d'hommes et de femmes (sélectionnés en nombre égal). Les analyses ont aussi été menées avec deux types de stratégies de mesures. La première

stratégie consistait à prendre, pour chaque sujet, le score moyen des 2 essais du jour 1 alors que la deuxième stratégie consistait à prendre le score moyen des 2 essais et des 2 jours (4 essais en tout, mais répartis sur 2 jours). Il s'agit en fait de deux approches qui pourraient être prises pour recueillir les données, mais dont la fidélité diffère, comme démontré précédemment.

Le tableau sommaire des résultats (Tableau 9) présente le nombre de sujets nécessaires pour obtenir une moyenne dont la précision est inférieure à un critère donné (2 critères ont été évalués : 10 et 20%). Le tableau permet de voir les variations en nombre de sujets, dépendant de la stratégie de mesure, du genre, du muscle, et du critère de précision exigé. Il s'agit en fait des statistiques descriptives (moyenne, écart-types) permettant de résumer les analyses individuelles réalisées à travers les 28 conditions.

Tableau 9 : Résultats sommaires (moyennes et écart-types correspondant aux 28 conditions expérimentales) des analyses bootstrap permettant d'estimer le nombre de sujets requis pour obtenir une mesure moyenne du TUM avec un niveau de précision donné.

Stratégie ^a de mesure	Genre ^b	CV ^c	Muscle ou combinaison de muscle							Moy4
			FCD	GP	PR	ECD	FCD- GP	PR- ECD	FCD- ECD	
1	H	10	14 (3)	10 (3)	12 (2)	12 (2)	9 (3)	9 (1)	10 (2)	7 (1)
	F	10	13 (2)	13 (3)	10 (1)	14 (2)	11 (2)	9 (1)	12 (1)	9 (1)
	H + F	10	16 (2)	14 (3)	14 (3)	15 (3)	13 (3)	12 (3)	14 (3)	11 (3)
2	H	10	14 (2)	10 (2)	12 (1)	12 (1)	10 (2)	10 (1)	10 (2)	7 (2)
	F	10	13 (2)	12 (3)	10 (1)	14 (1)	11 (2)	8 (3)	11 (1)	9 (1)
	H + F	10	16 (0)	14 (1)	14 (1)	14 (2)	14 (1)	11 (2)	13 (1)	10 (1)
1	H	20	4 (3)	3 (2)	5 (1)	5 (2)	3 (2)	3 (2)	3 (2)	2 (2)
	F	20	6 (1)	5 (1)	2 (3)	7 (1)	5 (1)	3 (2)	5 (1)	4 (1)
	H + F	20	7 (3)	5 (2)	4 (2)	7 (2)	5 (3)	5 (3)	6 (3)	4 (2)
2	H	20	7 (1)	4 (1)	2 (2)	5 (2)	4 (1)	2 (2)	3 (2)	2 (2)
	F	20	4 (3)	3 (3)	2 (2)	4 (2)	2 (2)	1 (0)	1 (2)	1 (0)
	H + F	20	7 (2)	4 (1)	6 (1)	7 (1)	4 (1)	5 (2)	5 (2)	3 (2)

^a Le TUM moyen pour chaque sujet est constitué de la moyenne des 2 essais réalisés au jour 1 (Stratégie #1) ou de la moyenne de 2 essais réalisés lors des 2 jours i.e. 4 essais répartis sur deux jours (Stratégie #2)

^b Genre : H = homme; F = femme

^c CV : coefficient de variation (%) utilisé comme critère de précision voulue dans la mesure

Les meilleurs résultats sont obtenus pour les combinaisons de muscles PR-ECD et Moy4, comme pour les analyses de fidélité. Les résultats sont comparables entre les hommes et les femmes. Cependant, lorsque les deux genres sont considérés en même temps, plus de sujets sont nécessaires. Les résultats découlant de la stratégie de mesure considérant deux essais et deux jours ne donnent pas de meilleurs résultats par rapport à la stratégie avec deux essais réalisés dans la même session de mesure.

Considérant toutes les variations dans les résultats entre les différentes conditions expérimentales, pour les meilleures combinaisons de muscles (PR-ECD et Moy4), une stratégie de mesure impliquant deux essais (une session de mesure), et les genres traités séparément, il

faudrait au maximum 12 sujets pour obtenir une moyenne ayant une précision de 10%. Cette estimation provient des valeurs maximales observées, ce qui représente donc une estimation conservatrice.

3.4 Association entre les différents critères de souplesse

Les scores des tests mécaniques n'étant pas distribués normalement selon le test Wilk-Shapiro, des corrélations de Spearman ont été utilisées lorsque ces tests étaient impliqués. Dans les autres cas, des corrélations de Pearson sont rapportées.

3.4.1 Comparaison des résultats obtenus par les deux méthodes mécaniques

Les résultats en terme de classement obtenus d'une part par la méthode Kawabata de caractérisation de la rigidité en flexion uniaxiale, et d'autre part par la méthode de la double courbure permettant la mesure de la déformation multidirectionnelle et analysée par le biais du travail correspondant aux premiers 10 mm de déformation du gant sont rassemblés dans le Tableau B-10 dans l'Annexe B à l'intérieur des six catégories identifiées par la méthode de la double courbure. En ce qui concerne la méthode Kawabata, les classements sont donnés pour les mesures longitudinales et transverses de la rigidité des gants. Pour faciliter la comparaison, les deux modèles de gants qui n'ont pu être caractérisés de manière comparable aux autres par la méthode Kawabata ont été enlevés du classement selon la méthode de la double courbure, ce classement étant donc ici ramené à 26 gants.

On peut remarquer que les classements montrent des différences significatives, en particulier au niveau des gants des catégories 2, 3 et 4, avec des écarts de position entre les classements pouvant atteindre jusqu'à dix places. Par contre, les catégories 1, 5 et 6 montrent une assez bonne similitude dans les classements obtenus par les deux méthodes. Ces différences entre les classements par la méthode de la double courbure et la méthode Kawabata ne semblent pas être corrélées aux différences de classement obtenues entre les mesures longitudinales et transverses par la méthode Kawabata. Elles ne semblent pas non plus pouvoir être reliées au type de matériau et de construction utilisés pour la fabrication des gants, ni à la présence d'un matériau différent pour le dos du gant, sachant que seul le matériau de la paume a été mesuré par la méthode Kawabata alors que la technique de la double courbure a caractérisé les deux couches en même temps.

La Figure 25 présente les corrélations entre les classements obtenus par la méthode de la double courbure et ceux donnés par la technique Kawabata selon les directions longitudinale et transverse pour les 26 gants de protection mesurés par les deux méthodes. On observe des corrélations satisfaisantes aux deux extrémités du spectre de la souplesse. Par contre, pour les valeurs médianes, la disparité est importante. En utilisant des corrélations de Spearman entre les tests mécaniques, la méthode de double courbure est corrélée significativement avec la méthode Kawabata selon les directions longitudinale ($r = 0,85$) et transversale ($r = 0,85$) alors que la corrélation demeure comparable lorsque le score moyen des deux directions (dénomination Kawabata moyenne dans la Figure 25) est utilisé ($r = 0,86$).

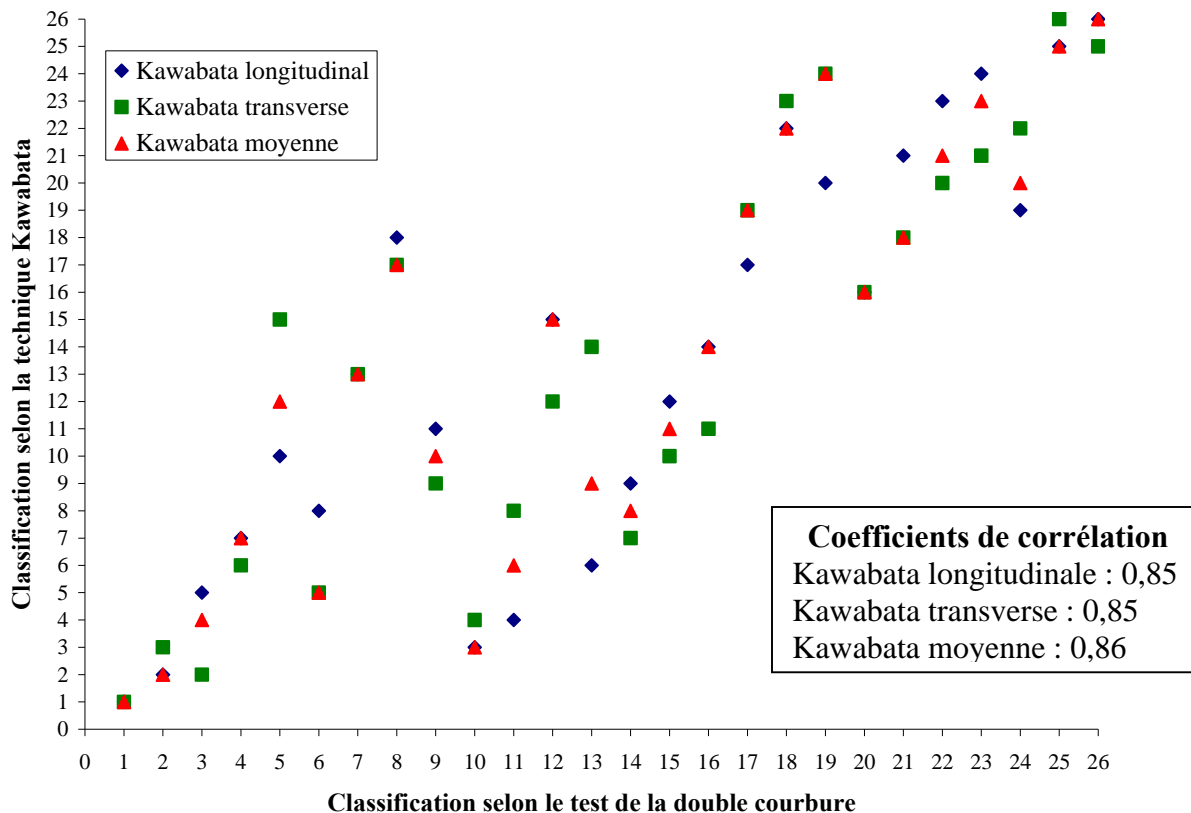


Figure 25 : Corrélation entre les classements des gants en fonction de leur souplesse selon les méthodes Kawabata et de la double courbure

3.4.2 Comparaison entre les résultats des méthodes mécaniques et des méthodes avec sujets humains

L'ensemble des résultats des corrélations est résumé dans le Tableau 10. Les corrélations de Pearson réalisées entre différentes variables du test biomécanique (n = 8 muscles et combinaisons de muscles) variaient entre 0,88 et 0,99.

Des corrélations de Spearman significatives ($P < 0,000$) ont été obtenues entre les scores moyens du test de perception et la méthode de la double courbure ($r = 0,92$), la technique de Kawabata en flexion uniaxiale selon les directions longitudinale ($r = 0,79$) et transversale ($r = 0,76$).

Les corrélations entre les résultats des tests biomécaniques (TUM), le test de perception et les trois tests mécaniques sont élevées ($P < 0,000$), variant entre 0,77 et 0,95 selon les muscles impliqués. Les corrélations les plus élevées sont obtenues avec le test de perception (0,88 à 0,95) et la méthode mécanique de double courbure (0,88 à 0,94).

Tous les nuages de points suivaient une allure linéaire avec certains cas d'exception où une allure légèrement curvilinéaire a été observée, sans pour autant justifier l'emploi de modèles non-linéaires pour caractériser le degré d'association entre les variables.

Tableau 10. Corrélations entre les résultats des tests biomécaniques (TUM), le test de perception et les trois tests mécaniques

Muscles ^a	Test de perception (corrélations de Pearson)	Tests mécaniques (corrélations de Spearman)		
		Double courbure	Kawabata - transversal	Kawabata - longitudinal
FCD	0,93	0,91	0,85	0,83
GP	0,95	0,92	0,81	0,77
PR	0,88	0,88	0,79	0,80
ECD	0,90	0,92	0,83	0,84
FCD-GP	0,95	0,92	0,86	0,83
PR-ECD	0,90	0,91	0,83	0,84
FCD-ECD	0,93	0,94	0,87	0,86
Moy4	0,93	0,94	0,85	0,85

^a FCD : Fléchisseur commun des doigts; GP : Grand palmaire; PR : Premier radial; ECD : Extenseur commun des doigts; Moy4 : moyenne des scores des quatre muscles.

4. DISCUSSION

4.1 Tests mécaniques

4.1.1 Association entre la résistance aux agresseurs mécaniques, coupure et perforation, et les mesures de souplesse

Il a déjà été mentionné dans l'introduction de ce rapport qu'il existe peu des matériaux résistants à la coupure et à la perforation simultanément. Par exemple, le gant Nitri-Solve #747 de la compagnie Best possède une bonne résistance à la perforation mais en même temps est un des moins résistants à la coupure (voir Tableau B-1). Pour cette raison, lorsqu'ils ont besoin d'une protection simultanée contre les coupures et les perforations, les travailleurs doivent parfois enfiler deux gants l'un sur l'autre, l'un résistant à la coupure et l'autre à la perforation. L'autre solution qui est utilisée est de porter des gants plus épais pour assurer une meilleure protection contre les agresseurs mécaniques, ce qui est une des raisons qui ont motivé la réalisation de cette activité de recherche. Il n'est donc pas possible d'associer simultanément ces deux propriétés des matériaux à leur souplesse. Nous pouvons par contre analyser quelques résultats individuellement par rapport aux résultats de souplesse.

Il est un fait que des gants résistants à la coupure faits en fibres de Kevlar ou de Spectra seront en même temps souples. Par exemple, le gant Gold Knit 70-225 présente une bonne résistance à la coupure et est classé dans la catégorie 1 (très souple) selon la méthode de double courbure (voir Tableau B-8). Par contre, comme il s'agit d'un gant en tricot, il n'est pas résistant à la perforation. Les gants moins souples sont ceux enduits en caoutchouc avec des doublures en coton, Kevlar ou Dynema. C'est le cas des gants Duke 70-982 et Neox 9-022 qui ont une bonne résistance à la coupure. En ce qui a trait à la souplesse, ils se classent dans la catégorie 6 pour le Neox-022 et dans la catégorie 3 pour le Duke 70-982, ce dernier ayant par ailleurs une bonne résistance à la perforation. Cependant rigidité et résistance à la coupure et à perforation ne sont pas toujours associées comme dans le cas du gant Neo Hyde #361, classé dans la catégorie 6 par rapport à la souplesse (Tableau B-8) alors que la résistance à la coupure et à la perforation sont faibles (540 g et 20,5 N respectivement, Tableau B-1). Dans le Tableau B-1 dans l'annexe B sont présentées les classifications de la souplesse des gants obtenues par les méthodes de double courbure et de perception pour faciliter la comparaison par rapport à la résistance des gants à la coupure et la perforation. Ce projet a permis de mettre en évidence le fait que la rigidité du gant n'est pas synonyme de bonne résistance aux agresseurs mécaniques.

4.1.2 Souplesse mesurée par la méthode de la double courbure

Les résultats obtenus par la méthode de la double courbure ont permis de caractériser la souplesse des gants de protection d'une manière qui reproduit les déformations multidirectionnelles subies par les gants en service. L'étude de l'effet de l'épaisseur sur la mesure du travail initial a montré que, pour un même matériau ou ensemble de matériaux constitutifs, la souplesse des gants de protection varie donc de façon inversement proportionnelle à l'épaisseur totale mesurée au centre de la paume. Ce résultat peut être rapproché des conclusions de Bensel, qui a observé une augmentation linéaire du temps de complétion des tests utilisés pour caractériser la dextérité manuelle en fonction de l'épaisseur de gants en butyle [38].

Ceci s'explique par le fait que la souplesse des gants a été identifiée comme un des trois contributeurs majeurs à la dextérité, avec l'ajustement de la taille et l'adhérence [39], sachant que les deux autres paramètres sont indépendants de l'épaisseur du gant.

4.2 Tests de perception et biomécaniques avec sujets humains

L'étude avait entre autres pour objectifs de caractériser la souplesse des gants de protection au niveau de l'interface main-gant et d'identifier, parmi les différents muscles et combinaisons de muscles investigués ($n = 8$), lesquels sont les plus prometteurs. Cependant, avant de discuter du potentiel de ce nouvel outil d'évaluation, en terme de validité et de fidélité, il est nécessaire d'évaluer si les mesures en question ont été influencées par certaines variables confondantes.

4.2.1 Évaluation de la présence de variables confondantes

Il apparaît que la plupart des variables associées à la standardisation de la tâche (force relative exercée, posture du poignet et du coude) ont été contrôlées avec succès (constantes) afin d'assurer que les TUM puissent être comparés entre les différentes conditions. Bien que certaines différences significatives se retrouvent au niveau du pourcentage de la force musculaire utilisée, ces différences sont négligeables même si elles sont significatives, car elles représentent au plus 0,6% de la force musculaire maximale. Seule l'extension du poignet présente plusieurs différences significatives qui peuvent potentiellement influencer les résultats de TUM, étant donnée l'influence de la relation tension-longueur sur l'amplitude EMG [28,40]. Ces différences semblent être associées à la taille des gants de protection. Les gants pour lesquels des différences significatives ont été observées avec la condition à main nue et quelques autres conditions expérimentales sont tous des gants n'offrant aucun ajustement (taille 10 seulement). Généralement, cette taille de gant est trop grande pour les sujets de sorte que ces derniers devaient exercer une extension du poignet pour arriver à appliquer la force requise sur le dynamomètre. Les résultats impliquant ces gants doivent donc être interprétés avec prudence.

L'évaluation EMG de la possible accumulation de fatigue musculaire au cours du protocole a démontré une hausse des TUM de trois des quatre muscles, ce qui suggère la présence de fatigue. Les résultats sont très consistants pour les TUM, car le seul muscle faisant exception a donné une forte tendance ($P = 0,069$). Cependant, le fait qu'aucune diminution de la FMI n'ait été observée exclut la possibilité de l'accumulation de déchets métaboliques à la surface des fibres musculaires, affectant la vitesse de conduction des potentiels d'action et le contenu spectral des signaux EMG. Cela indique que les périodes de repos d'une minute étaient assez longues pour permettre l'élimination de ces déchets via la circulation sanguine mais trop courtes pour rétablir l'équilibre à l'intérieur des cellules (fibres musculaires). Les principaux objectifs du présent projet de recherche étant de documenter la validité du critère et la fidélité test-retest de cet outil, un échantillon relativement grand de gants était nécessaire pour pouvoir faire des corrélations avec les autres critères de souplesse et des essais répétés devaient être réalisés pour évaluer sa fidélité. En contrepartie, il était difficile, voire impossible, d'éliminer toute présence de fatigue sans trop allonger les collectes de données. Des pauses de deux minutes de repos sont souvent utilisées lorsque des contractions répétées sont demandées et cette pratique devrait donc être instaurée à l'avenir, notamment dans un contexte plus favorable. Bien sûr, l'effort demandé pourrait être aussi diminué afin de ne solliciter que les fibres musculaires résistantes à la fatigue (type I) [40]. Cependant, l'effort augmentant avec l'utilisation de gants rigides, il devient

difficile d'assurer la sollicitation exclusive de ces fibres musculaires. En résumé, le protocole a probablement induit de la fatigue musculaire, mais cette fatigue pourrait être qualifiée de légère, comme le suggère l'augmentation moyenne des TUM entre les conditions de référence qui varient entre 3 et 5 % TUM. Heureusement, le choix des conditions expérimentales s'est fait de façon aléatoire, ce qui a permis de réaliser les comparaisons entre les gants. Cependant, ces petites variations s'ajoutent aux autres variations, ce qui peut avoir affecté à la baisse les résultats de validité (sensibilité aux conditions de gants, corrélations avec les autres critères de souplesse) ainsi que les résultats de fidélité.

L'étude a fait ressortir des différences significatives entre les genres dans pratiquement toutes les conditions expérimentales et pour tous les muscles et combinaisons de muscles, à l'exception du muscle ECD. Le premier volet de l'étude avait aussi constaté des différences significatives au niveau du genre pour un des muscles observés (GP) et une seule combinaison de muscles (FCD-GP), et des tendances pour PR ($P = 0,056$) et ECD ($P = 0,104$) [7]. Dans les deux études, le nombre de sujets était équivalent ($n = 30$). Par contre, le présent projet comportait 4 mesures (2 essais \times 2 sessions) par type de gant, permettant d'obtenir des scores moyens plus fidèles (effets sur la puissance statistique), tel que confirmé dans les présents résultats de fidélité. De plus, la tâche était différente car, dans le projet antérieur, la contraction à 35% était maintenue pendant 30 s. À notre connaissance, deux explications possibles existent. Il se peut que les différences anthropométriques entre les deux genres (grandeur de la main) impliquent des stratégies d'activation musculaire différentes car le diamètre de la poignée du dynamomètre n'est pas ajusté en fonction de la grandeur de la main du sujet. Or, les résultats de la présente étude révèlent que les TUM ne sont pas associés avec les mesures anthropométriques lorsque le gant est bien ajusté et, mieux encore, dans la condition à main nue, ce qui exclut cette hypothèse. La deuxième possibilité est qu'il y ait eu une accumulation plus marquée de fatigue musculaire chez la femme au cours du protocole. En effet, bien que l'effort demandé au sujet était de 35% FMV, la contrainte absolue (en N) entraînée par les gants de protection était la même pour tous les sujets, c'est à dire qu'elle n'était pas ajustée en fonction de la force maximale. Ainsi, cette contrainte représentait un pourcentage de la force musculaire plus important chez la femme étant donné que la force musculaire des femmes représente généralement de 55 à 80 % de celle de l'homme [28]. Par conséquent, les contraintes des gants auraient entraîné plus de fatigue musculaire, rehaussant un peu les TUM moyens dans toutes les conditions expérimentales étant donné que l'ordre des conditions était randomisé. Nous avons repris l'analyse des essais correspondant à la condition à main nue réalisée avant et après les 28 conditions expérimentales et qui étaient destinés à vérifier la présence de fatigue, mais cette fois-ci avec des ANOVA à 2 voies (2 genres \times 2 temps) avec mesures répétées sur le facteur temps. Les résultats ne se sont pas révélés concluants car les interactions étaient non-significatives, autant pour les TUM que pour les FMI. L'effet du genre sur les TUM demeure donc inexpliqué. Il serait toutefois plus clair de vérifier si ces différences demeurent lorsque le dynamomètre est ajusté en fonction de la grandeur de la main. Dans l'état actuel du protocole, il est donc nécessaire de considérer l'effet de genre lorsque l'on compare des gants de protection.

4.2.2 Sensibilité aux conditions de gants

À la lumière des différentes analyses réalisées (avec les 28 gants et avec les 5 gants sélectionnés dans les sous-groupes de rigidité), bien que plusieurs différences significatives soient présentes

entre les divers modèles de gants et ce, pour plusieurs muscles, il apparaît difficile, sinon impossible, de retrouver des différences pour des modèles de gants qui sont dans des regroupements voisins en terme de rigidité. La plupart des différences significatives se retrouvent entre des groupes éloignés. À titre d'exemple, les comparaisons entre les gants du groupe 1 (gants souples) et les gants du groupe 5 (gants rigides) sont presque toujours statistiquement différentes. Bien que ces différences démontrent que l'EMG permet de discriminer efficacement les gants en fonction de leur souplesse, elles ne sont pas toujours assez fines pour permettre des recommandations de travail, car les gants du groupe 1 ne sont pas destinés aux mêmes tâches de travail que les gants du groupe 5. Évidemment, cette conclusion dépend de la manière dont les sous-groupes de gants sont déterminés, et il n'est pas exclu que le test de perception soit un peu biaisé par d'autres variables que la souplesse car les sujets étaient en mesure de voir et palper les gants avant de les essayer et de les classer. Il est donc possible que les gants choisis n'aient pas vraiment été différents en terme de souplesse.

D'autres études ont eu de la difficulté à discriminer les gants entre eux. Une de ces études avait une condition contrôle, un gant de rigidité moyenne et un gant rigide. Or cette étude n'a pu différencier toutes ces conditions les unes des autres qu'à l'aide des TUM de l'ECD [7]. Une autre étude de Kovacs et al. a elle aussi discriminé les gants à l'aide de l'EMG et de la force maximale volontaire [15]. Cette étude a pu différencier certains gants entre eux à l'aide de la force maximale des sujets mais seulement trois sous-groupes ont pu être identifiés avec les 11 conditions considérées (10 gants et main nue). Chacun des gants à l'intérieur d'un de ces groupes était différent des gants ou de la condition à main nue des autres groupes. Les résultats non concluants obtenus avec l'EMG ne sont pas surprenants car les tests étant des tests maximaux, l'amplitude EMG était maximale dans toutes les conditions.

L'échelle psychophysique retenue pour cette étude n'était pas conventionnelle. Bien qu'à la base, l'idée de cette échelle repose sur l'échelle de Borg CR-10, elle a été adaptée afin de permettre une évaluation psychophysique plus précise de la part des sujets. Ainsi, l'échelle utilisée n'avait pas de valeur nulle (aucune contrainte), car cette valeur a été jugée équivalente à la condition main nue et elle n'était pas à évaluer par les sujets. À l'opposé, la cote 10 de l'échelle de Borg correspond à une valeur maximale ou extrême. Lors de l'évaluation des gants de protection à l'aide d'une échelle de Borg, il est peu probable qu'un sujet juge que les gants évalués vont engendrer de telles contraintes. Les sujets vont plutôt juger les contraintes à l'aide des termes qui accompagnent certaines valeurs numériques intermédiaires de l'échelle de Borg. Ces termes facilitent l'évaluation du sujet. L'échelle utilisée lors de cette étude demandait plutôt au sujet de discriminer les gants en 10 catégories. Le sujet devait obligatoirement placer un ou plus d'un gant dans les catégories 1 et 10. Cette consigne n'est pas présente dans une échelle de Borg, mais elle augmente la zone de discernement des sujets, car elle force le sujet à utiliser les 10 niveaux de l'échelle. Toute évaluation subjective comporte ses limites. Bien que les variations inter-sujets aient été minimisées, il est possible que certains d'entre eux n'aient pas reclassés les gants en fonction des autres gants au cours du processus itératif de test. De plus, les résultats de perception ont pu être influencés par un mauvais ajustement de gants. Dans un contexte où il était nécessaire de valider des protocoles sur un large éventail de gants et où la disponibilité de tailles de gants sur le marché est limitée, nous avons contrôlé au mieux cette source de variations inter-sujets. Les résultats obtenus à l'aide de cette échelle démontrent tout de même qu'elle était très adaptée afin de discriminer les différences de souplesse des matériaux entre les gants.

Présentement, le muscle le plus prometteur pour l'évaluation de la souplesse des gants de protection est le grand palmaire (voir tableau 6). Ce muscle a permis de discriminer 134 différences significatives sur 378 comparaisons entre les conditions. Les combinaisons de muscles, la moyenne des 4 muscles et la moyenne des 2 fléchisseurs (FCD-GP) sont aussi très prometteuses. Ces combinaisons ont fait ressortir respectivement 126 et 125 différences significatives. Même si les autres muscles ou combinaisons de muscles n'ont pas autant de différences significatives ($n = 67$ à 111), ils ont aussi présenté des résultats concluant à leur efficacité à discriminer les gants de protection. D'ailleurs, des différences significatives entre des gants de groupes voisins ont été rapportées pour chacun des muscles et des combinaisons. Ce sont les combinaisons moyennes des quatre muscles et FCD-GP qui ont le plus de différences significatives entre des comparaisons de gants de groupes voisins. Ces dernières sont différentes dans 9,3 % des comparaisons (12/129).

4.2.3 Évaluation des erreurs

La fidélité des TUM pourrait être qualifiée de modérée, considérant les CCIC et les %ESM, lorsqu'une seule mesure (un essai) est prise pour obtenir les TUM. En moyenne, les CCIC correspondants varient entre 0,34 et 0,52 (Tableau 8), ce qui se situe dans la plage de valeurs rapportées par d'autres études ayant estimé les TUM pour différents groupes musculaires [41,42,43]. Ce sont les combinaisons de muscles PR-ECD et Moy4 qui donnent les meilleurs résultats, mais il apparaît possible d'obtenir d'excellents résultats de fidélité ($CCIC > 0,75$; $\%ESM < 10\%$) en moyennant des mesures prises sur trois jours. En effet, les études de fidélité portant sur les mesures EMG s'entendent sur le fait qu'il faut prendre les mesures sur différents jours, nécessitant le repositionnement des électrodes, afin de rehausser la fidélité de façon substantielle [43,44]. Cette stratégie permet de prendre en compte la variabilité intersession causée par le repositionnement des électrodes et les CMV servant à calibrer les signaux EMG (EMGmax). En plus, ceci permet de prendre en compte la variabilité due à un partage différent de la charge d'une session à l'autre entre les différents muscles impliqués lors de la tâche (notion de coordination musculaire). Cependant, cette stratégie de mesure est peu pratique et coûteuse. Dans un contexte de caractérisation de gants de manière à établir un test normatif, cette variabilité apparaît être prise en compte en faisant la moyenne de plusieurs sujets pour obtenir une estimation moyenne des TUM plus stable. En effet, les résultats des analyses bootstrap démontrent qu'il n'est pas nécessaire de faire la moyenne de mesures prises sur des jours différents, car les résultats issus de la moyenne de deux essais réalisés dans une même session de mesure sont tout à fait comparables. Il apparaît donc possible de contrecarrer les effets négatifs (sur la fidélité) des variations intra et inter-sujets entre les jours (variance $S \times J$) en faisant la moyenne des scores de plusieurs sujets. Selon cette analyse, il faut un minimum de 12 sujets pour obtenir un TUM moyen ayant une bonne précision ($CV < 10\%$), si l'on retient les combinaisons de muscles les plus prometteuses (PR-ECD et Moy4).

Des corrélations significatives atteignant parfois 0,80 ont été obtenues entre les ESMs et l'appréciation subjective de la rigidité des gants, signifiant des résultats moins fidèles avec les gants plus rigides. Ce phénomène n'a été observé que pour deux muscles pour les CCIC et %ESM, ce qui apparaît logique étant donné que ces indicateurs sont en quelque sorte « normalisés » en fonction de la grandeur des résultats. Ces résultats sont préoccupants, car l'ESM représente la fidélité intrinsèque de la mesure (exprimée dans les mêmes unités), ce qui signifie que les valeurs de TUM comportent plus d'erreurs (en % EMGmax) dans ces conditions

et requièrent plus de ressources (mesures, sujets) pour donner une réponse fiable. La recommandation de douze sujets proposée dans le paragraphe précédent tient en compte ces conditions moins idéales (estimation conservatrice).

4.3 Association entre les différents critères de souplesse

Les corrélations entre les évaluations mécaniques (double courbure, Kawabata dans les deux directions, voir Figure 25) variaient entre 0,85 et 0,86, ce qui montre que des méthodes mécaniques très standardisées peuvent ne pas donner exactement les mêmes résultats. D'ailleurs, les corrélations avec le test de perception (voir Tableau 10) démontrent que la méthode de la double courbure, qui utilise des déformations multidirectionnelles, caractérise la souplesse de manière plus proche de ce que perçoivent les utilisateurs de ces gants que la technique de Kawabata, qui mesure la flexion uniaxiale. Cette supériorité de la méthode de la double courbure peut être également attribuée au fait que les deux épaisseurs du gant sont prises en compte lors de la mesure. Un dernier avantage de cette méthode, outre la simplicité de sa mise en œuvre, est qu'elle est non-destructrice.

Les corrélations entre les méthodes mécaniques et les méthodes impliquant des sujets humains (test de perception et biomécaniques) se sont révélées beaucoup plus élevées que nous avions prévu, et cela pour deux raisons. Tout d'abord, les méthodes de mesure impliquant des sujets humains sont généralement soumises à des sources de variations qui sont beaucoup plus difficiles à contrôler que pour les méthodes mécaniques car le système nerveux se laisse difficilement contraindre. Bien sûr, ces corrélations élevées peuvent en partie être attribuées aux procédures utilisées pour diminuer les effets de ces sources de variation indésirables, en faisant la moyenne de plusieurs essais (2 essais x 2 sessions = 4 mesures/ sujet dans le cas des tests biomécaniques) et plusieurs sujets ($n = 30$) pour obtenir un seul score pour chaque gant de protection. En deuxième lieu, les tests avec sujets humains ont été faits pour tenir compte de l'interface main-gant, une variable qui apparaît être importante selon ce qui est discuté dans la littérature[45, 46, 47]. Or, les corrélations relativement élevées, notamment avec le test de double courbure (r entre 0,88 et 0,94 selon le muscle), démontrent que ce facteur n'est peut-être pas si important, du moins pour des tâches similaires (préhension globale d'un objet).

Comme pour le test de perception, les tests biomécaniques se sont révélés plus associés au test de la double courbure qu'au test Kawabata, ce qui supporte une fois de plus l'emploi du test de la double courbure. En fait, à la lumière des ressources anticipées pour obtenir des mesures biomécaniques (TUM) fidèles (fidélité test-retest) et précises (analyses bootstrap), il apparaît que le test de double courbure soit la meilleure option à ce moment. Le développement de tests biomécaniques de ce type ne semble donc plus approprié, à moins que cela devienne nécessaire dans des conditions où l'interface main-gant joue un rôle plus important (ex. : tâches fines avec prises de précision). Cependant, ces tests représentent une mesure objective alternative de choix lorsque l'on veut vérifier si les facteurs humains sont importants, ce qui aura été très utile pour valider l'emploi du test de la double courbure.

Quelques facteurs peuvent expliquer la forte association entre la méthode de la double courbure et les tests de perception et biomécaniques. D'une part, elle soumet les gants à des déformations multidirectionnelles, qui simulent de manière plus réaliste les conditions d'utilisation réelles des gants, alors que la technique de Kawabata applique des flexions uniaxiales. D'autre part, elle

teste les gants dans leur intégralité, c'est-à-dire que les mesures de souplesse sont faites sur les deux épaisseurs paume et dos en même temps.

La méthode de la double courbure possède d'autres avantages qui doivent être mentionnés. Tout d'abord, elle est très simple à mettre en œuvre, c'est-à-dire que le montage constitué de la sonde et de la plaque trouée peut être utilisée avec n'importe quelle machine de traction, même de faible capacité étant donné que l'analyse se fait sur les premiers 10 mm de déformation. Conséquemment, elle ne requiert pas l'acquisition d'un appareillage coûteux. Ensuite, elle permet de caractériser une plus large gamme de gants que la technique de Kawabata, qui n'avait pas pu mesurer la rigidité de deux des gants sélectionnés en raison d'une trop grande épaisseur de la doublure et de la présence de coutures en X au mauvais endroit. Finalement, elle est non-destructrice, ce qui limite encore plus le coût des tests. Cette méthode de la double courbure, qui n'a pas besoin d'avoir recours à des sujets humains, apparaît donc un outil idéal pour les manufacturiers de gants, d'autant que la souplesse, qui agit sur la dextérité, est un des facteurs déterminants pour le choix des gants de protection. Avec ce nouvel outil qui vient combler le manque qui existait au niveau de la caractérisation de la souplesse des gants de protection, les manufacturiers auront donc les moyens de travailler à l'amélioration de la souplesse des gants, qui constitue encore souvent soit une entrave à la bonne exécution de ses tâches par le travailleur, soit une raison à la décision de ne pas porter de gants de protection.

5. Conclusions

Le but principal du présent projet était de caractériser la souplesse de vingt-huit gants de protection sélectionnés de manière à couvrir un large éventail de degrés de souplesse (plus souple au plus rigide). Deux grandes catégories de tests ont été utilisées : (1) des tests mécaniques exécutés sur bancs d'essais dont le test de la double courbure développé dans le cadre de cette étude et le test Kawabata et (2) des tests avec sujets humains (considération de l'influence possible de l'interface main-gant) dont un test de perception et un test biomécanique.

Des corrélations élevées ont été obtenues entre les critères mécaniques et les deux critères obtenus chez les sujets humains, ce qui suppose que le rôle joué par l'interface main-gant n'est pas très important, du moins pour le type de tâche étudiée ici (prise globale). Le test de la double courbure démontre les meilleures corrélations avec les tests de perception et biomécanique, comparativement au test Kawabata. Ces corrélations sont si élevées ($r > 0,88$) qu'il est possible de conclure que le test biomécanique, bien qu'étant une mesure de nature objective et apparemment mieux adaptée au facteur humain, n'est pas nécessaire pour bien caractériser la souplesse des gants. Ces résultats sont très positifs car l'emploi du test biomécanique, qui donne des estimés relativement variables, aurait requis le recrutement de plusieurs sujets ($n = 12$) pour bien caractériser un gant donné, tout en tenant compte du genre des sujets, ce qui est complexe et coûteux comme approche. Le test de la double courbure, en plus d'apporter essentiellement la même information, est beaucoup plus simple, requiert moins de ressources (moins coûteux) car moins sujet aux variations dans les mesures, et est plus sensible aux différences fines en terme de souplesse. En résumé, cette étude est la première à valider des tests mécaniques de souplesse de gants de protection avec des critères obtenus chez des sujets humains. Ils démontrent qu'il est possible de prédire les effets qu'a un gant rigide sur la fonction musculaire à partir de tests mécaniques réalisés sur des échantillons de gants.

6. Recommandations

L'étude a démontré que la méthode de la double courbure donne de bonnes corrélations avec les résultats obtenus par les méthodes biomécaniques et de perception et des efforts devraient être consacrés au niveau du comité F-23 de l'ASTM pour qu'elle soit adoptée comme une norme d'essai. Cette méthode pourrait servir aux fabricants des gants pour mettre au point des gants plus souples tout en offrant une bonne protection contre les risques mécaniques.

Bien que le protocole de recherche de la présente étude visait à normaliser le test biomécanique de caractérisation de la souplesse des matériaux des gants de protection, des analyses ergonomiques doivent être réalisées pour permettre de caractériser les contraintes d'une tâche de travail, afin de mieux cibler les gants de protection les plus propices à la protection des travailleurs. Par la suite, les gants recommandés par l'étude ergonomique pourraient être évalués à l'aide d'un test biomécanique permettant de discriminer les gants les moins contraignants pour la tâche à exécuter. Ainsi, ces résultats, combinés avec d'autres études qui cernent d'autres volets liés à la conception des gants de protection (dextérité manuelle, encombrement et les coefficients de friction) permettront la confection de gants de protection adaptés à la tâche et à l'anthropométrie des travailleurs. Plus précisément, cette étude servira à développer des gants de protection fonctionnels, souples et confortables qui protègent adéquatement les travailleurs.

ANNEXE A : DÉTAILS MÉTHODOLOGIQUES

Annexe A-1: Modèles de gants testés, épaisseur et matériaux

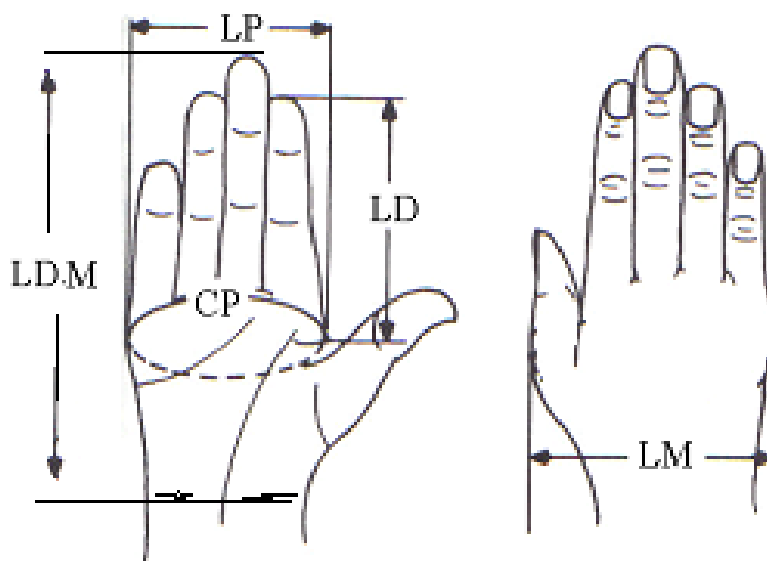
Modèle	Modèle	Épaisseur (mm)	Matériaux
Ansell	Canners & Handlers # 392	1,1	Caoutchouc naturel
Ansell	Hyflex 11-900	2,0	Mousse de nitrile sur tricot de coton
Ansell	Hycron 27-607	2,6	Nitrile sur tricot de coton
Ansell	Golden Grab It 16-300	3,2	Caoutchouc naturel et cuir sur tricot de coton
Ansell	Scorpio 8-352	3,3	Néoprène sur tricot de coton
Ansell	Grab It Safe 28-362	3,4	Caoutchouc latex naturel sur tricot de coton/kevlar
Ansell	Seams-Rite 20-115	3,6	PVC et doublure de coton
Ansell	PowerFlex 80-100	3,6	Caoutchouc naturel sur tricot de coton
Ansell	Snorkel 4-412	3,6	PVC/ nitrile sur tricot de jersey
Ansell	Hyd Tuf 52-547	3,7	Doublure en jersey, dos en coton, enduit en nitrile
Ansell	Grab It 6-620	4,1	Caoutchouc naturel sur doublure en jersey et coton
Ansell	The Duke 70-982	4,4	Tricot Safeknit CX et renforts en cuir
Ansell	Crusader 42-325	4,5	Nitrile sur isolant feutre non-tissé
Ansell	GoldKnit Kevlar 70-225	4,5	Tricot en kevlar
Ansell	Neox 9-022	6,4	Néoprène sur tricot en coton
Ansell	Winter Monkey Grip 23-193	6,4	PVC et doublure de jersey
Best	Nitri-Solve® 747	1,2	Nitrile
Best	Nitri-Pro® 7000P	1,7	Nitrile sur tricot de coton
Best	The Original Nitri-Flex® 4000P	1,7	Nitrile sur tricot de coton
Best	Natural Rubber Latex HD® 55	2,1	Caoutchouc naturel
Best	Ultraflex Nitrile® 22-R	2,6	Nitrile sur tricot de coton
Best	Neo Hyde® 361	3,3	PVC sur tricot de coton
Best	Cannonball® 803	3,6	PVC et doublure en jersey
Best	KPG® 960	3,7	PVC sur tricot de coton
Best	Cannonball® 812M	3,8	PVC sur doublure en jersey
Best	Skinny Dip Aramid® 4811	4,3	Caoutchouc naturel sur tricot kevlar aramid
Best	Neo Grab® 6780-R	4,8	Néoprène sur doublure isolante
Best	Insulated Snowman 2950	8,6	Nitrile sur doublure molletonnée



Annexe A-2. Gants de protection 1 à 15 utilisés lors des tests biomécaniques. Les gants sont classés de gauche à droite. Rangée du haut : Gants 1-2-3-4 et 5. Rangée du centre : Gants 6-7-8-9-10 Rangée du bas : Gants 11-12-13-14 et 15



Annexe A-3. Gants de protection 16 à 27 utilisés lors des tests biomécaniques. Les gants sont classés de gauche à droite. Rangée du haut : Gants 16-17-18-19 et 20. Rangée du centre : Gants 21-22-23-24 et 25. Rangée du bas : Gants 26 et 27.



Annexe A-4. Dimension anthropométrique recueillie lors du premier volet. Largeur de la paume (LP), longueur des doigts (LD) circonférence de la paume (CP), longueur de la main (LDM) et largeur de la main (LM) (adapté de Chaffin [40]).

ANNEXE B : RÉSULTATS DES TESTS MÉCANIQUES

Annexe B-1 : Résultats des tests de résistance à coupure et à la perforation et classement de souplesse selon les tests de double courbure (B-8) et de perception (Tableau 4)

Compagnie	Modèle	Résistance à la coupure/R ²	Résistance à la perforation (N)/σ	Classement		
				de B-8	Du tab. 4	
Best	Snowman 2950	890 g/0,733	33,17/8,19	C5/23	25	
	Néoprène 6780R	920 g/0,653	18,19/1,58	C6/27	26	
	Neo Hyde # 361	540 g/0,942	20,45/1,37	C6/26	22	
	UltraFlex Nitrile 22R	435 g/0,955	27,83/2,42	C4/17	21	
	Natural Rubber # 55	270 g/0,950	23,52/2,86	C2/8	5	
	Skinny Dip # 4811	860 g/0,731	13,62/6,78	C2/7	11	
	Nitri-Pro 7000	640 g/0,652	24,10/2,46	C2/11	12	
	KPG 960L	265 g/0,478	5,34/1,95	C2/9	8	
	Nitri-Flex 4000	300 g/0,876	22,53/3,14	C2/6	8	
	Nitri-Solve #747	110 g/0,955	46,63/3,10	C2/4	3	
	Cannoball 803	450 g/0,820	17,68/3,6	C4/18	-	
	Cannoball 812	450 g/0,820	17,68/3,6	C4/19	14	
	Ansell	# 392	80 g/0,982	11,21/0,61	C1/2	1
		Power-Flex 80-100	560 g/0,850	7,13/1,18	C2/5	7
Hyflex 11-900		190 g/0,725	8,57/1,23	C1/1	4	
Hyd-Tur 52-547		350 g/0,848	15,92/3,11	C2/10	6	
Hycron 27-607		730 g/0,897	14,66/3,09	C3/15	18	
Seams-Rite 20-115		520 g/0,835	17,87/3,26	C3/14	12	
DUKE 70-982		2060 g/0,573	112,89/7,84	C3/13	10	
Grab-it 6-620		940 g/0,908	20,73/4,70	C4/20	23	
Golden Grab-it 16-300		720 g/0,941	11,63/3,53	C3/12	19	
Grab-it Safe 28-362		1125 g/0,708	13,61/3,89	C3/16	17	
Crusader Flex 42-325		925 g/0,938	21,35/10,85	C5/24	20	
Winter Monkey Grip 23-193		530 g/0,918	19,71/1,48	C5/22	16	
Snorkel PVC 4-412		720 g/0,879	21,58/2,63	C5/25	24	
Neox 9-022		1650 g/0,920	34,95/2,46	C6/28	27	
GoldKnit 70-225	1180 g/0,833	-	C1/3	2		
Scorpio 8-352	620 g/0,830	30,48/1,93	C4/21	15		

Annexe B-2 : Rigidité en flexion des gants selon la méthode Kawabata

Modèle	sens	Rigidité en flexion ($\mu\text{N m}^2/\text{m}$)	Écart-Type ($\mu\text{N m}^2/\text{m}$)	CV (%)
Ansell Neox 9-022	longueur	11,00	1,00	9,2
	largeur	10,10	1,80	17,4
Ansell Snorkel 4-412	longueur	7,48	0,12	1,6
	largeur	8,01	0,55	6,9
Ansell Winter Monkey Grip 23-193	longueur	6,57	0,08	1,2
	largeur	3,96	0,24	6,0
Ansell Crusader 42-325	longueur	6,80	1,40	20,8
	largeur	7,99	0,73	9,1
Ansell Grab It Safe 28-362	longueur	2,75	0,17	6,2
	largeur	2,23	0,38	16,9
Ansell Grab It 6-620	longueur	6,40	0,56	8,8
	largeur	9,43	0,12	1,2
Ansell Golden Grab It 16- 300	longueur	4,13	0,70	16,9
	largeur	2,78	0,23	8,3
Ansell The Duke 70-982	longueur	Test impossible à effectuer car épaisses coutures en X dans le centre de la paume		
	largeur			
Ansell Seams-Rite 20-115	longueur	1,17	0,12	10,2
	largeur	3,06	0,21	6,8
Ansell Hycron 27-607	longueur	1,75	0,17	9,9
	largeur	1,62	0,16	10,1
Ansell Hyd Tur 52-547	longueur	0,68	0,07	10,5
	largeur	0,66	0,08	12,5
Ansell GoldKnit Kevlar 70-225	longueur	1,06	0,05	4,3
	largeur	0,46	0,02	3,8
Ansell Hyflex 11-900	longueur	0,41	0,12	27,8
	largeur	0,33	0,09	27,4
Ansell PowerFlex 80-100	longueur	1,89	0,12	6,2
	largeur	3,18	0,34	10,6
Ansell Canners & Handlers # 392	longueur	0,63	0,17	27,5
	largeur	0,62	0,05	8,0
Ansell Scorpio 8-352	longueur	4,33	0,09	2,1
	largeur	3,44	0,54	15,7
Best Insulated Snowman 2950 *	longueur	0,78	0,041	5,3
	largeur	1,08	0,03	2,6
Best Neo Grab® 6780-R	longueur	10,99	0,80	7,2
	largeur	10,10	1,30	12,6
Best Neo Hyde® 361	longueur	6,37	0,06	0,9
	largeur	8,31	0,71	8,6

Best Ultraflex Nitrile® 22-R	longueur	3,84	0,09	2,4
	largeur	2,30	0,15	6,3
Best Natural Rubber Latex HD® 55	longueur	5,95	0,15	2,4
	largeur	3,44	0,11	3,1
Best Skinny Dip Aramid® 4811	longueur	3,10	0,43	13,8
	largeur	3,01	0,42	13,8
Best Nitri-Pro® 7000P	longueur	0,77	0,02	2,4
	largeur	1,70	0,24	14,0
Best KPG® 960	longueur	2,56	0,01	0,4
	largeur	2,00	0,14	7,0
Best The Original Nitri-Flex® 4000P	longueur	1,44	0,38	26,5
	largeur	0,97	0,09	8,9
Best Nitri-Solve® 747	longueur	1,30	0,10	7,3
	largeur	1,48	0,06	4,3
Best Cannonball® 812M	longueur	6,70	0,50	7,4
	largeur	8,62	0,44	5,1
Best Cannonball® 803	longueur	5,32	0,96	18,1
	largeur	6,34	0,24	3,8

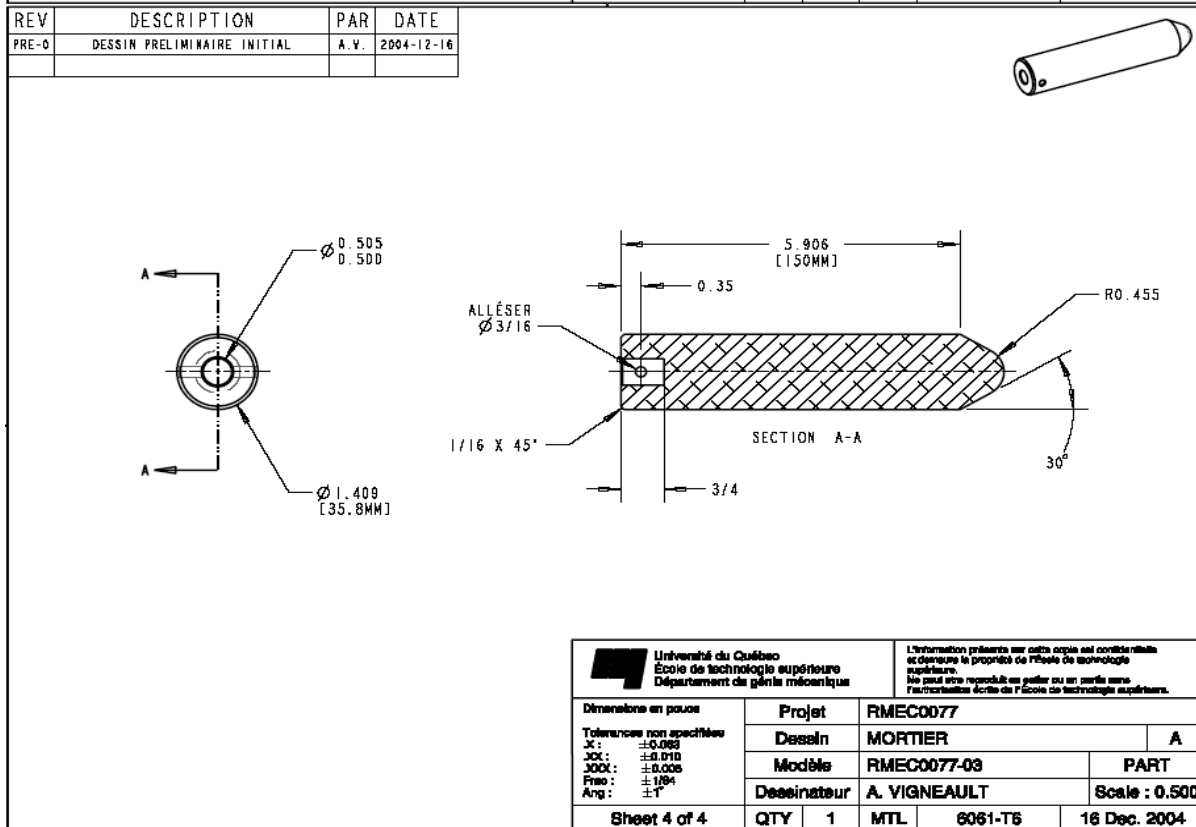
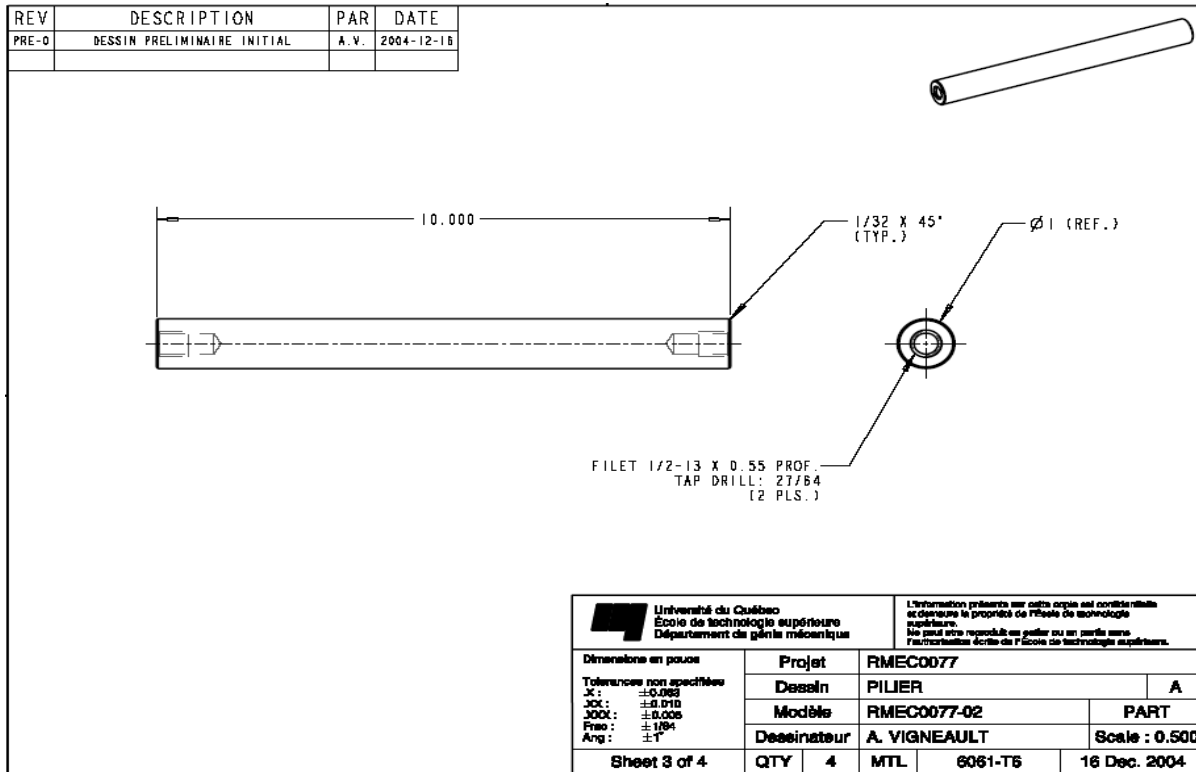
* seul le caoutchouc enduit a été testé, sans la doublure interne trop épaisse.

Annexe B-3 : Classement des gants de protection en fonction de leur souplesse (échelle de souplesse décroissante) mesurée par la méthode Kawabata

Modèle	Direction longitudinale	Direction transverse
Ansell Hyflex 11-900	1	1
Ansell Canners & Handlers # 392	2	3
Ansell Hyd Tur 52-547	3	4
Best Nitri-Pro® 7000P	4	8
Ansell GoldKnit Kevlar 70-225	5	2
Ansell Seams-Rite 20-115	6	14
Best Nitri-Solve® 747	7	6
Best The Original Nitri-Flex® 4000P	8	5
Ansell Hycron 27-607	9	7
Ansell PowerFlex 80-100	10	15
Best KPG® 960	11	9
Ansell Grab It Safe 28-362	12	10
Best Skinny Dip Aramid® 4811	13	13
Best Ultraflex Nitrile® 22-R	14	11
Ansell Golden Grab It 16-300	15	12
Ansell Scorpio 8-352	16	16
Best Cannonball® 803	17	19
Best Natural Rubber Latex HD® 55	18	17
Best Neo Hyde® 361	19	22
Ansell Grab It 6-620	20	24
Ansell Winter Monkey Grip 23-193	21	18
Best Cannonball® 812M	22	23
Ansell Crusader 42-325	23	20
Ansell Snorkel 4-412	24	21
Best Neo Grab® 6780-R	25	26
Ansell Neox 9-022	26	25
Ansell The Duke 70-982	Non classé	
Best Insulated Snowman 2950 *	Non classé	

Best Ultraflex Nitrile® 22-R	longueur	3,84	0,09	2,4
	largeur	2,30	0,15	6,3
Best Natural Rubber Latex HD® 55	longueur	5,95	0,15	2,4
	largeur	3,44	0,11	3,1
Best Skinny Dip Aramid® 4811	longueur	3,10	0,43	13,8
	largeur	3,01	0,42	13,8
Best Nitri-Pro® 7000P	longueur	0,77	0,02	2,4
	largeur	1,70	0,24	14,0
Best KPG® 960	longueur	2,56	0,01	0,4
	largeur	2,00	0,14	7,0
Best The Original Nitri-Flex® 4000P	longueur	1,44	0,38	26,5
	largeur	0,97	0,09	8,9
Best Nitri-Solve® 747	longueur	1,30	0,10	7,3
	largeur	1,48	0,06	4,3
Best Cannonball® 812M	longueur	6,70	0,50	7,4
	largeur	8,62	0,44	5,1
Best Cannonball® 803	longueur	5,32	0,96	18,1
	largeur	6,34	0,24	3,8

* seul le caoutchouc enduit a été testé, sans la doublure interne trop épaisse.



Annexe B-5 : Force maximale et travail total par la méthode de la double courbure

Modèle	Force maximale (N)	Écart-type (N)	CV (%)	Travail (N.mm)	Écart-type (N.mm)	CV (%)
Ansell Goldknit Kelvar 70-225	22,5	2,6	11,5	72	7	9,5
Ansell Hyflex 11-900	22,6	0,9	3,8	77	10	12,8
Ansell PowerFlex 80-100	267	21	8,0	1095	73	6,7
Ansell Canners & Handlers # 392	3,8	0,3	9,2	5,1	0,4	8,5
Best Natural Rubber Latex HD® 55	130	17	13,4	510	110	21,6
Best Skinny Dip Aramid® 4811	235	32	13,4	980	190	19,8
Best Nitri-Pro® 7000P	433	65	15,0	1380	520	37,0
Best KPG® 960	222	18	8,1	930	30	3,3
Best The Original Nitri-Flex® 4000P	250	22	8,8	990	120	12,0
Best Nitri-Solve® 747	51,6	2,0	3,5	220	18	8,2

**Annexe B-6 : Classement des gants sur une échelle de souplesse décroissante à partir des
mesures de la force maximale et du travail total**

Modèle	Classement selon la force maximale et le travail
Ansell Canners & Handlers # 392	1
Ansell Goldknit Kelvar 70-225	2
Ansell Hyflex 11-900	3
Best Nitri-Solve® 747	4
Best Natural Rubber Latex HD® 55	5
Best KPG® 960	6
Best Skinny Dip Aramid® 4811	7
Best The Original Nitri-Flex® 4000P	8
Ansell PowerFlex 80-100	9
Best Nitri-Pro® 7000P	10

Annexe B-7 : Travail initial et épaisseur du gant

Modèle	Épaisseur (mm)	Travail initial (N.mm)	Écart type (N.mm)	CV (%)
Ansell Canners & Handlers # 392	1,1	15,1	0,4	2,6
Best Nitri-Solve® 747	1,2	25,0	1,8	7,2
Best Nitri-Pro® 7000P	1,7	44,7	9,4	21
Best The Original Nitri-Flex® 4000P	1,7	30,1	5,5	18
Ansell Hyflex 11-900	2,0	9,0	1,4	16
Best Natural Rubber Latex HD® 55	2,1	34,1	4,3	13
Ansell Hycron 27-607	2,6	68,5	9,9	14
Best Ultraflex Nitrile® 22-R	2,6	84	12	14
Ansell Golden Grab It 16-300	3,2	57,5	5,5	10
Ansell Scorpio 8-352	3,3	115	8	7
Best Neo Hyde® 361	3,3	231	32	14
Ansell Grab It Safe 28-362	3,4	74,8	7,9	11
Ansell Seams-Rite 20-115	3,6	63,7	7,0	11
Ansell PowerFlex 80-100	3,6	25,8	1,0	4
Ansell Snorkel 4-412	3,6	159	16	10
Best Cannonball® 803	3,6	100	12	12
Ansell Hyd Tur 52-547	3,7	42,1	4,8	11
Best KPG® 960	3,7	38,7	4,6	12
Best Cannonball® 812M	3,8	105,1	7,2	6,9
Ansell Grab It 6-620	4,1	108,9	7,1	6,5
Best Skinny Dip Aramid® 4811	4,3	31,5	7,0	22
Ansell The Duke 70-982	4,4	58,2	8,2	14
Ansell Crusader 42-325	4,5	136	9	6,6
Ansell GoldKnit Kevlar 70-225	4,5	15,4	1,2	7,8
Best Neo Grab® 6780-R	4,8	244	37	15
Ansell Neox 9-022	6,4	279	25	9
Ansell Winter Monkey Grip 23-193	6,4	129	17	13
Best Insulated Snowman 2950 *	8,6	130	15	112

Annexe B-8 : Répartition de 28 gants en catégories et classification selon la valeur du travail initial

Catégorie	Modèle	Classement
1	Ansell Hyflex 11-900	1
	Ansell Canners & Handlers # 392	2
	Ansell GoldKnit Kevlar 70-225	3
2	Best Nitri-Solve® 747	4
	Ansell PowerFlex 80-100	5
	Best The Original Nitri-Flex® 4000P	6
	Best Skinny Dip Aramid® 4811	7
	Best Natural Rubber Latex HD® 55	8
	Best KPG® 960	9
	Ansell Hyd Tur 52-547	10
	Best Nitri-Pro® 7000P	11
3	Ansell Golden Grab It 16-300	12
	Ansell The Duke 70-982	13
	Ansell Seams-Rite 20-115	14
	Ansell Hycron 27-607	15
	Ansell Grab It Safe 28-362	16
4	Best Ultraflex Nitrile® 22-R	17
	Best Cannonball® 803	18
	Best Cannonball® 812M	19
	Ansell Grab It 6-620	20
	Ansell Scorpio 8-352	21
5	Ansell Winter Monkey Grip 23-193	22
	Best Insulated Snowman 2950	23
	Ansell Crusader 42-325	24
	Ansell Snorkel 4-412	25
6	Best Neo Hyde® 361	26
	Best Neo Grab® 6780-R	27
	Ansell Neox 9-022	28

Annexe B-9 : Comparaison des classements selon les paramètres utilisés pour l'analyse des mesures obtenues par la méthode de la double courbure

Modèle	Classement selon la force maximale et le travail total	Classement selon le travail initial	Catégorie
Ansell Canners & Handlers # 392	1	2	Catégorie 1
Ansell Goldknit Kelvar 70-225	2	3	
Ansell Hyflex 11-900	3	1	
Best Nitri-Solve® 747	4	4	Catégorie 2
Best Natural Rubber Latex HD® 55	5	8	
Best KPG® 960	6	9	
Best Skinny Dip Aramid® 4811	7	7	
Best The Original Nitri-Flex® 4000P	8	6	
Ansell PowerFlex 80-100	9	5	
Best Nitri-Pro® 7000P	10	11	

Annexe B-10 : Comparaison des classifications de la souplesse des gants établis par la méthode de la double courbure et par la méthode Kawabata

Catégorie	Modèle	Classement selon double courbure	Classement selon Kawabata	
			Longitudinal	Transverse
1	Ansell Hyflex 11-900	1	1	1
	Ansell Canners & Handlers # 392	2	2	3
	Ansell GoldKnit Kevlar 70-225	3	5	2
2	Best Nitri-Solve® 747	4	7	6
	Ansell PowerFlex 80-100	5	10	15
	Best The Original Nitri-Flex® 4000P	6	8	5
	Best Skinny Dip Aramid® 4811	7	13	13
	Best Natural Rubber Latex HD® 55	8	18	17
	Best KPG® 960	9	11	9
	Ansell Hyd Tur 52-547	10	3	4
	Best Nitri-Pro® 7000P	11	4	8
3	Ansell Golden Grab It 16-300	12	15	12
	Ansell Seams-Rite 20-115	13	6	14
	Ansell Hycron 27-607	14	9	7
	Ansell Grab It Safe 28-362	15	12	10
4	Best Ultraflex Nitrile® 22-R	16	14	11
	Best Cannonball® 803	17	17	19
	Best Cannonball® 812M	18	22	23
	Ansell Grab It 6-620	19	20	24
	Ansell Scorpio 8-352	20	16	16
5	Ansell Winter Monkey Grip 23-193	21	21	18
	Ansell Crusader 42-325	22	23	20
	Ansell Snorkel 4-412	23	24	21
6	Best Neo Hyde® 361	24	19	22
	Best Neo Grab® 6780-R	25	25	26
	Ansell Neox 9-022	26	26	25

ANNEXE C : RÉSULTATS DES TESTS AVEC SUJETS HUMAINS

Annexe C-3 : Résultats des tests à posteriori pour l'angle d'extension du poignet lors de la tâche (palier de 5 s à 35% FMV).

	Conditions	Groupe 1				Groupe 2				Groupe 3				Groupe 4						Groupe 5								
		28	15	12	25	13	20	11	14	23	24	8	21	9	22	26	27	3	5	10	7	4	19	18	6	2	16	17
Groupe 1	28	*												*		*							*	*	*	*	*	*
	15		*																							*		
	12			*																							*	
	25				*																							*
Groupe 2	13				*																					*	*	
	20					*																						
	11						*																					
	14							*																				
Group 3	23								*																			
	24									*																		
	8										*																	
	21											*															*	
Groupe 4	9											*																
	22												*															
	26	*												*														
	27														*													
Groupe 5	3	*																										
	5		*																									
	10			*																								
	7				*																							
	4					*																						
	19						*																					
Groupe 5	18	*																										
	6	*																										
	2	*																										
	16	*		*		*					*																	
Groupe 5	17																											
	1	*				*																						

Annexe C-4. Corrélation et valeurs p (probabilité *) entre les mesures anthropométriques de la main et les taux d'utilisation musculaire (TUM) obtenues pour la condition gant 1 (rang 27)

		Largeur de la main	Longueur de la main	Largeur de la paume	Longueur de la paume	Circonférence
FCD	corrélation	-0.33486	-0.25575	-0.3754	-0.33738	-0.30165
	probabilité	(0.0705)	(0.1725)	(0.0409)	(0.0683)	(0.1052)
GP	corrélation	-0.34296	-0.40247	-0.38035	-0.35757	-0.35093
	probabilité	(0.0635)	(0.0275)	(0.0381)	(0.0524)	(0.0572)
PR	corrélation	-0.27387	-0.23231	-0.14438	-0.23425	-0.14972
	probabilité	(0.1431)	(0.2167)	(0.4465)	(0.2128)	(0.4297)
ECD	corrélation	-0.11101	0.05545	0.02997	0.05848	-0.04608
	probabilité	(0.5592)	(0.771)	(0.8751)	(0.7589)	(0.809)
MOY 4	corrélation	-0.31881	-0.24376	-0.21004	-0.22273	-0.23738
	probabilité	(0.086)	(0.1943)	(0.2653)	(0.2368)	(0.2066)
FCD-GP	corrélation	-0.375	-0.36521	-0.41809	-0.38457	-0.36135
	probabilité	(0.0412)	(0.0472)	(0.0215)	(0.0359)	(0.0498)
PR-ECD	corrélation	-0.22553	-0.08947	-0.05866	-0.08847	-0.11335
	probabilité	(0.2308)	(0.6382)	(0.7581)	(0.642)	(0.5509)
FCD-ECD	corrélation	-0.26637	-0.11129	-0.19715	-0.15645	-0.20452
	probabilité	(0.1548)	(0.5582)	(0.2964)	(0.409)	(0.2783)

* Les probabilités < 0,05 sont identifiées en caractères gras

Annexe C-5 : Représentation des différences significatives entre les conditions pour le muscle fléchisseur commun des doigts (FCD)*

	Conditions	Groupe 1				Groupe 2					Groupe 3					Groupe 4					Groupe 5								
		28	15	12	25	13	20	11	14	23	24	8	21	9	22	26	27	3	5	10	7	4	19	18	6	2	16	17	1
Groupe 1	28											*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	15														*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	12															*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	25																*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Groupe 2	13																*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	20																*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	11																	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	14																	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	23																*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Group 3	24															*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	8															*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	21	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	9	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	22	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Groupe 4	26	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	27	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	3	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	5	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	10	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	7	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	4	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	19	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Groupe 5	18	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	6	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	2	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	16	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	17	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	1	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

Annexe C-6. Représentation des différences significatives entre les conditions pour le muscle grand palmaire (GP) *

	Conditions	Groupe 1				Groupe 2					Groupe 3					Groupe 4					Groupe 5								
		28	15	12	25	13	20	11	14	23	24	8	21	9	22	26	27	3	5	10	7	4	19	18	6	2	16	17	1
Groupe 1	28				*		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	15														*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	12														*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	25	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Groupe 2	13														*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	20														*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	11	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	14	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	23	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Group 3	24	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	8	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	21	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	9	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	22	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Groupe 4	26	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	27	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	3	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	5	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	10	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	7	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	4	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	19	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Groupe 5	18	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	6	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	2	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	16	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	17	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	1	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

* Les conditions de gants ont été ordonnées à la lumière du niveau de rigidité moyen (rang) obtenu avec les résultats de l'évaluation psychophysique (section résultats, Tableau 3), i.e. du moins rigide au plus rigide, la condition à main nue (condition 28) étant placée en premier.

Les groupes 1 à 5 correspondent à des sous-groupes aussi formés avec les sous-catégories de rigidité (0-2, 2-4, 4-6, 6-8, 8-10) obtenues avec l'évaluation psychophysique.

Annexe C-7. Représentation des différences significatives entre les conditions pour le muscle premier radial (PR) *

	Conditions	Groupe 1					Groupe 2					Groupe 3					Groupe 4					Groupe 5							
		28	15	12	25	13	20	11	14	23	24	8	21	9	22	26	27	3	5	10	7	4	19	18	6	2	16	17	1
Groupe 1	28							*	*	*			*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	15														*		*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
	12																			*	*	*	*	*	*	*	*	*	
	25																			*	*	*	*	*	*	*	*	*	
Groupe 2	13														*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
	20																			*	*	*	*	*	*	*	*	*	
	11	*																									*	*	
	14	*	*																								*	*	
	23	*	*	*																							*	*	
Group 3	24	*	*	*	*												*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
	8	*																											
	21	*	*	*																									
	9	*																											
	22	*																									*	*	
Groupe 4	26	*	*				*																				*	*	
	27	*																									*	*	
	3	*	*				*																						
	5	*	*				*																						
	10	*																											
	7	*	*																										
	4	*	*	*	*	*	*	*																			*	*	
	19	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Groupe 5	18	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
	6	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
	2	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
	16	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
	17	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
1	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*		

Annexe C-8. Représentation des différences significatives entre les conditions pour le muscle extenseur commun des doigts (ECD) *

	Conditions	Groupe 1					Groupe 2					Groupe 3					Groupe 4					Groupe 5						
		28	15	12	25	13	20	11	14	23	24	8	21	9	22	26	27	3	5	10	7	4	19	18	6	2	16	17
Groupe 1	28																											
	15																				*	*	*	*	*	*	*	*
	12																			*	*	*	*	*	*	*	*	*
	25																			*	*	*	*	*	*	*	*	*
Groupe 2	13																			*	*	*	*	*	*	*	*	*
	20																			*	*	*	*	*	*	*	*	*
	11	*																									*	*
	14	*	*																								*	*
	23	*	*	*																							*	*
Group 3	24	*	*	*	*																						*	*
	8	*																										
	21	*																									*	*
	9	*																									*	*
	22	*																									*	*
Groupe 4	26	*	*				*																				*	*
	27	*																									*	*
	3	*	*				*																					
	5	*	*				*																					
	10	*																									*	*
	7	*	*																									
	4	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	19	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Groupe 5	18	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	6	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	2	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	16	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	17	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
1	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	

* Les conditions de gants ont été ordonnées à la lumière du niveau de rigidité moyen (rang) obtenu avec les résultats de l'évaluation psychophysique (section résultats, Tableau 3), i.e. du moins rigide au plus rigide, la condition à main nue (condition 28) étant placée en premier.
 Les groupes 1 à 5 correspondent à des sous-groupes aussi formés avec les sous-catégories de rigidité (0-2, 2-4, 4-6, 6-8, 8-10) obtenues avec l'évaluation psychophysique.

Annexe C-9. Représentation des différences significatives entre les conditions pour la combinaison des muscles fléchisseur commun des doigts et grand palmaire (FCD-GP) *

	Conditions	Groupe 1					Groupe 2					Groupe 3					Groupe 4					Groupe 5									
		28	15	12	25	13	20	11	14	23	24	8	21	9	22	26	27	3	5	10	7	4	19	18	6	2	16	17	1		
Groupe 1	28					*	*	*			*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	15															*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	12													*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	25																*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Groupe 2	13													*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
	20	*														*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
	11	*																				*	*	*	*	*	*	*	*	*	
	14	*																				*	*	*	*	*	*	*	*	*	
	23	*															*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
Group 3	24	*														*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
	8	*												*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
	21	*												*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
	9	*	*	*										*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
	22	*	*	*										*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
Groupe 4	26	*	*	*		*								*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
	27	*	*	*		*								*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
	3	*	*	*	*	*	*							*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
	5	*	*	*	*	*	*							*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
	10	*	*	*	*	*	*							*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
Groupe 5	7	*	*	*	*	*	*							*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
	4	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
	19	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
	18	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	6	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Groupe 5	2	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
	16	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
	17	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	
	1	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	

Annexe C-10. Représentation des différences significatives entre les conditions pour la combinaison des muscles premier radial et extenseur commun des doigts (PR-ECD) *

	Conditions	Groupe 1					Groupe 2					Groupe 3					Groupe 4					Groupe 5								
		28	15	12	25	13	20	11	14	23	24	8	21	9	22	26	27	3	5	10	7	4	19	18	6	2	16	17	1	
Groupe 1	28					*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	15					*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	12	*				*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	25	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Groupe 2	13	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	20	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	11	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	14	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	23	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Group 3	24	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	8	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	21	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	9	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	22	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Groupe 4	26	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	27	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	3	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	5	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	10	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Groupe 5	7	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	4	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	19	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	18	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	6	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Groupe 5	2	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	16	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	17	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	1	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

* Les conditions de gants ont été ordonnées à la lumière du niveau de rigidité moyen (rang) obtenu avec les résultats de l'évaluation psychophysique (section résultats, Tableau 3), i.e. du moins rigide au plus rigide, la condition à main nue (condition 28) étant placée en premier.
Les groupes 1 à 5 correspondent à des sous-groupes aussi formés avec les sous-catégories de rigidité (0-2, 2-4, 4-6, 6-8, 8-10) obtenues avec l'évaluation psychophysique.

Annexe C-11. Représentation des différences significatives entre les conditions pour la combinaison des muscles fléchisseur commun des doigts et extenseur commun des doigts (FCD-ECD) *

	Conditions	Groupe 1					Groupe 2					Groupe 3					Groupe 4					Groupe 5							
		28	15	12	25	13	20	11	14	23	24	8	21	9	22	26	27	3	5	10	7	4	19	18	6	2	16	17	1
Groupe 1	28					*	*	*			*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	15														*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	12																*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	25																*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Groupe 2	13															*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	20	*															*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	11	*																					*	*	*	*	*	*	*
	14	*																					*	*	*	*	*	*	*
	23																*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Group 3	8	*																									*	*	*
	21	*																									*	*	*
	9	*															*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	22	*															*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	26	*	*													*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Groupe 4	27	*	*													*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	3	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	5	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	10	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	7	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	4	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	19	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	18	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Groupe 5	6	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	2	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	16	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	17	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	1	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*

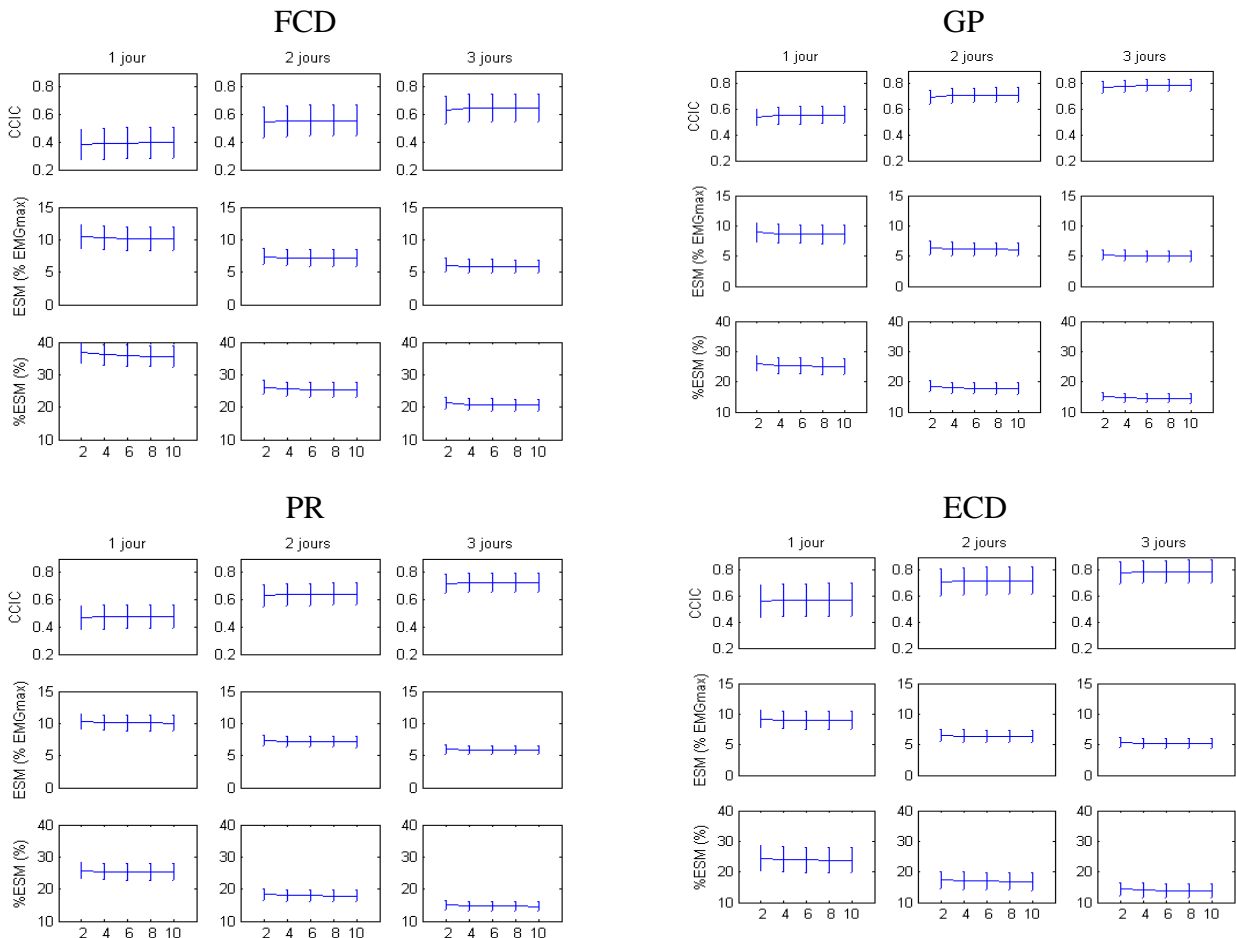
Annexe C-12. Représentation des différences significatives entre les conditions pour la combinaison des quatre muscles (Moy 4) *

	Conditions	Groupe 1					Groupe 2					Groupe 3					Groupe 4					Groupe 5							
		28	15	12	25	13	20	11	14	23	24	8	21	9	22	26	27	3	5	10	7	4	19	18	6	2	16	17	1
Groupe 1	28			*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	15						*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	12	*														*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	25	*													*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Groupe 2	13											*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	20	*													*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	11	*	*																				*	*	*	*	*	*	*
	14	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	23	*															*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Group 3	24	*													*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	8	*	*																								*	*	*
	21	*	*																								*	*	*
	9	*	*													*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	22	*	*													*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Groupe 4	26	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	27	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	3	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	5	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	10	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	7	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	4	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	19	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
Groupe 5	18	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	6	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	2	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	16	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	17	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
1	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	

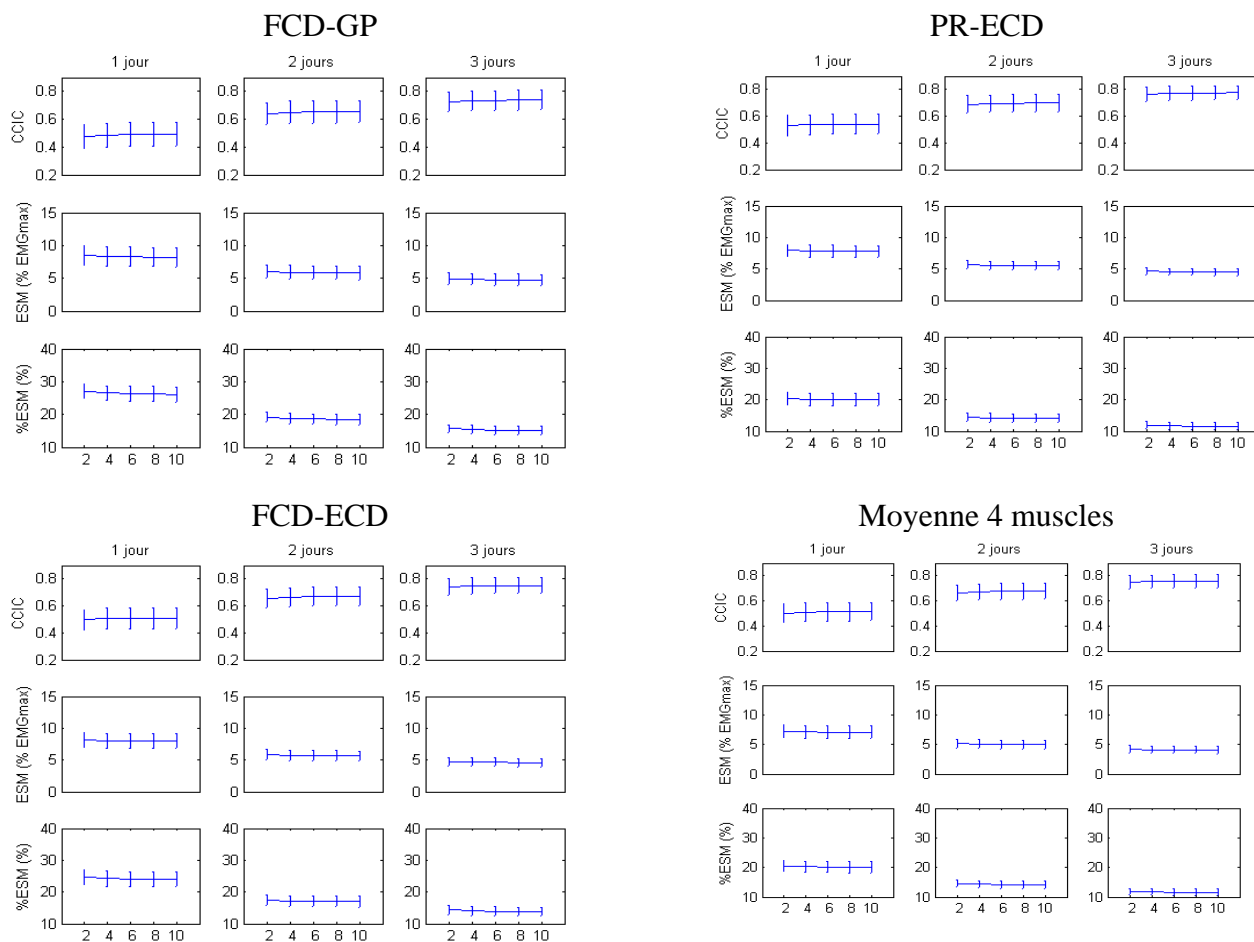
* Les conditions de gants ont été ordonnées à la lumière du niveau de rigidité moyen (rang) obtenu avec les résultats de l'évaluation psychophysique (section résultats, Tableau 3), i.e. du moins rigide au plus rigide, la condition à main nue (condition 28) étant placée en premier. Les groupes 1 à 5 correspondent à des sous-groupes aussi formés avec les sous-catégories de rigidité (0-2, 2-4, 4-6, 6-8, 8-10) obtenues avec l'évaluation psychophysique.

Annexe C-13. Indices de fidélité (CCIC, ESM, %ESM) estimés en fonction des différentes stratégies de mesures impliquant de 2 à 10 essais et de 1 à 3 jours, et cela pour chaque muscle ou combinaisons de muscles.

Chaque courbe représente les valeurs moyennes et les écart-types correspondant aux résultats des 28 conditions de gants.

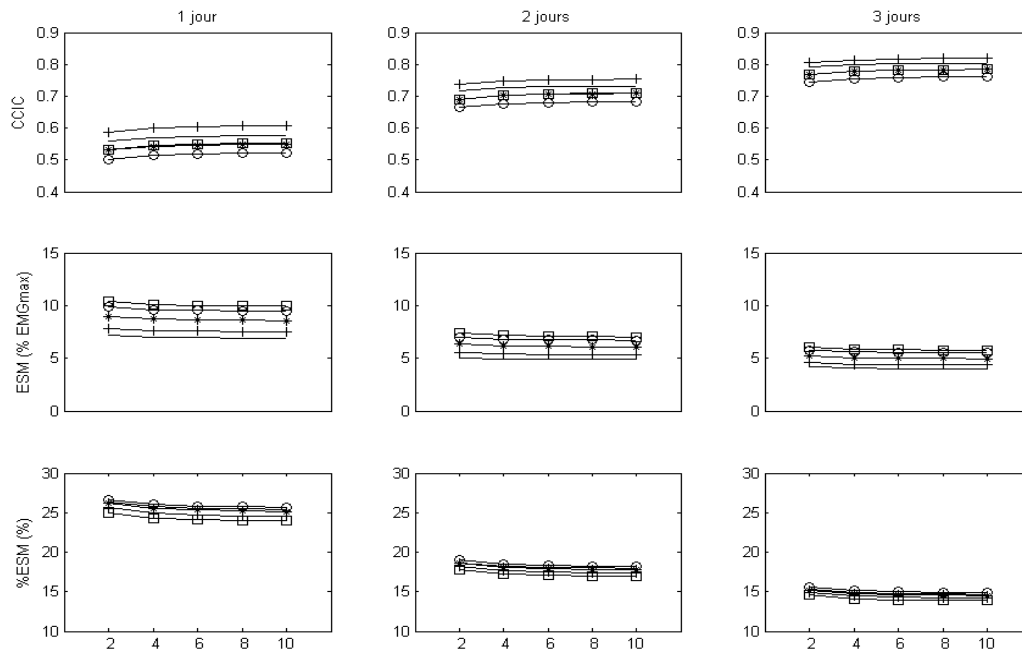


FCD : Fléchisseur commun des doigts; GP : Grand palmaire; PR : Premier radial; ECD : Extenseur commun des doigts;



FCD : Fléchisseur commun des doigts; GP : Grand palmaire; PR : Premier radial; ECD : Extenseur commun des doigts;

Annexe C-14. Indices de fidélité (CCIC, ESM, %ESM) estimés en fonction des différentes stratégies de mesures impliquant de 2 à 10 essais et de 1 à 3 jours (combinaison de muscles PR-ECD). Chaque courbe représente les valeurs moyennes (sans écart-type pour une meilleure clarté) correspondant à une catégorie de gants. Cinq catégories de rigidité ont été établies en fonction du score moyen ($n = 30$ sujets) obtenu pour chaque gant avec l'échelle de perception de Borg (voir légende)



Légende :

1. Catégorie 1 i.e. échelle psychophysique de 0 à 2 : -
2. Catégorie 2 i.e. échelle psychophysique de 2 à 4 : +
3. Catégorie 3 i.e. échelle psychophysique de 4 à 6 : *
4. Catégorie 4 i.e. échelle psychophysique de 6 à 8 : o
5. Catégorie 5 i.e. échelle psychophysique de 8 à 10 : □

7. Bibliographie

- 1 Commission de la santé et de la sécurité du travail du Québec, Fichier sur les lésions professionnelles, mis à jours en septembre 2003, Montréal, QC.
- 2 ISO 13997, “Protective Clothing - Mechanical Properties - Determination of Resistance to Cutting by Sharp Objects”, International Standard, 1998.
- 3 ASTM American Society for Testing and Materials, F 1342 “Standard Test Method for Protective Clothing Material Resistant to Puncture”, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 11.03, 2005.
- 4 ISO 13995 Vêtements de protection -- Propriétés mécaniques -- Méthode d'essai pour la détermination de la résistance à la perforation et au déchirement dynamique des matériaux - 2000.
- 5 ASTM American Society for Testing and Materials, F 1790-97 Standard Test Method for Measuring Cut Resistance of Materials Used in Protective Clothing, Philadelphia, PA.; 1997.
- 6 LARIVIÈRE, C., PLAMONDON, A., TELLIER, C., LARA, J. et BOUTIN, J. Développement de tests biomécaniques pour l'évaluation de l'adhérence et de la souplesse des gants de protection. Rapport IRSST, 2003.
- 7 LARIVIÈRE, C., PLAMONDON, A., LARA, J., TELLIER, C. et BOUTIN, J., “Biomechanical assessment of gloves. A study of the sensitivity and reliability of electromyographic parameters used to measure the activation and fatigue of different forearm muscles”. International Journal of Industrial Ergonomics, vol. 34, no 2, 2004, p. 101-116
- 8 ISO 17235 Cuir essai physique et mécanique – Détermination de la souplesse, 2002.
- 9 ISO 5979 Supports textiles revêtus de caoutchouc ou de plastique - Détermination de la souplesse -- Méthode de la boucle plate, 1982.
- 10 KAWABATA, S., The Standardization and Analysis of Hand Evaluation, The Textile Machinery Society of Japon, Osaka, 1980.
- 11 Norme ASTM D 4032-94, Standard test method for stiffness of fabric by circular bend procedure.
- 12 NELSON. J.B. MITAL, A. An Ergonomic Evaluation of Dexterity and Tactility with Increase in Examination/Surgical Glove Thickness. Ergonomics 38. 723-733, 1995.
- 13 MITAL A, KUO T, FAARD HF. A Quantitative Evaluation of Gloves Used with Non-powered Hand Tools in Routine Maintenance Tasks. Ergonomics, 37(2):333-343, 1994.
- 14 ROCK KM, MIKAT RP, FOSTER C. The effects of Gloves on Grip Strength and Three-point Pinch. Journal of Hand Therapy, 14(4):286-290, 2001.
- 15 KOVACS, R. SPLITTSTOESSER, A. MARONITIS, et W. S. MARRAS. Grip Force and Muscle Activity Differences Due to Glove Type. AIHA.J.(Fairfax., Va.), 63 (3):269-274, 2002.

- 16 SUDHAKAR et al. (1998) The Effects of Gloves on Grip Strength and Muscle Activity. In Proceeding of the Human Factors Society, Santa Monica, CA, USA.
- 17 BATRA et al. 1994 Glove attribute : Can They Predict Performance ? International Journal of Industrial Ergonomics 14, 201-209.
- 18 G. Borg. Psychophysical scaling with applications in physical work and the perception of exertion. *Scand.J.Work Environ.Health* 16 Suppl 1:55-58, 1990.
- 19 Lara, J., « Développement d'une méthode d'évaluation de la résistance à la perforation des gants de protection », Rapport IRSST, R-059, 1992.
- 20 Kawabata, S. , Masako, N. , Yoshihiro, Y. , Recent Developments in the Evaluation Technology of Fiber and Textile : Toward the Engineered Design of Textile Performance. *Journal of Applied Polymer Science*, 83, 687-702 , 2002.
- 21 B.P. Saville, Physical testing of textiles. The Textile Institute, CRC Press, 1999.
- 22 Calibration tables and short instructions for operation, KES-F-Series. Kato Tech Co., Ltd.
- 23 Fatma Selcen Killinc –Balci, A study of the nature of fabric comfort, Thèse de doctorat, Auburn, Alabama, Mai 2004.
- 24 N. Diffrient, A.R. Tilley, D. Harman & Henry Dreyfuss Associates (1993) Human scale 4/5/6: a portfolio of information: manual. Cambridge, Mass. MIT Press.
- 25 D. Laroche et T. Vu-Khanh, Modelling of the thermo-elastic properties of woven fabric composites in complex shapes, *Composite Materials: testing and design*, ASTM, STP 1206 pp 386-414.
- 26 Norme ISO/CEN 10819 “Mechanical Vibration and Shock - Hand-arm Vibration - Method for the Measurement and Evaluation of the Vibration Transmissibility of Gloves at the Palm of the Hand”.
- 27 Kong, Y.-K. and B.D. Lowe, Optimal cylindrical handle diameter for grip force tasks. *Industrial Ergonomics*, 2005. 35: p. 495-507.
- 28 Bouisset, S. and M. Bernard, *Muscles, posture et mouvement Base et applications de la méthode électromyographique*. 1995, Paris: Hermann.
- 29 Jung, M.-C. and M.S. Hallbeck, Quantification of the effects of instruction type, verbal encouragement, and visual feedback on static and peak handgrip strength. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2004. 34(5): p. 367-374.
- 30 SENIAM, *Surface ElectroMyoGraphy for the Non-Invasive Assessment of Muscles*. 2005.
- 31 BASMAJIAN JV, BLUSMENSTEIN R. Electrode Placement in Electromyographic Biofeedback. In: Basmajian JV, editor. *Biofeedback. Principles and Practice for Clinicians*. Baltimore: Williams & Wilkins, 363-378, 1983.
- 32 HANSSON et al. 1996 Goniometer Measurement and Computer Analysis of Wrist Angles and Movements Applied to Occupational Repetitive Work. *Journal of Electromyography and Kinesiology* 6, 23-35.

- 33 S. Karlsson, J. Yu, and M. Akay. Enhancement of spectral analysis of myoelectric signals during static contractions using wavelet methods. *IEEE Transaction on Biomedical Engineering* 46 (6):670-684, 1999).
- 34 Shalvelson, R.J. and N.M. Webb, Generalizability Theory. A primer. 1991: London: SAGE Publications.
- 35 P. E. Shrout and J. L. Fleiss. Intraclass Correlations: Uses in assessing rater reliability. *Psychological Bulletin* 86 (2):420-428, 1979.
- 36 Timoshenko, S., Woinowsky-Krieger, S. Theory of Plates and Shells. Mc Graw-Hill, New-York. 1959.
- 37 Harrabi, L., Dolez, P., Vu-Khanh, T., Lara, J., Evaluation of the flexibility of protective gloves. Proceeding of the 3rd European Conference on Protective Clothing, Gdynia, Poland, 10-12 May 2006.
- 38 Bensel, C. K. (1993). Effects of various thicknesses of chemical protective gloves on manual dexterity. *Ergonomics*, 36(6), 687-696.
- 39 Bradley, J. V. (1969). Glove characteristics influencing control manipulability. *Human Factors*, 11(1), 21-35.
- 40 Chaffin, D.B., G. Andersson, and B.J. Martin, Occupational biomechanics. 3rd ed. 1999, New York ; Toronto: J. Wiley. xvii, 579.
- 41 Elert, J., S. Karlsson, and B. Gerdle, One-year reproducibility and stability of the signal amplitude ratio and other variables of the electromyogram: test-retest of a shoulder forward flexion test in female workers with neck and shoulder problems. *Clinical Physiology*, 1998. 18(6): p. 529-538.
- 42 Kollmitzer, J., G.R. Ebenbichler, and A. Kopf, Reliability of surface electromyographic measurements. *Clin.Neurophysiol.*, 1999. 110(4): p. 725-734.
- 43 Sparto, P.J. and M. Parnianpour, Generalizability of trunk muscle EMG and spinal forces. *IEEE Eng. Med. Biol. Mag*, 2001. 20(6): p. 72-81.
- 44 Hatch, J.P., T.J. Prihoda, and P.J. Moore, The application of generalizability theory to surface electromyographic measurements during psychophysiological stress testing: how many measurements are needed? *Biofeedback Self Regul.*, 1992. 17(1): p. 17-39.
- 45 Riley, M.W., Cochran, D.J., and Schanbacher, Froce capability due to gloves, *Ergonomics*, 1985. 28, p. 441-447.
- 46 Kinoshita, H., Effect of gloves on prehensile forces lifting and holding tasks, *Ergonomics*, 1999, 42, p. 1372-1385.
- 47 Buhman, D.C., Cherry, J.A. Bronkema-Orr, L., Bishu, R., Effects of glove, orientation, pressure, load and handle on submaximal grasp force, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 2000, 25, p. 247-256.