

2012

Contraintes biomécaniques exercées aux membres supérieurs lors de l'utilisation de petits outils dans le secteur des services à l'automobile

Denis Marchand
Université du Québec à Montréal

Denis Giguère
IRSST

Suivez ce contenu et d'autres travaux à l'adresse suivante: <https://pharesst.irsst.qc.ca/rapports-scientifique>

Citation recommandée

Marchand, D. et Giguère, D. (2012). *Contraintes biomécaniques exercées aux membres supérieurs lors de l'utilisation de petits outils dans le secteur des services à l'automobile* (Rapport n° R-726). IRSST.

Ce document vous est proposé en libre accès et gratuitement par PhareSST. Il a été accepté pour inclusion dans Rapports de recherche scientifique par un administrateur autorisé de PhareSST. Pour plus d'informations, veuillez contacter pharesst@irsst.qc.ca.

É

Troubles musculo-squelettiques

Études et recherches

RAPPORT R-726



Contraintes biomécaniques exercées aux membres supérieurs lors de l'utilisation de petits outils dans le secteur des services à l'automobile

*Denis Marchand
Denis Giguère*



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

NOS RECHERCHES

travaillent pour vous !

Mission

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

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
2012
ISBN : 978-2-89631-593-2 (PDF)
ISSN : 0820-8395

IRSST - Direction des communications
et de la valorisation de la recherche
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : 514 288-1551
Télécopieur : 514 288-7636
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca
© Institut de recherche Robert-Sauvé
en santé et en sécurité du travail,
février 2012



Troubles musculo-squelettiques

Études et recherches

■ RAPPORT R-726

Contraintes biomécaniques exercées aux membres supérieurs lors de l'utilisation de petits outils dans le secteur des services à l'automobile

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.

*Denis Marchand,
Département de kinanthropologie, UQÀM*

*Denis Giguère,
IRSST*



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

Cette étude a été financée par l'IRSST. Les conclusions et recommandations sont celles des auteurs.

CONFORMÉMENT AUX POLITIQUES DE L'IRSST

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

REMERCIEMENTS

Les expérimentations et observations qui sont à l'origine de ce rapport ont bénéficié de l'appui et de l'aide de plusieurs personnes, que nous tenons ici à remercier.

Nous désirons d'abord souligner l'implication de Jocelyn Jargot, conseiller en Hygiène industrielle de l'organisme *Auto Prévention*, qui nous a été d'une aide précieuse par sa connaissance du milieu et son habileté à s'assurer de la conformité, avec le milieu professionnel, des tâches étudiées en laboratoire. Nous remercions également André Bélanger de *De Vilbiss Automotive Refinishing* pour ses conseils en peinture automobile et Denis Paquet, de *Chicago Pneumatic*, pour le choix et les ajustements des outils pneumatiques.

L'acquisition des données en laboratoire ainsi que leur analyse ont été effectuées par trois étudiants inscrits à la maîtrise en kinanthropologie à l'UQAM, soit Alexandre Rouleau (volets contraintes à l'épaule et boulonnage), Christian Kelly (volets contraintes à l'épaule et ponçage) et Judith P. Martin (volets boulonnage et peinture à l'atomiseur). Le travail de cette équipe jeune et dynamique a été rendu possible grâce à Pierre Drouin de l'IRSST, qui a réalisé les montages mécaniques pour les expériences, et à Carole Roy à l'UQAM pour l'entretien du matériel et des instruments pour les mesures électrophysiologiques.

Enfin, nos remerciements vont à Vincent Mandeville-Gauthier de l'UQAM, pour sa contribution à la rédaction du rapport final.

SOMMAIRE

Entre 1998 et 2002, dans le secteur des Services à l'automobile, les troubles musculo-squelettiques aux membres supérieurs (TMS-MS) représentaient 14,9 % des jours d'arrêt de travail et 13,8 % des déboursés totaux de compensation, malgré qu'ils ne comptaient en moyenne que pour 8,7 % de l'ensemble des lésions compensées. L'objectif de ce projet était de quantifier de façon objective les contraintes physiques observées, lors d'une précédente activité de recherche dans les garages (Marchand et Giguère, 2010), chez les mécaniciens, peintres et carrossiers. En effet, les postures, et le poids des outils fréquemment utilisés par ces travailleurs, présentent une combinaison de facteurs propices à l'apparition des TMS-MS.

Une approche analytique utilisant la simulation du travail sur banc d'essai en laboratoire avec des sujets expérimentaux a été utilisée. Les situations ciblées étaient les phases de maintien (contraintes statiques) d'un choix raisonné d'outils pour différentes postures de travail des membres supérieurs. L'évaluation des paramètres biomécaniques qui affectent le rendement musculaire a été utilisée pour comparer les différentes situations. Pour les trois volets appliqués de l'étude (le boulonnage, le ponçage et la peinture à l'atomiseur), les méthodes de travail observées sur le terrain ont d'abord été évaluées telles quelles, puis après modifications visant à réduire les contraintes physiques. Les principales variables biomécaniques étudiées étaient les moments de force articulaires et l'activité musculaire des membres supérieurs.

Les résultats de ce projet de recherche fournissent une évaluation quantitative des contraintes musculaires associées aux postures et à certains outils couramment utilisés dans les garages. Les mesures simultanées des moments de force, de l'activité musculaire des membres supérieurs ont permis de comprendre objectivement les contraintes musculaires associées aux situations de travail avec les bras au-dessus des épaules. Pour le volet sur le boulonnage, les résultats présentent également l'impact, sur la musculature des membres supérieurs, des contrecoups engendrés par les outils rotatifs. L'évaluation des situations de travail modifiées a également permis de valider des solutions visant à réduire les contraintes musculaires associées à l'utilisation de ces outils.

La synthèse des résultats suggère que les solutions permettant d'améliorer la posture ont plus d'impact pour réduire les contraintes physiques aux membres supérieurs que la réduction du poids des outils. Le secteur des Services à l'automobile et les secteurs connexes bénéficieront d'une synthèse décrivant l'origine des contraintes physiques dans les garages ainsi que d'arguments utilisables dans la formation et l'intervention.

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION.....	1
2. LES TMS AUX MEMBRES SUPERIEURS	3
2.1 Mécanismes de blessures	3
2.1.1 Les mécanismes causant l'apparition et le développement des TMS en mécanique automobile.....	3
3. METHODOLOGIE GENERALE.....	9
3.1 Sélection des sujets.....	9
3.2 Électromyographie (EMG)	9
3.3 Perception de l'effort	10
3.4 Analyses cinématiques.....	10
3.5 Moments de force exercés par les outils et les postures.....	11
4. VOLET I : CONTRAINTES PHYSIQUES ASSOCIEES A DIFFERENTES POSITIONS DE L'EPAULE	13
4.1 Problématique	13
4.2 Méthodologie spécifique	14
4.2.1 Sujets.....	14
4.2.2 Conditions expérimentales.....	14
4.3 Résultats et discussion	15
5. VOLET II : CONTRAINTES PHYSIQUES ASSOCIEES A L'ACTIVITE DE BOULONNAGE EN MECANIQUE AUTOMOBILE.....	20
5.1 Problématique	20
5.2 Méthodologie spécifique	22
5.2.1 Sujets.....	22
5.2.2 Conditions expérimentales.....	23
5.2.3 Mesures spécifiques de l'effet de la vibration	25
5.3 Résultats.....	25
5.3.1 Les résultats des variables de contrôles	25
5.3.2 Les résultats des variables dépendantes reliées à la demande musculaire.....	26

6. VOLET III : CONTRAINTES PHYSIQUES ASSOCIÉES À L'ACTIVITÉ DE PONÇAGE DE CARROSSERIE AUTOMOBILE	38
6.1 Problématique	38
6.1.1 Les ponceuses rotatives pneumatiques	38
6.2 Méthodologie spécifique	39
6.2.1 Sujets.....	39
6.2.2 Conditions expérimentales.....	40
6.3 Résultats.....	42
6.3.1 Résultats des variables relatives aux jauges de force.....	42
6.3.2 Résultats des variables relatives aux angles pour la section de la porte basse	43
6.3.3 Résultats des variables relatives aux angles de porte haute.....	44
6.3.4 Résultats des variables relatives aux angles pour la section du toit.....	45
6.3.5 Résultats des variables relatives au pourcentage d'utilisation musculaire	46
7. VOLET IV : LES CONTRAINTES PHYSIQUES ASSOCIEES A L'ACTIVITE DE PEINTURE AUTOMOBILE	51
7.1 Problématique	51
7.2 Conditions expérimentales	52
7.3 Résultats.....	55
7.3.1 La section du capot (plan horizontal).....	55
7.3.2 La section du toit (plan horizontal).....	60
8. RECOMMANDATIONS	67
8.1 Recommandations associées aux activités boulonnage.....	67
8.2 Recommandations associées aux activités de ponçage	67
8.3 Recommandations associées aux activités de peinture	68
9. CONCLUSION.....	69

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Liste des muscles étudiés lors des différents volets de l'étude et leurs principales fonctions.....	10
Tableau 2: La taille, le poids et l'âge des sujets du Volet I	14
Tableau 3 : Caractéristiques des sujets du volet II.....	22
Tableau 4 : Les %CVMmax obtenus pendant le serrage final sur le plan vertical où l'analyse statistique des effets principaux a présenté une différence significative à $p < 0,05$. (N = 13).....	27
Tableau 5 : Les %CVMmoy obtenus pendant le boulonnage sur le plan vertical où l'analyse statistique des effets principaux a présenté une différence significative à $p < 0,05$. (N = 13).....	28
Tableau 6 : Les %CVMmax obtenus pendant le serrage final sur le plan horizontal où l'analyse statistique des effets principaux a présenté une différence significative à $p < 0,05$. (N = 13).....	30
Tableau 7 : Les %CVMmoy obtenus pendant le boulonnage sur le plan horizontal où l'analyse statistique des effets principaux a présenté une différence significative à $p < 0,05$. (N = 13).....	31
Tableau 8 : La demande musculaire en %CVMmoy pour les situations de références, les résultats en gras représentent les différences significatives à $p < 0,05$	36
Tableau 9 : Caractéristiques anthropométriques et âges des sujets.	40
Tableau 10 : Angles absolus et relatifs moyens mesurés lors du ponçage de la porte basse.....	43
Tableau 11 : Angles absolus et relatifs moyens mesurés lors du ponçage de la porte haute.....	44
Tableau 12 : Angles absolus et relatifs moyens mesurés lors du ponçage du toit.....	45
Tableau 13: Pourcentage d'utilisation musculaire selon différentes conditions lors des essais de ponçage de la porte basse.....	46
Tableau 14 : Pourcentage d'utilisation musculaire selon différentes conditions lors des essais de ponçage de la porte haute.....	47
Tableau 15 : Pourcentage d'utilisation musculaire selon différentes conditions lors des essais de ponçage du toit.....	48
Tableau 16 : Les cotes psychophysiques évaluées lors du ponçage de la porte basse.....	48
Tableau 17 : Les cotes psychophysiques évaluées lors du ponçage de la porte haute.....	49
Tableau 18 : Les cotes psychophysiques évaluées lors du ponçage du toit.....	49
Tableau 19 : Les caractéristiques des dix sujets du Volet IV.	52
Tableau 20 : Les valeurs moyennes du pourcentage de la contraction volontaire maximale (% CVM) des conditions de la section du capot selon la surface (sur - sous) et l'inclinaison (droit – incliné), pour chacun des muscles.....	56

Tableau 21 : Les effets d'interactions significatifs spécifiques entre les valeurs moyennes du pourcentage de la contraction volontaire maximale (% CVM) des conditions de la section du capot selon la surface et l'inclinaison, pour chacun des muscles significatifs.....	57
Tableau 22 : Les valeurs moyennes des cotes psychophysiques de la section du capot selon la surface (sur – sous) et l'inclinaison (droit – incliné), pour chacune des régions anatomiques, ainsi que l'effet significatif principal.....	59
Tableau 23 : Les valeurs moyennes du pourcentage de la contraction volontaire maximale (% CVM) des conditions de la section du toit selon la hauteur (standard - modifiée), l'inclinaison (droit – incliné) et le pistolet (standard – modifié), pour chacun des muscles.....	62
Tableau 24 : Les effets d'interactions significatifs spécifiques entre les valeurs moyennes du pourcentage de la contraction volontaire maximale (% CVM) des conditions de la section du toit.....	64
Tableau 25 : Les valeurs moyennes des cotes psychophysiques de la section du toit selon la hauteur (standard - modifiée), l'inclinaison (droit – incliné) et le pistolet (standard – modifié), pour chacune des régions anatomiques	65

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Exemple d'angles relatifs à l'épaule.	15
Figure 2 : Pourcentage moyen de la contraction volontaire maximale du deltoïde antérieur en fonction de l'angle relatif avec les courbes d'écart-type.	16
Figure 3 : Pourcentage moyen de la contraction volontaire maximale du deltoïde médian en fonction de l'angle relatif avec les courbes d'écart-type.	16
Figure 4 : Pourcentage moyen de la contraction volontaire maximale du deltoïde postérieur en fonction de l'angle relatif avec les courbes d'écart-type.	17
Figure 5 : Moyenne des moments de force à l'épaule en fonction de l'angle relatif avec les courbes d'écart-type.	18
Figure 6 : Moment de force à l'épaule exercés uniquement par l'étirement des structures antagonistes en fonction de l'angle relatif (n=19). Le y de l'équation permet d'obtenir cette valeur selon l'angle relatif à l'épaule.	18
Figure 7 : Représentation de la relation tension-longueur des muscles agoniste et antagoniste ...	19
Figure 8 : Impact du contrecoup sur la musculature, tiré de Lin 2003.	21
Figure 9 : Les différentes combinaisons de plans de travail et de postures du bras du volet II.	23
Figure 10 : Utilisation de la rallonge de 45 cm lors du boulonnage sur le plan horizontal avec le coude en flexion.	24
Figure 11 : Les cotes psychophysiques d'effort physique moyennes obtenues lors des conditions expérimentales sur le plan vertical (n=16).	29
Figure 12 : Les cotes psychophysiques d'effort physique moyennes obtenues lors des conditions expérimentales sur le plan horizontal (n=16).	31
Figure 13 : Comparaison quantitative du moment de force à l'épaule lors du boulonnage sur le plan horizontal lorsque le coude est fléchi (à gauche) et en extension (à droite) à l'aide du logiciel 3DSSPP de l'Université du Michigan.	33
Figure 14 : Représentation d'une condition expérimentale où le sujet ponce le toit avec des hauteurs modifiées.	41
Figure 15 Représentation d'une condition expérimentale où le sujet ponce le bas de porte avec des hauteurs modifiées.	41
Figure 16 : Représentation de la surface à poncer.	42
Figure 17 : Représentation du positionnement des jauges de contrainte.	42
Figure 18 : La posture de travail d'un peintre lors de l'application de peinture sur une surface verticale (portière) à l'aide d'un pistolet standard.	51
Figure 19 : La posture de travail d'un peintre sur de l'application de peinture sur une surface horizontale (toit), à l'aide d'un pistolet standard.	51
Figure 20 : Exemple pour représenter deux conditions de la section du toit (1)	53
Figure 21 : Exemple pour représenter deux conditions de la section du toit (1)	53

Figure 22 : Exemples pour représenter deux conditions de la section du capot (1)	54
Figure 23 : Exemples pour représenter deux conditions de la section du capot (2)	54
Figure 24 : Pistolet standard (a)	55
Figure 25 : Pistolet modifié (b).....	55

1. INTRODUCTION

Le secteur des Services à l'automobile présente un bilan inquiétant sur le plan de la santé et sécurité au travail. En effet, selon la CSST (2004), les troubles musculo-squelettiques aux membres supérieurs (TMS-MS) sont à l'origine d'une hausse des jours d'arrêt de travail. Pour le secteur des Services à l'automobile, entre 1998 et 2002, le nombre de jours d'arrêts de travail suite à des troubles musculo-squelettiques (TMS) est de 122 ± 25 , alors qu'il n'est que de 70 ± 5 pour l'ensemble des lésions au Québec. Cette proportion représentait $14,9 \pm 1,8\%$ des jours d'arrêts de travail et $13,8 \pm 2,1\%$ des déboursés totaux de compensation. De plus, les troubles musculo-squelettiques aux membres supérieurs (TMS-MS) représentaient en moyenne $8,7 \pm 1,1\%$ de l'ensemble des lésions compensées du secteur. Ces chiffres démontrent que ce secteur implique des absences de longues durées et des coûts importants associés aux lésions musculo-squelettiques. Cette problématique est due en grande partie aux facteurs de risque présents lors de l'implication importante des membres supérieurs pendant la réalisation du travail. Les troubles musculo-squelettiques (TMS-MS) peuvent être causés par la combinaison de mauvaises postures et de poids des outils.

Une « Étude exploratoire du travail des mécaniciens avec les petits outils mécaniques en relation avec les TMS - MS » (Marchand et Giguère, 2010) répondait à une demande de l'Association paritaire pour la santé et sécurité au travail des Services à l'automobile, Auto Prévention. Au moyen de l'analyse de l'activité de travail, cette étude a documenté le travail des mécaniciens, carrossiers et installateurs ainsi que les paramètres d'utilisation de ce type d'outils en situation réelle sur le terrain, sur un échantillon de neuf tâches, chacune observée dans cinq situations. L'activité normale de 35 mécaniciens, peintres et installateurs ($35,5 \pm 10$ ans d'âge, de un à 30 ans d'expérience) fut enregistrée pendant la réalisation de leur travail et ceux-ci répondirent à un questionnaire (SNQ) sur les TMS.

Les résultats de cette étude exploratoire montrent que chacune des tâches présente son propre profil de risque pour les TMS. À titre indicatif, le travail avec les bras « à même hauteur » ou « plus haut que les épaules » représente 90% du temps travaillé sous le capot, et l'utilisation d'un outil énergisé a atteint 27% du temps total lors de l'une des situations observées. Dans un tel cas, les muscles fléchisseurs des épaules, avec les bras allongés, devaient maintenir une charge pour des périodes pouvant atteindre une durée ininterrompue de 30 secondes. Polir un véhicule de taille moyenne impliquait l'utilisation d'un outil énergisé de 72% à 88% du temps total de travail, avec des cycles d'utilisation d'au-delà de 4 minutes consécutives. Le ponçage d'un véhicule, en préparation pour la peinture, pouvait se faire manuellement ou à l'aide d'un outil énergisé, et impliquait l'application d'une force horizontale simultanément avec une force contre la gravité de 51% à 78% du temps observé, en particulier lors du travail sur le côté bas de la carrosserie. Un moment de force élevé était alors présent au niveau de l'épaule, le bras travaillant contre la gravité tout en appliquant une force sur la carrosserie. Le travail sous le véhicule a résulté en un raccourcissement des fléchisseurs des épaules lors de l'utilisation, par exemple, de

la torche acétylénique et de la boulonneuse à air comprimé. Aucune différence significative ne fut décelée à partir des données du questionnaire sur les TMS-MS, mais l'analyse des perceptions a permis d'identifier des sous-tâches exigeantes du point de vue de l'effort et de l'attention. Enfin, on a pu observer que certains travailleurs avaient développé leurs propres méthodes de travail pour réduire le stress postural, par exemple, utiliser une partie du véhicule pour stabiliser sa posture, ou faire reposer une partie du poids de l'outil sur la cuisse lors du ponçage ou du polissage en position assise. Les résultats préliminaires de cette étude confirment plusieurs situations déjà observées dans les rares études conduites dans les garages, entre autres dans celles de Kant et al (1990), de Semid (2002) et de Gold et al (2006), tout en apportant un éclairage nouveau sur le travail fait dans les garages. Sa nature exploratoire a permis de cerner certaines problématiques pertinentes du point de vue de la recherche et des pistes de solution à valider.

Force est de constater que les TMS-MS, tant au Québec qu'ailleurs, sont bien présents dans ce secteur d'activité, et la nature et les sièges des lésions sont également bien identifiés. De plus, il faut constater que plusieurs des facteurs habituellement associés à leur apparition y ont également été identifiés, entre autres : le travail aux limites extrêmes des articulations, l'utilisation de force musculaire et surtout, le travail avec les membres supérieurs en position élevée. Le premier volet sur les contraintes posturales présenté dans ce rapport donne une validation des niveaux d'effort musculaire associés au maintien de ces postures chez les garagistes.

Enfin, si la nature de l'étude exploratoire (Marchand et Giguère, 2010) a permis certaines mesures biomécaniques au niveau des outils manipulés et de mesures indirectes des efforts physiques (perception psychophysique), elle n'a pas permis d'objectiver, à l'aide de mesures directes de la sollicitation musculaire (e.g. électromyographie), l'importance des contraintes physiques. Or, ces données manquent actuellement dans la littérature scientifique. Afin de combler cette lacune, la présente étude utilise la simulation du travail (Maline, 1994), et compare différentes méthodes de travail avec de petits outils pneumatiques pour trois des situations problématiques observées dans les garages au Québec. Ce rapport propose une analyse systématique de ces situations qui comportent trois volets : l'utilisation des clés à choc, des ponceuses et des pistolets à peinture.

Les résultats obtenus des quatre volets présentés dans cette étude permettent d'obtenir un indice chiffré du niveau des contraintes biomécaniques imposées aux membres supérieurs. Ils devraient aider à combler le manque de connaissances scientifiques sur ce sujet, en plus de servir de référence pour appuyer des améliorations qu'on voudrait apporter à un poste de travail ou à une méthode de travail.

2. LES TMS AUX MEMBRES SUPERIEURS

2.1 Mécanismes de blessures

La revue de la littérature présentera deux thématiques, soient i) les mécanismes causant l'apparition et le développement des TMS et ii) les facteurs de risques spécifiquement liés à la mécanique automobile.

2.1.1 Les mécanismes causant l'apparition et le développement des TMS en mécanique automobile

L'étude de Marchand et Giguère (2010) confirme en gros les observations de l'étude exploratoire de Gold et al. (2006) dans 5 garages du New Hampshire (n=50) de même que celles de Semid (2002). L'étude de Gold soulignait déjà la présence de postures contraignantes en relation avec le véhicule en réparation, l'utilisation de force élevée par les membres supérieurs ainsi que l'exposition aux vibrations de certains segments corporels. Cette même étude souligne également que les garages se classent au 15^e rang en termes de prévalence des TMS aux États-Unis, mais 13^e en ce qui concerne la moyenne des jours perdus, soit 7,0 + 2,2 par accident déclaré. Au niveau des statistiques nationales (BLS – United States Bureau of Labour Statistics), tous secteurs confondus, Courtney et Webster (1999) soulignent que les épaules sont au cinquième rang des sièges de lésions (déchirures, foulures et entorses) dues au travail avec un taux d'incidence de 9,05 cas par 10 000 travailleurs annuellement et un nombre médian de jours d'absence de 7. Quant aux poignets, ils sont au dixième rang en termes de fréquence, mais le nombre médian de jours d'absence est de 30. Ces statistiques ne permettent pas d'isoler les travailleurs des Services à l'automobile de l'ensemble, mais montrent quand même l'importance de ce type de lésion dans la population active au travail. Punnett et al. (2000) ont étudié (79 travailleurs et 124 référents) les problèmes aux épaules et le stress postural sur les chaînes de montage de véhicules automobiles. Les résultats montrent que 41% des travailleurs de l'enquête exercent des flexions ou abductions du bras droit au-delà de 90 degrés, et de 35% pour le bras gauche. Le couple maximum mesuré au niveau des épaules étant considéré comme peu élevé, on retient que ce sont les flexions et abductions qui sont les principaux facteurs de risque. Selon cette étude, ce risque augmente avec la durée du cycle de travail.

Le travail avec les bras au-dessus des épaules représente un facteur de risque intervenant dans l'apparition des TMS (Punnett et al., 2002; Nussbaum et al., 2001; Grieco et al., 1998 et Bystrom et al., 1995). Bien que ces recherches concernent les facteurs de risque causant l'apparition de TMS-MS induits par une surcharge, le même résultat est à prévoir pour un travail statique. La tension créée par une contraction isométrique prolongée (effort statique) provoque de la fatigue musculaire et une ischémie qui peuvent altérer les tendons. D'un point de vue physiologique, le travail statique, réalisé avec de mauvaises postures, peut particulièrement être considéré comme nuisible car le manque de vascularisation des tissus musculaires peut accentuer l'inflammation tendineuse lors d'un effort (Nieminen et Hameenoja, 1995). En mécanique automobile, les

contraintes musculaires statiques sont souvent accentuées par l'utilisation d'outils vibrants qui augmentent les niveaux d'activité musculaire et génèrent des contre-coups (Potvin et al., 2004).

2.1.1.1 Mouvements répétitifs et postures statiques

Les troubles musculo-squelettiques (TMS) surviennent lorsque les segments corporels sont soumis à des facteurs de risques. Un travail répétitif, demandant une grande force physique ou un effort soutenu avec de mauvaises postures, peut développer des TMS tels que les tendinites, le syndrome du tunnel carpien ainsi que les blessures chroniques (Armstrong et Silverstein, 1987). Une articulation peut alors être affectée par son activation et son positionnement mais aussi par l'activation et le positionnement d'un segment sous-jacent. Par exemple, l'articulation de l'épaule est influencée par le segment de l'avant-bras, dépendamment de sa position dans l'espace. De ce fait, lorsque ce segment est projeté vers l'avant, l'amplitude du mouvement articulaire à l'épaule augmente. Une charge supplémentaire est appliquée à l'épaule due à l'éloignement de l'avant-bras, ce qui peut contribuer à l'augmentation de la contrainte musculaire.

L'apparition d'une lésion associée à des mouvements répétitifs et à des périodes de repos insuffisantes est un processus plus long, qui peut varier de quelques heures à plusieurs années. En fait, il s'agit dans ce cas-ci d'une force externe qui devrait être inférieure au seuil de tolérance des tissus dans une condition normale. Cependant, en raison d'une activité répétée, jumelée à un repos insuffisant, le seuil de tolérance des tissus diminue graduellement jusqu'au moment où il devient inférieur à la force externe (McGill, 1997). Ce repos insuffisant pourrait être conséquent à une accumulation de fatigue sur une journée de travail, une semaine, quelques mois ou même quelques années. Lors du boulonnage à la clé à chocs pneumatique, le problème pourrait provenir du boulonnage de nombreux écrous sur une période prolongée associé à une période de repos insuffisante. Une telle situation s'observe sur le terrain en période de changements de pneus, en automne et au printemps.

Pour les situations avec une forte composante de travail musculaire statique, l'apparition de TMS suit un processus similaire aux mouvements répétitifs. C'est un processus où une force externe, qui est inférieure au seuil de tolérance des tissus, est maintenue de manière permanente sur une période de temps prolongée. Le seuil de tolérance des tissus diminue rapidement après un certain temps, et ce, jusqu'au moment où le seuil de tolérance devient inférieur à la force externe (McGill, 1997). La baisse du seuil de tolérance des tissus s'explique par une diminution de l'irrigation sanguine, qui elle est induite par une contraction musculaire isométrique servant à maintenir la posture et l'outil. (Jarvholm et al., 1989).

Or, lorsque la position articulaire ainsi que la tension statique interviennent simultanément au cours d'un effort, le tendon peut être altéré (Sommerich et al., 1993). Comme ce dernier est peu vascularisé, le manque d'oxygène occasionné par le maintien d'une posture (effort statique) peut

réduire la résistance des tissus. La circulation sanguine dans le tendon est inversement proportionnelle à la tension musculaire et diminue lorsque la tension musculaire augmente (Hagberg et al., 1995 ; Cailliet, 1981). Le tendon est alors privé d'éléments nécessaires pour maintenir son équilibre homéostatique. Par exemple, le manque d'approvisionnement en oxygène peut provoquer la mort cellulaire et ainsi fragiliser le tendon. Une fois cette situation atteinte, tout effort statique peut entraîner l'augmentation de l'inflammation du tendon que l'on nomme tendinite.

Sjogaard et al. (1986) ont trouvé une augmentation significative dans la perception de la fatigue, sur un effort de longue durée, lorsque le pourcentage d'une contraction volontaire maximum d'un muscle (%CVM) atteint 5%. Ils ont déterminé, par la même occasion, la limite d'endurance musculaire comme étant 10% d'une CVM pour un même type d'effort prolongé. En dessous d'un %CVM de 10%, le débit sanguin est suffisamment élevé pour contribuer au bon fonctionnement du muscle. Au-delà de 10%, la hausse du recrutement de fibres musculaires provoque l'augmentation de la tension dans le muscle, nuisant ainsi à l'irrigation sanguine et causer de la fatigue. Bien que ces pourcentages peuvent varier légèrement d'un muscle, la fatigue musculaire a depuis longtemps été identifiée comme contributive au développement des TMS (Chaffin, 1973). Il n'est pas à l'avantage d'un peintre automobile, par exemple, de travailler dans des conditions favorisant la fatigue issue d'un effort statique prolongé.

En outre, la charge statique s'explique aussi par l'augmentation de la pression intramusculaire (PIM). Pour reprendre l'exemple précédent, un peintre peut se retrouver avec le membre supérieur au-dessus de l'horizontale lorsqu'il travaille sur une surface élevée, comme le toit d'un véhicule. En effet, la hauteur du plan de travail influence directement la position articulaire du membre supérieur. Dans une telle position les muscles responsables de la flexion sont tellement raccourcis qu'ils doivent utiliser beaucoup de fibres pour développer la tension nécessaire au maintien de la posture. Dans cette situation, l'utilisation d'un plus grand nombre de fibres musculaires aura pour effet d'épuiser rapidement l'oxygène et les réserves énergétiques disponibles localement. Le renouvellement de ces réserves dépendra en grande partie du niveau de tension que les muscles devront exercer pour maintenir la posture, car il est en relation directe avec celui de la PIM (Jarvholm et al., 1989). Au-dessus du seuil critique de 30 mm Hg de PIM, il se produit une diminution du drainage de retour et le liquide interstitiel, qui facilite l'échange des nutriments, est expulsé hors de son champ d'action entre les capillaires sanguins et les cellules (French et Price, 1962 ; Godon et Crielaard, 2005). Lorsque ce phénomène se produit, seul l'arrêt de l'effort peut provoquer un retour à la normale progressive des pressions. L'augmentation de la PIM est proportionnelle à la hausse des valeurs électromyographiques (EMG). En 1989, Jarvholm et al. ont en effet observé la corrélation entre les moyennes de la PIM et les valeurs normalisées d'EMG pour le muscle sus-épineux selon cinq angles différents à l'épaule.

La présence de la charge statique imposée aux muscles chez les travailleurs des Services à l'automobile pourrait bien expliquer certains problèmes recensés dans la littérature scientifique. Par exemple, Torp et al. (1996) rapportent, sur un total de 103 mécaniciens ayant répondu à un questionnaire de symptômes, que 62 % souffraient de douleur au cou, 52 % aux épaules et 34 % aux poignets et aux mains. De plus, parmi les travailleurs souffrant de douleur aux épaules, 43 % d'entre eux considéraient cette douleur comme étant la plus problématique lorsqu'ils étaient au travail. Selon ces chercheurs, l'apparition de douleur au niveau des épaules est induite par les postures de travail où les bras sont situés au-dessus des épaules.

2.1.1.2 Les efforts excentriques

Outre les postures inadéquates, l'apparition et le développement de TMS-MS mettraient également en cause les situations où les muscles résistent à l'allongement de leurs fibres : les efforts excentriques. Les efforts excentriques sont en lien avec les contrecoups et les freinages rapides que provoquent les petits outils pneumatiques énergisés. Lieber et Friden (1999) expliquent que des efforts excentriques répétés, par exemple l'activité musculaire lors d'un mouvement est freiné brusquement, produisent des microdéchirures. Ces dernières pourraient élever le risque d'apparition de lésions ou de TMS-MS si une période adéquate de récupération n'est pas appliquée entre les périodes d'efforts excentriques.

Pour comprendre les facteurs de risque qui sont associés à cette situation, il est important de connaître l'impact des sollicitations musculaires excentriques répétées. Pour plusieurs chercheurs, les contractions musculaires excentriques répétées peuvent avoir des effets négatifs comme l'apparition de courbatures (Dolezal et al., 2000; Talag, 1973 et Komi et Buskirk, 1972) et des dommages aux structures des muscles impliqués (Dolezal et al., 2000; Boppart et al., 1999; Clarkson et Sayers 1999 et Brown et al., 1997). Pour les outils pneumatiques rotatifs, l'importance de la magnitude d'une contraction musculaire excentrique est proportionnelle à la magnitude de la force en rotation de la poignée de l'outil et à l'amplitude de son déplacement (Lin et al., 2003). Plusieurs facteurs en lien avec les efforts excentriques, comme un haut niveau de force et une grande vélocité, contribueraient à l'apparition de microdéchirures musculaires lorsque ce type d'effort est souvent répété. Selon Lieber et Friden (1999), les efforts musculaires excentriques causent plus de traumatismes musculaires que toutes autres formes d'effort.

2.1.1.3 La vibration

L'effet des vibrations sur le travail manuel constitue un domaine de recherche en soi. Armstrong et al (1987) ont signalé, dès 1987, la difficulté de déterminer la contribution relative de la force et de la vibration à la genèse des TMS lors d'études épidémiologiques. D'une part, les vibrations peuvent stimuler la contraction musculaire par le biais du réflexe tonique vibratoire. De plus, les

vibrations diminuent la sensibilité des récepteurs nerveux tactiles, ce qui influence la quantité de force musculaire déployée pour tenir un objet vibrant.

Dans plusieurs secteurs comme celui des services à l'automobile, la vibration est principalement associée à l'utilisation des outils énergisés (Barregard, 2003; Moen et al., 1995 et Musson et al., 1989). À partir d'un échantillon de 42 mécaniciens provenant de sept garages et en utilisant le modèle d'étude de la fréquence (*frequency study model*), Hansson et al. (1987) sont arrivés à la conclusion que les mécaniciens sont exposés à la vibration d'outils énergisés pour une période allant de 22 à 70 minutes par quart de travail. La vibration est définie par Musson et al. (1998) comme étant essentiellement une série d'impacts rapides transmis de l'outil aux mains du travailleur par la poignée. La vibration induit un mouvement oscillatoire des segments impliqués dans le maintien de l'outil.

De nombreux chercheurs ont identifié que la vibration dans le milieu de la mécanique automobile est un facteur de risque important dans le phénomène d'apparition de TMS-MS. Parmi les études réalisées dans ce milieu, Hansson et al. (1987) indiquent que la vibration est responsable de l'apparition du phénomène de Raynaud, mieux connu dans le milieu de la santé et de la sécurité au travail sous le nom du « *syndrome des doigts blancs* ». De plus, la vibration causerait des dommages fonctionnels aux nerfs périphériques, os, articulations, muscles et tendons.

Selon plusieurs chercheurs (Hagberg et al., 1995; Wieslander et al., 1989 et Armstrong et al., 1987), les mécaniciens peuvent être considérés comme une population à risque de développer le syndrome du tunnel carpien en raison de l'exposition à la vibration et aux efforts musculaires intenses et répétés réalisés avec le poignet fléchi ou en hyperextension. Ils sont aussi à risque de développer une thrombose artérielle ulnaire en raison de l'exposition à la vibration et au martèlement manuel. Pour Armstrong et al. (1987), l'exposition à la vibration serait aussi la cause de l'apparition de ténosynovites et de tendinites au niveau des membres supérieurs. La répétition de mouvements en pronation et en supination, ainsi que l'effort important lors du boulonnage avec une clé à chocs pneumatique, seraient mis en cause dans l'apparition d'épicondylites latérales et médiales (épitrochléite). De plus selon Moen et al. (1995), qui ont interrogé au moyen d'un questionnaire 172 mécaniciens ayant une moyenne de quatorze années d'expérience, le syndrome de Raynaud et la paresthésie seraient présents dans le milieu de la mécanique automobile. Dans la présente étude, trois types d'outils énergisés seront utilisés: les clés à percussion pneumatiques, les ponceuses rotatives pneumatiques et les pistolets à peinture pour reproduire différentes conditions de travail.

3. METHODOLOGIE GENERALE

3.1 Sélection des sujets

Les sujets ont été sélectionnés parmi les candidats recrutés par affichage chez le personnel et les étudiants de l'UQAM. Ils ont tous été rémunérés selon le taux horaire de l'institution et ils ont signé un formulaire de consentement. Aucun d'entre eux ne possédait d'expérience préalable relative aux différentes tâches à réaliser avec des outils pneumatiques (boulonnage, ponçage et peinture à l'atomiseur). Ils ont participé à une session de formation préalable, et ont bénéficié de temps pour se familiariser avec l'utilisation des outils.

3.2 Électromyographie (EMG)

Pour les quatre volets de l'étude, l'EMG fût utilisée pour recueillir le niveau d'activité électrique produit par les muscles évalués. Avant de poser les capteurs (électrodes), un gel abrasif (Nuprep) était frotté sur la peau afin d'enlever les particules pouvant nuire à la transmission des signaux. La peau était ensuite nettoyée à l'aide d'un tampon alcoolisé. Toute pilosité était enlevée à l'aide d'un rasoir. Des électrodes de surface préamplifiées (Delsys X-1000) étaient ensuite placées sur la partie charnue des muscles choisis. Une électrode supplémentaire, pour la mise à la terre, était enfin placée sur une partie osseuse du corps, habituellement le tibia. Les signaux analogiques recueillis par les électrodes étaient acheminés vers un convertisseur analogique/numérique et traités avec le logiciel « DasyLab » paramétré pour une fréquence d'échantillonnage de 1000 Hz, et une bande passante de 20 à 350Hz pour filtrer les signaux externes au spectre du signal EMG.

Une fois enregistrés, les signaux EMG étaient rectifiés et filtrés (low pass – Butterworth) à une fréquence de 4 Hz afin d'obtenir une enveloppe linéaire du signal (Winter, 2005). Les valeurs EMG étaient ensuite transformées en pourcentage de la contraction volontaire maximale (%CVM). À la fin de chaque séance de prise de données, chaque sujet devait effectuer des contractions musculaires isométriques maximales (CVM) de chaque muscle évalué pour être en mesure de transformer les valeurs d'EMG recueillies durant l'expérimentation en pourcentage de la CVM. L'équation suivante présente la formule qui a été utilisée :

$$\% \text{ CVM} = \frac{\text{Valeur EMG mesurée pendant le travail}}{\text{Valeur EMG mesurée pendant la CVM}} \times 100$$

Les tests de CVM étaient effectués à la fin de l'expérimentation afin de diminuer les risques de fatigue, laquelle risquait de biaiser les résultats des différentes conditions de travail exécutées. Le test d'effort maximal consistait en un effort statique d'environ 3 à 4 secondes contre une résistance qui était appliquée sur les différents segments étudiés. La sollicitation musculaire se faisait graduellement afin d'atteindre la capacité maximale. Au cours de cet effort, chaque muscle a été évalué selon sa fonction principale. Deux essais ont été effectués afin de conserver

la valeur la plus élevée obtenue pour les besoins de l'analyse. Enfin, les données EMG étaient traitées avec le logiciel de traitement du signal « DasyLab ». Le tableau 1 montre la liste des muscles utilisés selon certains volets de cette étude.

Tableau 1 : Liste des muscles étudiés lors des différents volets de l'étude et leurs principales fonctions

Trapèze supérieur	Élévation de l'épaule
Deltoïde antérieur	Flexion de l'épaule, flexion horizontale de l'épaule
Deltoïde médian	Abduction de l'épaule
Deltoïde postérieur	Extension de l'épaule, adduction de l'épaule
Grand pectoral	Flexion horizontale de l'épaule, adduction de l'épaule
Grand dorsal	Extension horizontale de l'épaule, adduction de l'épaule
Biceps Brachial	Flexion du coude, flexion de l'épaule
Triceps brachial	Extension du coude, extension de l'épaule
Extenseur commun des doigts	Extension des doigts, extension du poignet
Extenseur radial du carpe	Extension du poignet, abducteur du poignet
Fléchisseur superficiel des doigts	Flexion des doigts, flexion du poignet
Fléchisseur ulnaire du carpe	Flexion du poignet, adducteur du poignet

3.3 Perception de l'effort

Immédiatement après chaque essai des expérimentations des volets II, III et IV, les sujets devaient évaluer le niveau d'effort ressenti sur une échelle de Borg de 1 à 10. Cette échelle était placée sur un panneau à la vue du participant de manière à ce qu'il puisse mentionner son choix de réponse à l'expérimentateur. Les sujets expérimentaux étaient donc en mesure d'évaluer la condition à partir de leur perception subjective de l'effort. Donc, après la réalisation de chaque condition expérimentale, les sujets devaient identifier leur niveau d'effort en répondant à la consigne : « Sur une échelle de 1 à 10, indiquez le niveau d'effort que vous avez ressenti en faisant cette tâche, le niveau 1 correspondant à un repos total et le niveau 10, à une situation où vous êtes incapable de faire la tâche ». Une échelle psychophysique similaire a déjà été utilisée pour mesurer les contraintes aux membres supérieurs lors de l'utilisation des pistolets à peinture (Lee et al. 1997). Or, comme le mentionne Stuart-Buttle (1994), la douleur et l'inconfort sont les indicateurs naturels du corps.

3.4 Analyses cinématiques

Une lumière rouge a été installée sur le montage de manière à synchroniser l'enregistrement de l'activité musculaire avec les images vidéo. Un signal, branché à la lumière, fût enregistré au début de l'acquisition pendant que les caméras (Sony HDRCX110) captaient le rayonnement lumineux au même moment. Pour l'enregistrement des données cinématiques, deux caméras

furent utilisées. Une première caméra était placée dans le plan sagittal afin d'observer la flexion au coude et à l'épaule du sujet. La deuxième, quant à elle, était placée au-dessus du sujet (plan horizontal) de manière à capter les flexions horizontales de l'épaule lors du balayement d'une grande surface. Ces caméras ont permis d'obtenir l'ensemble des mouvements réalisés par les sujets durant les essais expérimentaux. L'utilisation de la cinématique permettait principalement, à l'aide d'une bande de temps, d'associer les valeurs EMG recueillies aux activités correspondantes. Afin de conserver le même repère anatomique durant toute l'expérimentation, le sujet a porté des lumières (DEL) aux articulations. Afin d'obtenir des angles relatifs aux membres supérieurs, les lumières étaient localisées à la hanche, à l'épaule, au coude, au poignet et sur la jointure du majeur. L'analyse des données cinématiques a été réalisée à l'aide du logiciel MaxTraç. Les résultats ont ainsi été traités afin de permettre une mesure des angles absolus et relatifs à l'épaule, au coude et au poignet pour certains volets.

3.5 Moments de force exercés par les outils et les postures

Pour les volets impliquant l'utilisation d'outils pneumatiques, le moment de force sur la main était calculé au niveau de la prise avec un dispositif utilisé lors de l'étude exploratoire sur le terrain (Marchand et Giguère 2010). Ces valeurs de moments de force étaient ajoutées à celles mesurées par le logiciel 3D SSPP de l'Université du Michigan au niveau du poignet, du coude et de l'épaule. Ce logiciel calculait les paramètres anthropométriques (masse, longueur et la localisation du centre de masse des segments) des membres supérieurs à partir du poids et de la taille du sujet. Ces valeurs comportent donc une certaine imprécision puisqu'elles sont estimées à partir des tables anthropométriques.

4. VOLET I : CONTRAINTES PHYSIQUES ASSOCIEES A DIFFERENTES POSITIONS DE L'EPAULE

4.1 Problématique

Les activités de travail observées dans le secteur de l'automobile ont comme caractéristique commune d'imposer une charge statique sur les membres supérieurs (Marchand et Giguère, 2010). Lorsqu'une posture, ou encore la tenue d'un outil, implique que les muscles doivent développer une tension soutenue et prolongée, une charge statique est présente. De telles situations peuvent surcharger les structures musculaires impliquées même à un niveau de sollicitation relativement bas (Carter et Banister, 1994, Järvholm *et al.*, 1998, Kadefors *et al.*, 1999, Sjogaard *et al.*, 1988). Le problème associé à ce type de contraction est la perturbation de la circulation sanguine qui peut causer une apparition de la fatigue musculaire précoce et surcharger les structures impliquées. L'importance de cette charge statique est fortement influencée par la force de rotation exercée par le poids combiné des segments corporels et des outils qui sont maintenus loin du corps. Les deux autres facteurs qui influencent le niveau de sollicitation des muscles agonistes sont l'importance de leur raccourcissement (Gowitzke et Milner, 1980) et la tension passive exercée par les muscles antagonistes qui se retrouvent en situation d'étirement (Marchand *et al.*, 2008). Par exemple, lorsqu'un peintre applique de la peinture avec l'atomiseur sur le toit de la voiture, la flexion à l'épaule est souvent très importante et les muscles fléchisseurs de l'épaule doivent utiliser plus d'énergie pour produire la tension musculaire requise.

Les moyens utilisés en ergonomie pour quantifier ou pondérer la pénibilité des postures des membres supérieurs sont très variés (Kuorinka & Forcier, 1995). Certains intervenants utilisent des grilles d'analyse posturale validées, basées sur l'observation visuelle ou vidéo (RULA, OREGÉ, OWAS, QEC, etc.), des analyses psychophysiques basées sur la perception de mots-clés signifiants (effort, confort, maniabilité, etc.) ou des mesures dites plus objectives des contraintes musculaires comme l'électromyographie (EMG) ou le calcul des moments de force articulaires. Mise à part l'EMG, il semble que la plupart de ces mesures ne démontrent pas vraiment l'effet négatif du statisme de certaines postures adoptées par les travailleurs. L'effet de ce type de charge sur les structures musculosquelettiques serait notamment modulé par i) la durée de son application, ii) son intensité et, iii) la présence de périodes de repos. Le niveau de charge statique est principalement relié au degré de non-neutralité posturale adopté par le travailleur. Ces postures contraignantes sont généralement la conséquence de certains éléments du poste de travail, de l'inadéquation de ceux-ci avec les tâches à accomplir ainsi que des habitudes et techniques apprises ou acquises par les travailleurs.

L'objectif de ce premier volet de l'étude était de tenter de comprendre pourquoi les travailleurs observés lors de l'étude exploratoire du secteur automobile (Marchand *et al.*, 2010) ressentaient rapidement des inconforts à l'épaule lorsque la tâche imposait de maintenir une flexion relative

importante à cette articulation. Ce volet devait démontrer que le niveau des contraintes physiques évaluées avec seulement l'analyse des moments de force (e.g. 3D SSPP), pourrait ne pas représenter avec justesse, l'effort réel déployé par les travailleurs pour maintenir ces postures.

4.2 Méthodologie spécifique

4.2.1 Sujets

Les sujets étaient 19 étudiants inscrits au programme de formation en kinésiologie de l'UQÀM. Ils étaient exempts de problème musculo-squelettique et participaient sur une base volontaire. Leur âge, taille et poids sont présentés dans le tableau 2.

Tableau 2: La taille, le poids et l'âge des sujets du Volet I

	TAILLE (m)	POIDS (kg)	AGE (années)
Moyenne	1.8	77.3	22.3
Écart-Type	0.09	10.7	2.0
Minimum	1.63	54.5	20.0
Maximum	2.00	92.0	26.0

4.2.2 Conditions expérimentales

Les sujets devaient reproduire les cinq postures présentées à la figure 1 en alignant leur bras avec des segments de référence disposés sur le mur du laboratoire. Ces segments étaient ajustables en hauteur pour s'adapter à l'anthropométrie de chaque sujet. Ces postures devaient être maintenues pour une période de cinq secondes et des périodes de repos de deux minutes, en position assise, étaient allouées entre chaque essai pour permettre la récupération des muscles impliqués. L'ordre de passation de ces différentes postures était aléatoire pour empêcher un effet de séquence expérimentale associable à une fatigue musculaire accumulée. La sollicitation musculaire était mesurée au moyen de l'ÉMG pour trois muscles de l'épaule, soit le deltoïde antérieur, le deltoïde médian et le deltoïde postérieur. Ces valeurs ont ensuite été transformées en %CMV selon la méthode appropriée (voir la méthodologie générale).

Dans un deuxième temps, ces cinq mêmes postures étaient reproduites mais avec le bras maintenu passivement à l'aide d'une sangle placée au niveau du coude. Cette sangle était reliée à un dynamomètre suspendu à une potence pour mesurer la force de rotation exercée par le poids du bras à cette articulation. Cette étape a permis de calculer le moment de force réel imposé à l'épaule (produit de la force mesurée au coude multiplié par la distance mesurée entre le centre de rotation de l'épaule et localisation de la sangle au coude).

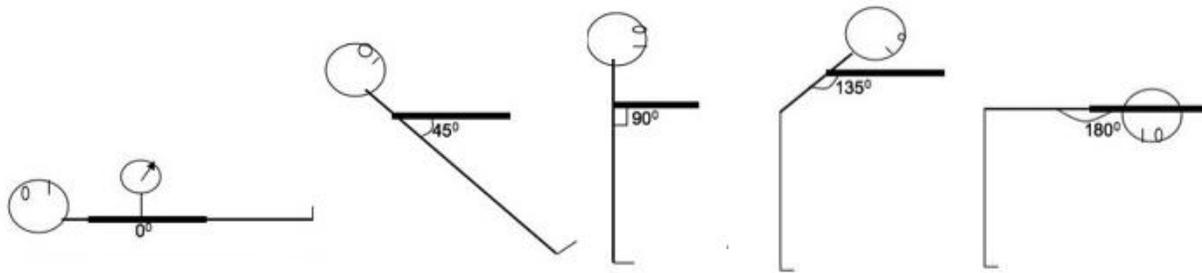


Figure 1: Exemple d'angles relatifs à l'épaule.

4.3 Résultats et discussion

Les figures 2, 3 et 4 décrivent les résultats obtenus pour les trois muscles (deltoïde antérieur, deltoïde médian, deltoïde postérieur) en fonction de l'angle relatif à l'épaule. Selon ces trois figures, l'augmentation des angles relatifs entre le tronc et le bras entraînerait des changements importants des %CMV pour ces trois muscles. Ces résultats démontrent que les ces trois muscles connaissent une augmentation constante de leur sollicitation musculaire en fonction de 0 à 135 degrés, et que seul le deltoïde antérieur présente une baisse à 180 degrés d'angle relatif. Ces résultats seraient associés au fait que la flexion importante de l'épaule implique un mouvement de l'omoplate (rotation latérale) qui a pour effet de transposer la charge aux muscles abducteurs de l'épaule. Ce qui explique le %CMV moyen élevé (27 %) obtenu pour le deltoïde médian à 180 degrés (figure 3) et l'implication du deltoïde postérieur comme agoniste lorsque la flexion relative de l'épaule est aussi importante (figure 4).

Les changements d'angles relatifs causent donc une augmentation importante de la demande musculaire à l'épaule. Selon la relation tension-longueur des muscles, une bonne partie de cette augmentation serait associée au recrutement d'un nombre de fibres musculaires de plus en plus élevé pour pallier à la perte de tension induite par le raccourcissement musculaire (Gowitzke et Milner, 1980). Comme l'EMG est une mesure représentative de la dépense énergétique musculaire locale (Cnockaert et Goubel, 1975), il apparaît évident que les postures de travail où l'on retrouve des angles relatifs importants à épaule peuvent conduire rapidement à des inconforts ou à une apparition précoce de la fatigue musculaire en condition statique. Toutefois, cette augmentation semble trop élevée pour l'associer uniquement au raccourcissement des muscles agonistes. Il devient donc important de vérifier si le moment de force exercé sur l'épaule est le même pour les cinq postures utilisées. En effet, comme l'angle absolu à l'épaule est le même pour toutes ces positions, l'évaluation de cet indice biomécanique serait le même en utilisant un logiciel tel que le 3D SSPP de l'Université du Michigan.

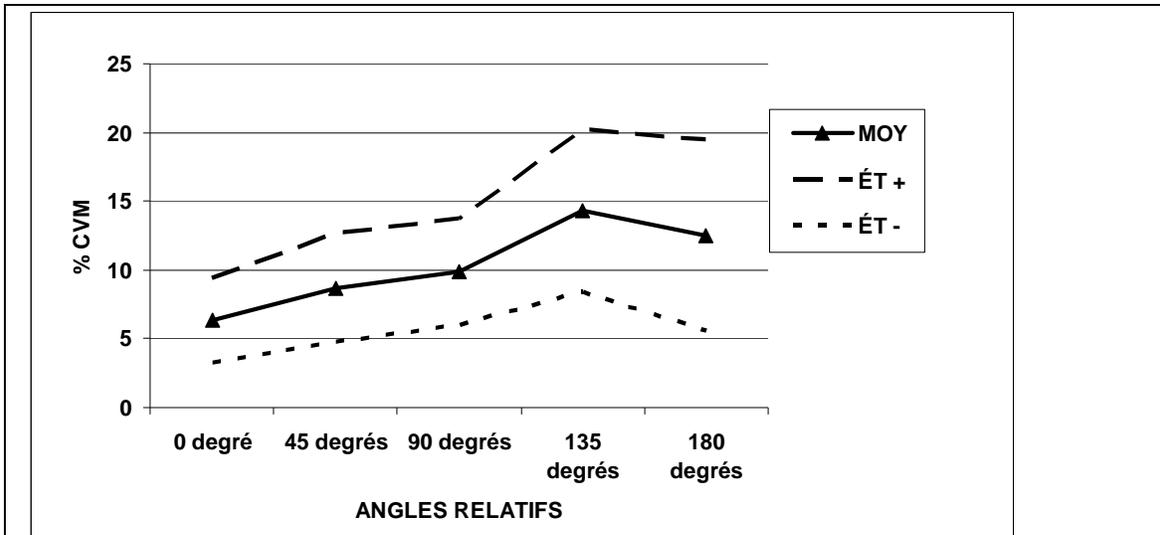


Figure 2 : Pourcentage moyen de la contraction volontaire maximale du deltoïde antérieur en fonction de l'angle relatif avec les courbes d'écart-type.

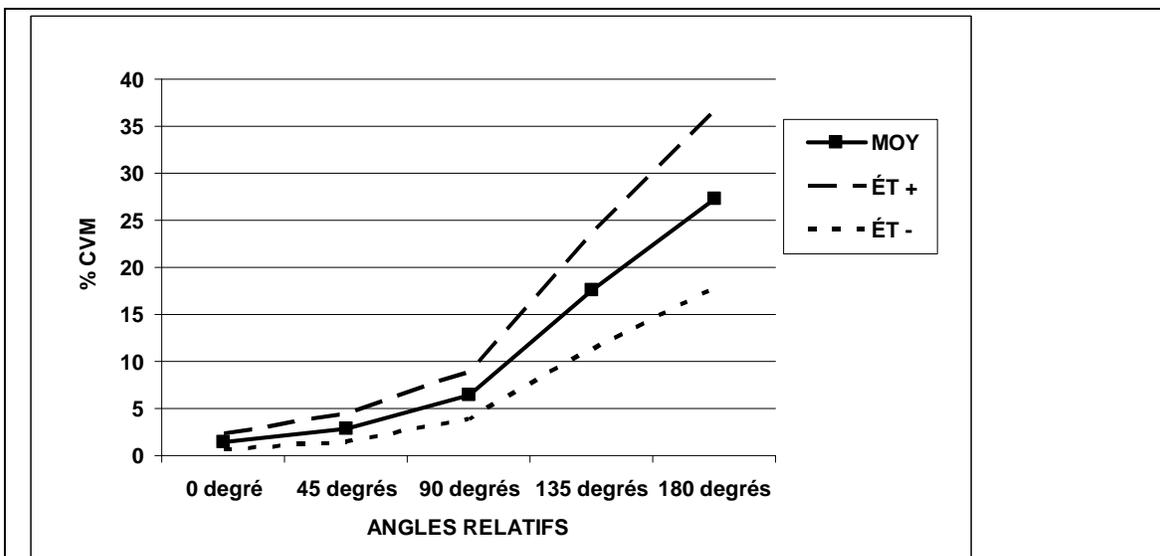
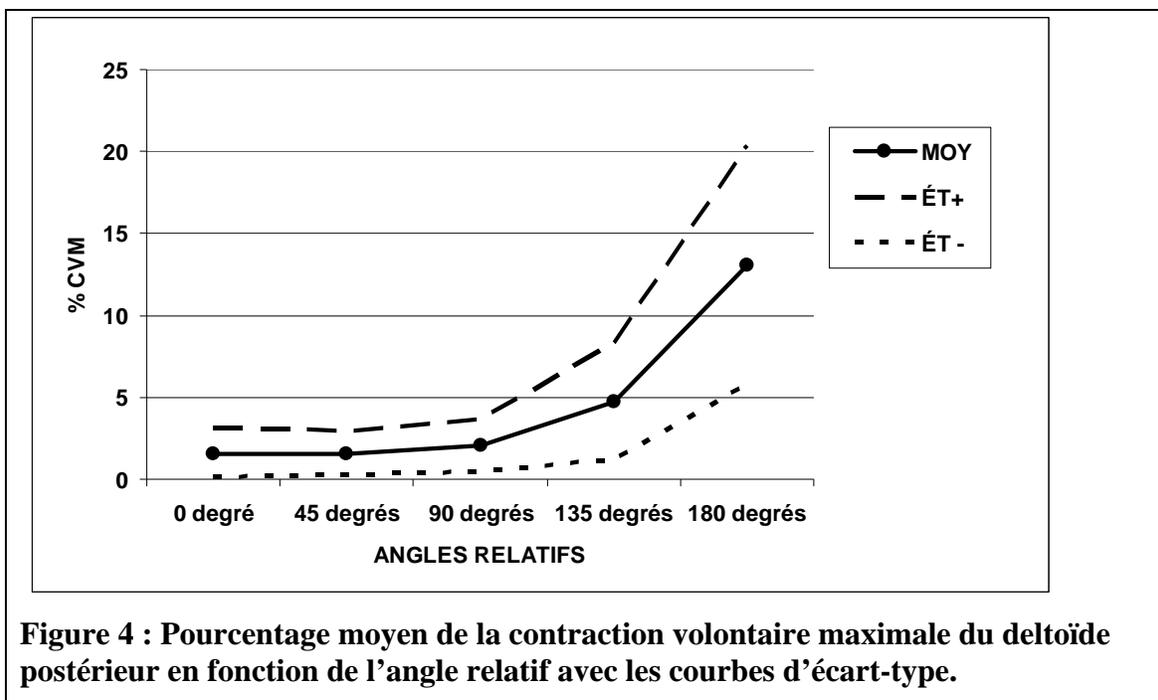
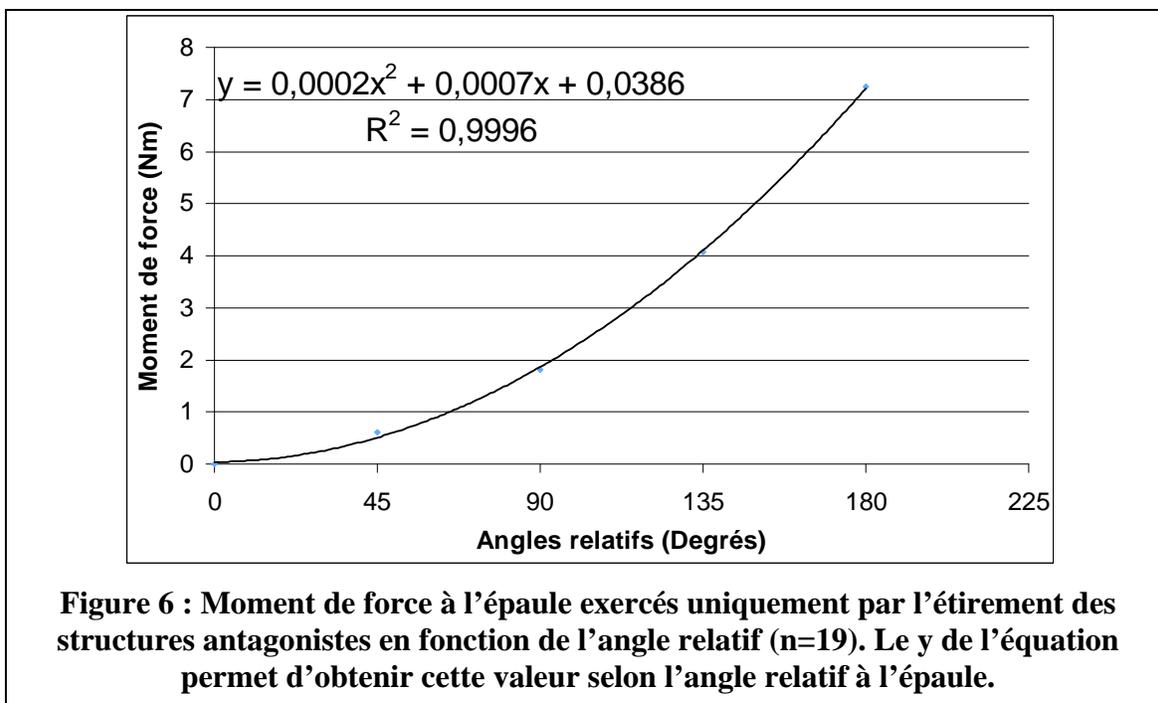
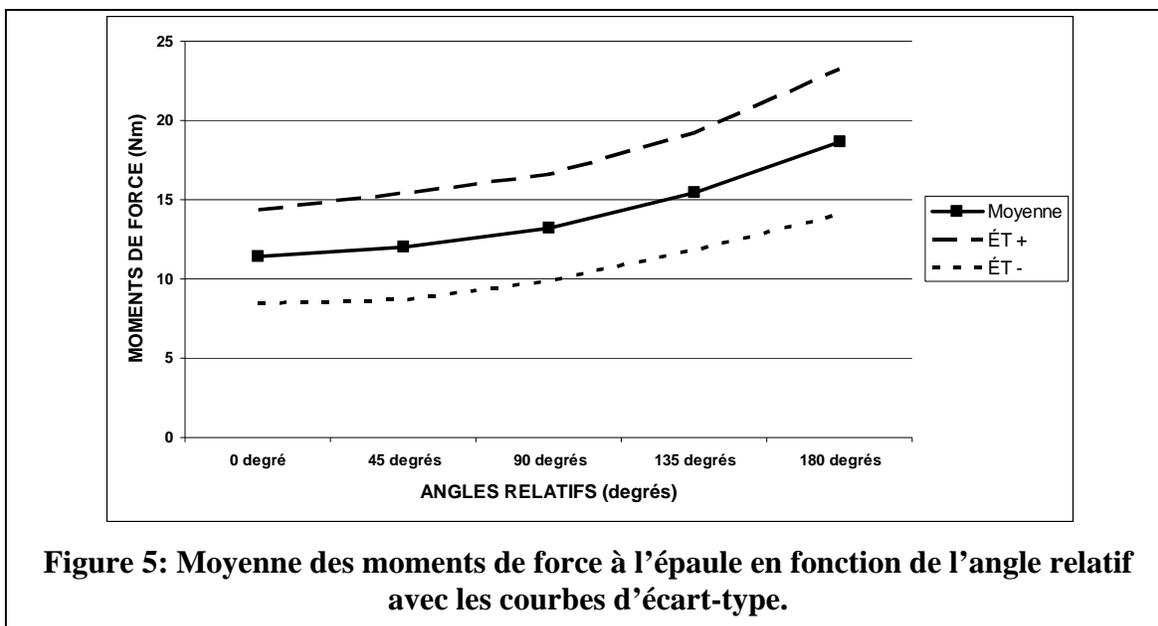


Figure 3 : Pourcentage moyen de la contraction volontaire maximale du deltoïde médian en fonction de l'angle relatif avec les courbes d'écart-type.

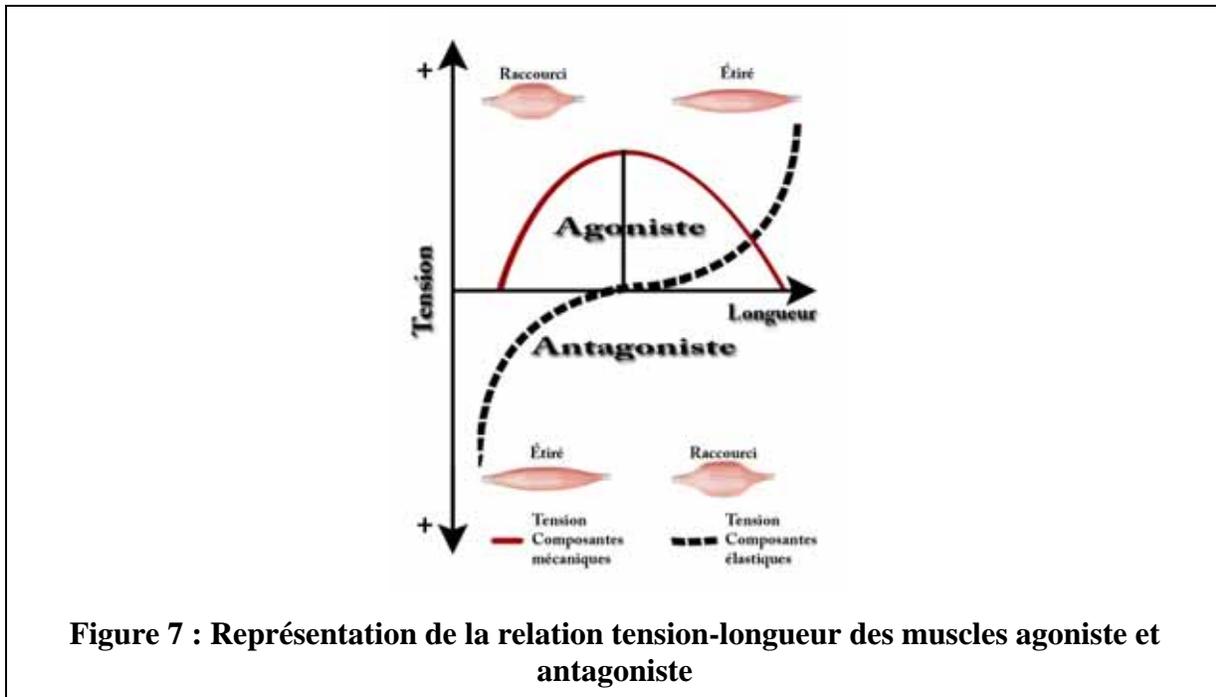


Les résultats présentés à la figure 5 montrent que la moyenne des moments de force réels exercés à l'épaule change en fonction de l'angle relatif. En effet, bien que le bras soit soutenu passivement par une sangle lors de ces tests, le moment de force réel à l'épaule augmente selon une tendance exponentielle à mesure que la flexion relative de l'épaule devient plus prononcée. Dans ce protocole, l'augmentation de la force de rotation exercée à l'épaule serait directement reliée à la tension passive produite par les structures antagonistes. La figure 6 permet d'isoler cette augmentation de la tension produite par ces structures en fonction de l'angle relatif à l'épaule. Le résultat de l'analyse de régression réalisée sur cette courbe démontre le lien important ($R^2= 0,99$) qui existe entre ces deux variables. Lorsque la flexion relative est de 180 degrés, le moment de force moyen augmente de 7,3 Nm par rapport à celle de 0 degré. Ces résultats suggèrent que l'analyse conventionnelle des moments de force au niveau des articulations, avec des méthodes ou des logiciels qui ne tiennent compte que des angles absolus, donne une sous-estimation des contraintes réelles exercées à l'épaule lorsque l'angle relatif est important.



L'explication des augmentations de la demande musculaire des muscles agonistes et des moments de force réels exercés en fonction de la flexion relative de l'épaule est illustrée à la figure 7. Cette courbe présente la relation tension-longueur qui comporte toutes les composantes précédemment mentionnées. Le pouvoir contractile du muscle (fibres musculaires) agoniste est représenté par la courbe en trait plein. Tandis que la courbe de la tension passive (éléments élastiques) est représentée par la courbe du haut en pointillé et débute lorsque la longueur du

muscle dépasse la longueur de repos (trait noir vertical). Dans cette figure, la tension passive exercée par un muscle antagoniste est représentée dans la partie inférieure. Elle devient effective généralement, lorsque le muscle agoniste commence à se raccourcir et que celui-ci perd de sa capacité à générer de la tension. Dans une situation où les muscles agonistes sont raccourcis et que les antagonistes sont étirés (par exemple, une flexion relative de l'épaule à 180 degrés) le travailleur devra recruter beaucoup d'unités motrices pour produire la tension nécessaire au maintien de la posture via les muscles agonistes. Ce sont principalement ces deux phénomènes qui expliquent l'augmentation importante du %CVM des muscles de l'épaule évalués.



En conclusion, l'importance de la flexion relative du bras influence directement l'amplitude des contraintes musculaires exercées à l'épaule même lorsque charge externe demeure constante. Ces résultats valident les observations réalisées sur le terrain où certaines de ces postures étaient perçues comme demandant un niveau d'effort classé de modéré à élevé, malgré l'absence d'un moment de force important (Marchand et Giguère, 2010). En effet, il semble que la mesure des moments de force ne permet pas, à elle seule, de comprendre l'importance de la sollicitation musculaire engendrée par le maintien prolongé des postures observées. Selon les résultats obtenus, les postures les plus contraignantes pour l'épaule résulteraient d'une position articulaire présentant une combinaison de trois éléments suivants: un moment de force important, des muscles agonistes très raccourcis et des muscles antagonistes étirés, ce qui correspond généralement à un angle relatif très élevé. Ces postures ont été observées pour plusieurs tâches chez les mécaniciens automobiles.

5. VOLET II : CONTRAINTES PHYSIQUES ASSOCIEES A L'ACTIVITE DE BOULONNAGE EN MECANIQUE AUTOMOBILE

5.1 Problématique

L'utilisation d'une clé à chocs pneumatique lors du boulonnage peut produire deux types de contraintes physiques, d'abord celles associées à l'outil lui-même lorsqu'il est activé et ensuite, celles attribuables à la force musculaire générée par l'utilisateur lorsqu'il a l'outil en main, en fonction du positionnement de ses membres supérieurs.

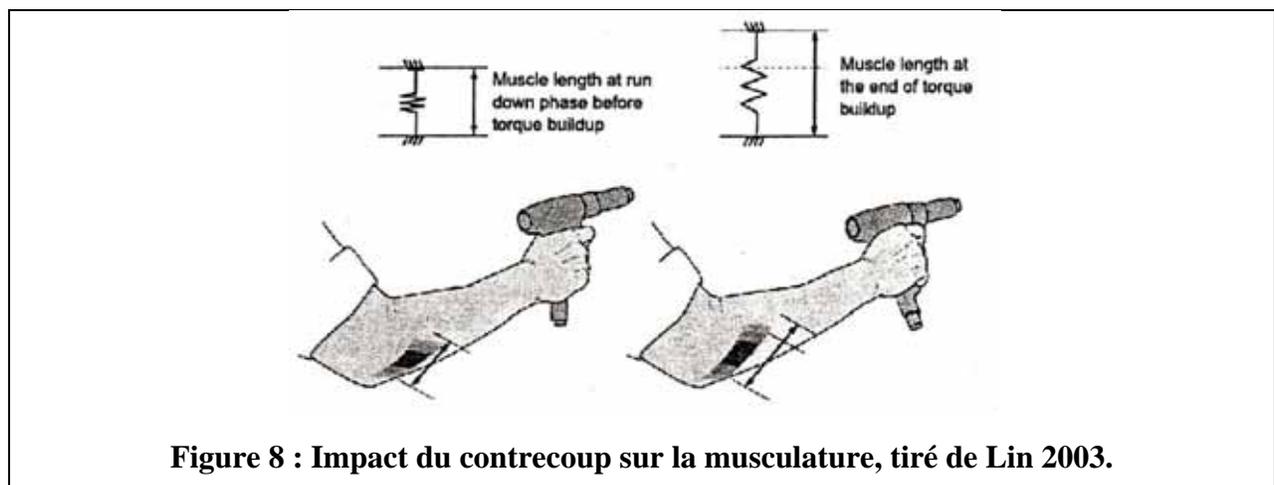
Pour une bonne compréhension de ce volet, il importe de bien pouvoir identifier les différentes phases de l'activation d'un outil afin de comprendre le moment précis où des facteurs de risque sont présents. Radwin et al. (1989) définissent ainsi les quatre phases d'un cycle de boulonnage :

- 1) le prédépart, qui correspond à la période où le travailleur a l'outil dans ses mains, mais sans avoir actionné la détente;
- 2) le boulonnage sans résistance, qui correspond à la période où le travailleur actionne la détente et le boulonnage s'effectue, mais sans résistance;
- 3) le serrage final, qui correspond à la période où le couple augmente constamment jusqu'au serrage final;
- 4) le postarrêt, qui correspond à la période suivant le relâchement de la détente.

Ces 4 phases ont été utilisées, entre autres, par Lin et al. (2003 et 2006) et Forsman et al. (2002). Les contrecoups sont produits par le départ ou l'arrêt soudain de la rotation de l'arbre de transmission de l'outil et agissent sur l'utilisateur et selon le couple de serrage ainsi que par la longueur du manche de l'outil (Radwin et al., 1989). Dans le contexte d'utilisation d'une clé à chocs pneumatique, les contrecoups sont une force de rotation devant être freinée par les muscles de la main et de l'avant-bras. À chaque serrage, il y a présence d'au moins un contrecoup. Lorsque ce dernier est fréquemment répété, il peut être associé à l'apparition de fatigue musculaire et de lésions aux muscles, aux tendons et aux nerfs (Armstrong et al., 1999).

Le contrecoup le plus important s'exerce généralement au moment du serrage final. Selon l'illustration proposée par Lin et al. (2003), le serrage final causerait un étirement des fibres musculaires (voir figure 8). En fait, lors de la phase de boulonnage sans résistance, la longueur du muscle demeure constante mais s'allonge brusquement au début de la phase de serrage. Cet allongement se fait dans le sens contraire de la fonction du muscle. Concrètement, dans le cas d'une personne droitier, il s'agit d'un muscle supinateur, qui, au moment du contrecoup, sera étiré vers un mouvement de pronation alors que les fibres musculaires tentent de maintenir la position fixe. Cet étirement cause donc une phase musculaire excentrique dont l'importance dépend de l'amplitude et de la vitesse du déplacement de la poignée lors du serrage final (Lin et

al., 2006 et Armstrong et al., 1999). Durant cette phase, il y a relation très forte entre l'augmentation de la force de préhension et celle du couple de serrage.



Lors de l'utilisation d'une clé à chocs pneumatique, le temps nécessaire pour atteindre le couple de serrage final est un élément important à considérer au niveau de l'analyse de la contrainte exercée pour les membres supérieurs. En effet, plus le temps pour atteindre le couple de serrage final est long, plus le travailleur devra maintenir la clé à chocs pneumatique en état de marche longtemps. Inversement, plus le temps pour atteindre le couple de serrage final est rapide, moins la durée d'exposition sera importante. (Lin et al., 2006; Forsman et al., 2002; Freivalds et Eklund, 1993 et Radwin et al., 1989). Toutefois, dans ce cas, la vitesse de l'arbre de l'outil, qui est un des facteurs qui influence l'ampleur du contrecoup, augmentera en raison de la diminution du temps pris pour atteindre le couple de serrage final. Ainsi, cette situation impliquera un contrecoup plus important.

Les connaissances scientifiques actuelles ne permettent pas de dire si les stratégies observées sur le terrain par Marchand et Giguère (2010) permettent réellement de diminuer les contraintes physiques pour les membres supérieurs lors du boulonnage à la clé à chocs. En effet, plusieurs équipes de chercheurs ont étudié l'utilisation des clés à chocs pneumatique, mais ces études ont surtout visé leur utilisation en milieu industriel où le couple de serrage maximal était généralement très faible comparativement au secteur des Services à l'automobile. De plus, bien que des études aient tenté de comprendre l'influence du temps pour atteindre le couple de serrage maximal sur la contrainte musculaire, aucune n'a comparé le serrage du même boulon avec des clés à chocs pneumatiques ayant des masses et des puissances différentes permettant une variation du temps pour atteindre le couple de serrage maximal, l'impact de l'inertie de l'outil sur l'amplitude du contrecoup, ni des couples de serrage comparables au boulonnage de la roue d'un véhicule.

Outre les facteurs de risques présentés dans la section 1, on pourrait également ajouter la vibration associée à l'utilisation des outils énergisés (Barregard, 2003; Moen et al., 1995 et Musson et al., 1989). À partir d'un échantillon de 42 mécaniciens provenant de sept garages et en utilisant le modèle d'étude de la fréquence (*frequency study model*), Hansson et al. (1987) sont arrivés à la conclusion que les mécaniciens sont exposés à la vibration d'outils énergisés pour une période allant de 22 à 70 minutes par quart de travail. La vibration est définie par Musson et al. (1998) comme étant essentiellement une série d'impacts rapides transmis de l'outil aux mains du travailleur par la poignée. La vibration induit un mouvement oscillatoire des segments impliqués dans le maintien de l'outil.

De nombreux chercheurs ont identifié que la vibration dans le milieu de la mécanique automobile est un facteur de risque important dans le phénomène d'apparition de TMS-MS. Parmi les études réalisées dans ce milieu, Hansson et al. (1987) indiquent que la vibration est responsable de l'apparition du phénomène de Raynaud, mieux connu dans le milieu de la santé et de la sécurité au travail sous le nom du « *syndrome des doigts blancs* ». De plus, la vibration causerait des dommages fonctionnels aux nerfs périphériques, os, articulations, muscles et tendons.

Enfin, aucune étude expérimentale n'a tenté d'évaluer, à partir d'observation de situations réelles, des stratégies afin de réduire l'impact du contrecoup et de la vibration associés à l'utilisation d'une clé à chocs pneumatique au niveau des membres supérieurs. L'objectif de ce volet est d'identifier les postures du bras, qui permettent de réduire les contraintes musculaires pour les deux plans de travail. Ce volet permettra aussi de quantifier objectivement la charge musculaire imposée aux muscles des membres supérieurs pour les différentes conditions expérimentales (plan de travail, outil, méthode).

5.2 Méthodologie spécifique

5.2.1 Sujets

Le tableau 3 résume les caractéristiques des 13 sujets expérimentaux (12 hommes et 1 femme), tous droitiers, qui ont participé à l'étude.

Tableau 3 : Caractéristiques des sujets du volet II.

	Taille (m)	Poids (kg)	Âge
Moyenne (N = 13)	1,78	74,90	29,54
Écart-type	0,09	10,90	10,26
Minimum	1,69	61,82	20
Maximum	2,01	99,09	53

5.2.2 Conditions expérimentales

Pour chacune des conditions expérimentales, les sujets devaient boulonner successivement 5 écrous à l'aide d'une clé à chocs pneumatique. Les conditions expérimentales ont été définies à partir des observations faites par Giguère et al. (2007) dans le cadre d'une étude exploratoire sur la mécanique automobile (IRSST, 99-548). Les 16 conditions expérimentales se répartissent ainsi :

- Plan de travail (2): horizontal et vertical
- Posture du bras (2): coude en flexion et coude en extension
- Saisie de l'outil (2): avec la main droite et à deux mains
- Type de clé à chocs (2) : « Légère » (CP7740 – 1,55 kg) et « Lourde » (CP 749 - 2,74 kg)

NB – pour les essais sur le plan horizontal, l'ajout d'une rallonge de 45 cm ajoutait 0,8 kg au poids des outils,

La figure 9 résume la combinaison « plan de travail » par « posture du bras ». Chacune des 16 conditions a été effectuée une fois par chaque sujet avec une période de repos de cinq minutes entre les essais. Les conditions expérimentales étaient réalisées dans un ordre aléatoire afin d'empêcher un effet de séquence expérimentale induite par l'apparition d'une fatigue musculaire accumulée.

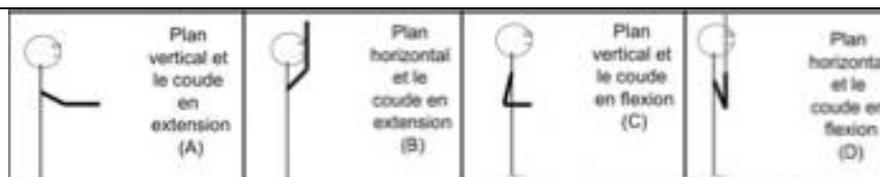


Figure 9 : Les différentes combinaisons de plans de travail et de postures du bras du volet
II



Figure 10 : Utilisation de la rallonge de 45 cm lors du boulonnage sur le plan horizontal avec le coude en flexion.

Le boulonnage était effectué sur un banc d'essai spécialement conçu à cet effet. Construit en extrudés d'aluminium, il était solidement fixé à une structure de l'édifice (figure 10). Il pouvait de plus être ajusté en hauteur en fonction de la taille du sujet afin que les segments corporels soient situés de façon adéquate, soit l'avant-bras positionné perpendiculairement avec le plan de travail. Les sujets avaient reçu la consigne de ne pas prendre appui sur leur bassin, sur leurs cuisses ou sur le membre supérieur non dominant pendant les périodes d'acquisition de données.

Le couple de serrage a été mesuré à l'aide d'un capteur IMADA DL-1M muni d'un adaptateur permettant de serrer avec une douille $\frac{3}{4}$ de pouce. Ce capteur était aussi utilisé pour indiquer au sujet le seuil maximum de serrage de 115 Nm, seuil auquel il devait relâcher la détente de l'outil, via un circuit dédié et un témoin lumineux.

Un accéléromètre (PCB Piezotronics modèle 352c23) était placé à l'extrémité inférieure du manche de l'outil afin de déterminer le début du mouvement en rotation de celui-ci. Les données de l'accéléromètre ont permis de repérer les quatre phases du boulonnage, définies par Radwin et al. (1989), ainsi que celles fournies par le capteur de couple de serrage.

Pour l'analyse des %CVM moyens et maximaux, le « boulonnage » a été défini comme la combinaison des phases de boulonnage sans résistance (2) et de serrage final (3). L'objectif de cette analyse était de mesurer les variables indépendantes, ou l'interaction de celles-ci, qui ont eu un effet significatif sur l'ampleur de la contrainte posturale parmi les neuf muscles instrumentés afin de déterminer quelles sont les conditions expérimentales qui induisent les contraintes musculaires moyennes les moins élevées.

5.2.3 Mesures spécifiques de l'effet de la vibration

Profitant du montage expérimental et de la présence de sujets déjà instrumentés, l'effet de la vibration des outils sur la contrainte musculaire a également été mesuré. Les conditions étaient « outils lourd » et « outil léger », et l'état de marche de l'outil (« en marche » ou « à l'arrêt »). Chacun des sujets adoptait une des conditions expérimentales précédentes, soit : plan vertical, coude fléchi et saisie à une main. La position était maintenue pour une période de cinq secondes. L'analyse de la demande musculaire moyenne (%CVM moyen) a porté sur une durée de deux secondes au centre de la période totale de cinq secondes. Une attention particulière a été portée afin d'éviter que l'activité musculaire associée à la mise en marche de l'outil (contrecoups de départ) ne fasse pas partie de cette période de deux secondes.

5.3 Résultats

5.3.1 Les résultats des variables de contrôles

5.3.1.1 Le couple de serrage final

Le couple de serrage final cible avait été déterminé à 115 Nm. Cependant, l'analyse a porté sur le premier impact où le couple de serrage atteint ou dépasse 115 Nm, ce qui représente une réalité du travail dans le secteur des services à l'automobile. Les résultats révèlent un couple de serrage significativement plus élevé lors de l'utilisation de l'outil lourd comparativement à l'outil léger. En effet, le couple de serrage final a atteint en moyenne 181 Nm lors de l'utilisation de l'outil lourd et 131 Nm dans le cas du léger.

Le type de saisie influence également la valeur maximale de serrage sur le plan vertical. Les résultats indiquent que le couple de serrage final a toujours été plus élevé lors de l'utilisation de l'outil lourd (166 et 176 Nm) tenu à deux mains. L'utilisation de l'outil léger à deux mains induit le couple de serrage final le plus faible (123 Nm).

5.3.1.2 Le nombre de coups pour atteindre le couple de serrage final

Sur le plan horizontal, le nombre de coups nécessaires pour atteindre le couple de serrage de 115 Nm varie également avec le type d'outil et le type de saisie. Ainsi, le boulonnage avec l'outil lourd et le coude fléchi permet d'atteindre 115 Nm en 1,63 coups, tandis que 6,62 coups sont nécessaires avec l'outil léger et le coude en extension. Le nombre de coups pour atteindre 115 Nm a toujours été inférieur avec l'utilisation de l'outil lourd.

Sur le plan vertical, un maximum de 7,32 coups pour atteindre le 115 Nm correspond à la saisie à une main de l'outil. Lorsque l'outil lourd a été tenu à deux mains, le nombre de coups

nécessaires à l'atteinte de l'objectif a été de 2,01. Également ici, le nombre de coups pour atteindre 115 Nm a toujours été inférieur avec l'utilisation de l'outil lourd.

Ces résultats montrent que l'outil lourd devait toujours produire un nombre de coups moindre pour atteindre le couple de serrage final et une durée de serrage finale et de boulonnage plus courte que l'outil léger. Selon les spécifications du manufacturier (Chicago Pneumatic), ces deux outils n'ont pas la même puissance, bien que tous deux soient recommandés pour accomplir les mêmes tâches de travail. Dans les faits, l'outil lourd est reconnu pour être le plus « fort » des deux avec un couple de serrage maximal annoncé de plus de 500 Nm. Cependant, les caractéristiques physiques de l'outil semblent avoir elles aussi une influence sur les variables dépendantes reliées à l'atteinte du couple de serrage final. Il a déjà été présenté par Freivalds et Eklund (1993) que l'inertie de l'outil produit une diminution de l'amplitude du contrecoup. Ainsi, plus un outil est lourd, plus il résistera à la rotation induite par le contrecoup, ce qui permettra de transférer plus de force à l'écrou et atteindre un couple de serrage final plus élevé. Lors de l'utilisation de l'outil léger, la saisie à deux mains ou avec le coude fléchi entraîne ainsi une augmentation de la résistance au contrecoup. Il en résulte une diminution du nombre de coups nécessaires pour atteindre le couple de serrage prédéterminé tout comme une diminution de la durée du serrage finale et du boulonnage.

5.3.2 Les résultats des variables dépendantes reliées à la demande musculaire

L'analyse de l'EMG est présentée en 2 parties, soit 1) - l'analyse du boulonnage sur le plan vertical, et 2) - l'analyse du boulonnage sur le plan horizontal. Les résultats du boulonnage sur les deux plans sont eux-mêmes subdivisés en l'analyse du contrecoup à partir du %CVMmax et l'analyse des contraintes posturales en %CVMmoy.

5.3.2.1 Le plan vertical

Le tableau 4 présente les résultats des effets principaux en %CVM maximaux qui sont statistiquement significatifs ($p < 0,05$) lors du serrage final sur le plan vertical. Ce tableau présente exclusivement des résultats sur lesquels les variables indépendantes ont eu un effet statistiquement significatif. Ceux-ci indiquent que le trapèze supérieur et le deltoïde antérieur ont réagi au positionnement du coude. Pour ces deux muscles, le positionnement du coude en extension a engendré une valeur maximale de 5,43%CVM pour le trapèze supérieur et de 19,55%CVM pour le deltoïde antérieur, tandis qu'en flexion, il a diminué de façon respective à 4,76%CVM et 9,86%CVM. Pour le biceps brachial, la saisie de l'outil à deux mains a induit une diminution de la sollicitation musculaire maximale de 32,75%CVM à 23,99 %CVM lorsque l'on a comparé cette saisie à celle à une main. Le triceps brachial, l'extenseur radial du carpe, le fléchisseur superficiel des doigts et le fléchisseur ulnaire du carpe ont tous réagi aux types de saisie. Pour tous ces muscles, les résultats indiquent que la saisie de l'outil à deux mains a

engendré une demande musculaire maximale inférieure comparativement à la saisie à une main. Pour le fléchisseur ulnaire du carpe, l'utilisation de la clé à chocs légère a induit une demande musculaire maximale de 33,74%CVM, ce qui est statistiquement plus élevé par rapport à celle induite par l'utilisation de l'outil lourd (27,83%CVM).

Tableau 4 : Les %CVMmax obtenus pendant le serrage final sur le plan vertical où l'analyse statistique des effets principaux a présenté une différence significative à $p < 0,05$. (N = 13)

Effets principaux et %CVMax						
	Positionnement du coude (P)		Outil (O)		Type de saisie (T)	
	Extension	Flexion	Lourd	Léger	1 main	2 mains
Trapèze supérieur	5,43	4,76	N/S	N/S	N/S	N/S
Deltoïde antérieur	19,55	9,86	N/S	N/S	N/S	N/S
Deltoïde moyen	N/S	N/S	N/S	N/S	N/S	N/S
Biceps brachial	N/S	N/S	N/S	N/S	32,75	23,99
Triceps brachial	N/S	N/S	N/S	N/S	20,44	12,35
Extenseur radial du carpe	N/S	N/S	N/S	N/S	35,59	31,32
Extenseur com. doigts	N/S	N/S	N/S	N/S	N/S	N/S
Fléchisseur super. doigts	N/S	N/S	N/S	N/S	24,21	21,06
Fléchisseur ulnaire carpe	N/S	N/S	27,83	33,74	32,26	29,31

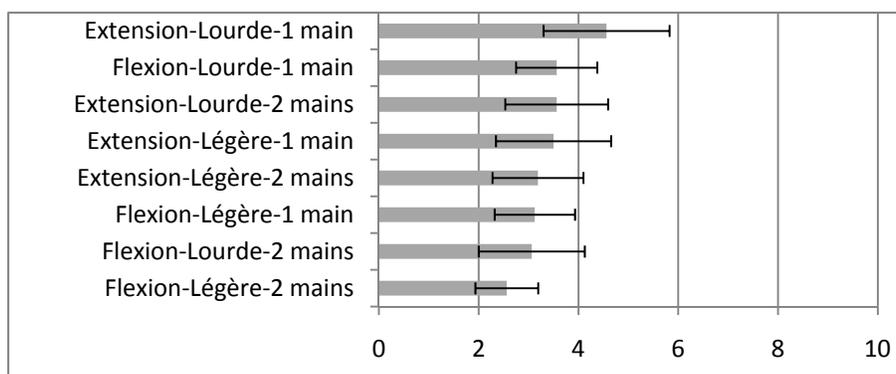
Le tableau 5 présente les résultats en %CVMmoy qui sont statistiquement significatifs lors du boulonnage sur le plan vertical. Le deltoïde antérieur a réagi au positionnement du coude. Pour ce muscle, le positionnement du coude en extension a résulté en un %CVM moyen de 14,8%CVM et de 7,02%CVM lorsqu'il était fléchi. Pour le biceps brachial, la saisie de l'outil à deux mains a induit une diminution de la demande musculaire moyenne de 32,01%CVM à 21,24%CVM lorsque l'on compare cette saisie à celle à une main. Le triceps brachial, l'extenseur radial du carpe, l'extenseur commun des doigts, le fléchisseur superficiel des doigts et le fléchisseur ulnaire du carpe ont tous aussi réagi aux types de saisie. La saisie à deux mains a induit pour tous ces muscles une demande musculaire moyenne inférieure lorsque comparée à la saisie à une main. Pour l'extenseur radial du carpe, l'utilisation de la clé à chocs légère a induit

une demande musculaire moyenne de 26% CVM, qui est significativement moins élevée que celle associée à l'utilisation de l'outil lourd (30,27% CVM). Dans le cas du fléchisseur ulnaire du carpe, l'effet a été inversé. Le boulonnage à la clé à chocs lourde a induit une demande musculaire moyenne inférieure à l'utilisation de la légère, les résultats étant respectivement de 24,68% CVM et 26,98% CVM.

Tableau 5 : Les %CVM moy obtenus pendant le boulonnage sur le plan vertical où l'analyse statistique des effets principaux a présenté une différence significative à $p < 0,05$. (N = 13)

Effets principaux et %CVMax						
	Positionnement du coude		Outil		Type de saisie	
	Extension	Flexion	Lourd	Léger	1 main	2 mains
Trapèze supérieur	N/S	N/S	N/S	N/S	N/S	N/S
Deltoïde antérieur	14,80	7,02	N/S	N/S	N/S	N/S
Deltoïde moyen	N/S	N/S	N/S	N/S	N/S	N/S
Biceps brachial	N/S	N/S	N/S	N/S	32,01	21,24
Triceps brachial	N/S	N/S	N/S	N/S	14,27	9,12
Extenseur radial du carpe	N/S	N/S	30,27	26,00	29,53	26,74
Extenseur commun des doigts	N/S	N/S	N/S	N/S	24,55	20,79
Fléchisseur super. doigts	N/S	N/S	N/S	N/S	18,18	16,60
Fléchisseur ulnaire carpe	N/S	N/S	24,68	26,98	27,13	24,53

La figure 11 présente les résultats de l'analyse psychophysique pour les conditions sur le plan vertical. Les résultats indiquent que la condition expérimentale associée à la perception de l'effort le plus élevé, pour les membres supérieurs, est lors du boulonnage avec l'outil lourd tenu à 1 main avec le coude en extension. Dans ce cas, la cote psychophysique moyenne est de 4,6. À l'opposé, l'outil léger tenu à deux mains avec le coude fléchi induit une cote psychophysique moyenne de 2,6.



Cotes psychophysiques

Figure 11 : Les cotes psychophysiques d'effort physique moyennes obtenues lors des conditions expérimentales sur le plan vertical (n=16).

5.3.2.2 Plan horizontal

Le tableau 6 présente les résultats en %CVM maximaux qui sont statistiquement significatifs lors du serrage final sur le plan horizontal. Le trapèze supérieur, le deltoïde antérieur et le deltoïde moyen ont tous réagi au positionnement du coude. Pour ces muscles, le positionnement du coude en extension a résulté en %CVM qui sont respectivement de 45,12%CVM, de 51,87%CVM et de 28,08%CVM tandis qu'ils sont de 11,16%CVM, de 22,3%CVM et de 9,04%CVM lorsque le coude était fléchi. De plus, pour le deltoïde moyen, la saisie de l'outil à deux mains a induit une demande musculaire maximale de 20,38%CVM, tandis que la saisie à une main a induit une demande musculaire maximale de 16,74%CVM. L'extenseur commun des doigts et le fléchisseur ulnaire du carpe ont également réagi aux types de saisie. La saisie à deux mains a induit une demande musculaire inférieure pour ces muscles lorsque comparée à la saisie à une main. L'utilisation de la clé à chocs légère a induit une demande musculaire maximale de 30,12%CVM pour l'extenseur commun des doigts et de 34,92%CVM pour le fléchisseur ulnaire du carpe. Lors de l'utilisation de la clé à chocs lourde, l'extenseur commun des doigts a été sollicité à 27,3 %CVM et le fléchisseur ulnaire du carpe à 30,63%CVM.

Le tableau 7 présente les résultats en %CVMmoy qui sont statistiquement significatifs lors du boulonnage sur le plan horizontal. Le trapèze supérieur et le deltoïde antérieur ont réagi au positionnement du coude. Pour ces muscles, le positionnement du coude en extension a résulté en un %CVMmoy qui est respectivement de 36,72%CVM et de 41,25%CVM, tandis qu'il est de 7,71%CVM et de 17,69%CVM lorsque le coude était fléchi. L'extenseur commun des doigts, le fléchisseur superficiel des doigts et le fléchisseur ulnaire du carpe ont aussi réagi aux types de saisie. La saisie à 2 mains a induit pour tous ces muscles une demande musculaire inférieure lorsque comparée à la saisie à une main.

La figure 12 présente les résultats de l'analyse psychophysique pour les conditions sur le plan horizontal. Les résultats indiquent que la condition expérimentale associée à la perception de l'effort le plus élevé, pour les membres supérieurs, est lors du boulonnage avec l'outil lourd tenu à 1 main et le coude extension. Dans ce cas, la cote psychophysique moyenne est de 5,7. À l'opposé, l'outil léger tenu à deux mains avec le coude fléchi induit une cote psychophysique moyenne de 3,6.

Tableau 6 : Les %CVMmax obtenus pendant le serrage final sur le plan horizontal où l'analyse statistique des effets principaux a présenté une différence significative à $p < 0,05$. (N = 13)

Effets principaux et %CVMax						
	Positionnement du coude		Outil		Type de saisie	
	Extension	Flexion	Lourd	Léger	1 main	2 mains
Trapèze supérieur	45,12	11,16	N/S	N/S	N/S	N/S
Deltoïde antérieur	51,87	22,30	N/S	N/S	N/S	N/S
Deltoïde moyen	28,08	9,04	N/S	N/S	16,74	20,38
Biceps brachial	N/S	N/S	N/S	N/S	N/S	N/S
Triceps brachial	N/S	N/S	N/S	N/S	N/S	N/S
Extenseur radial du carpe	N/S	N/S	N/S	N/S	N/S	N/S
Extenseur commun des doigts	N/S	N/S	27,30	30,12	30,85	26,56
Fléchisseur superficiel des doigts	N/S	N/S	N/S	N/S	N/S	N/S
Fléchisseur ulnaire du carpe	N/S	N/S	30,63	34,92	35,34	30,22

Tableau 7 : Les %CVM moy obtenus pendant le boulonnage sur le plan horizontal où l'analyse statistique des effets principaux a présenté une différence significative à $p < 0,05$. (N = 13)

Effets principaux et %CVMax						
	Positionnement du coude		Outil		Type de saisie	
	Extension	Flexion	Lourd	Léger	1 main	2 mains
Trapèze supérieur	36,72	7,71	N/S	N/S	N/S	N/S
Deltoïde antérieur	41,25	17,69	N/S	N/S	N/S	N/S
Deltoïde moyen	N/S	N/S	N/S	N/S	N/S	N/S
Biceps brachial	N/S	N/S	N/S	N/S	N/S	N/S
Triceps brachial	N/S	N/S	N/S	N/S	N/S	N/S
Extenseur radial du carpe	N/S	N/S	N/S	N/S	N/S	N/S
Extenseur commun des doigts	N/S	N/S	N/S	N/S	25,04	22,22
Fléchisseur superficiel des doigts	N/S	N/S	N/S	N/S	15,38	13,38
Fléchisseur ulnaire du carpe	N/S	N/S	N/S	N/S	28,89	24,60

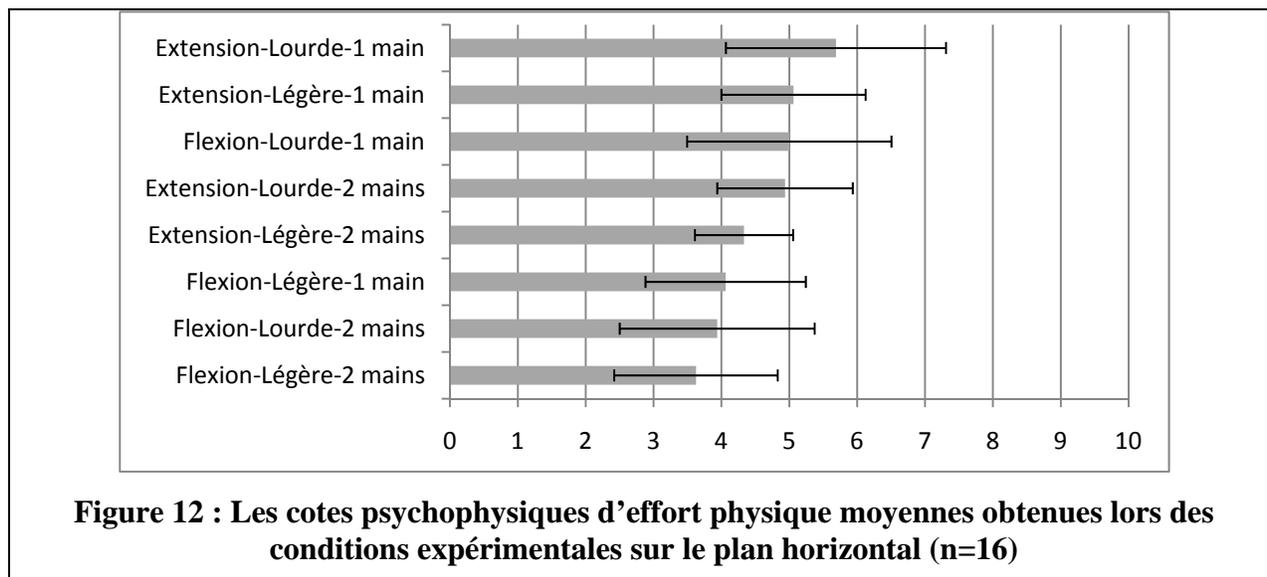


Figure 12 : Les cotes psychophysiques d'effort physique moyennes obtenues lors des conditions expérimentales sur le plan horizontal (n=16)

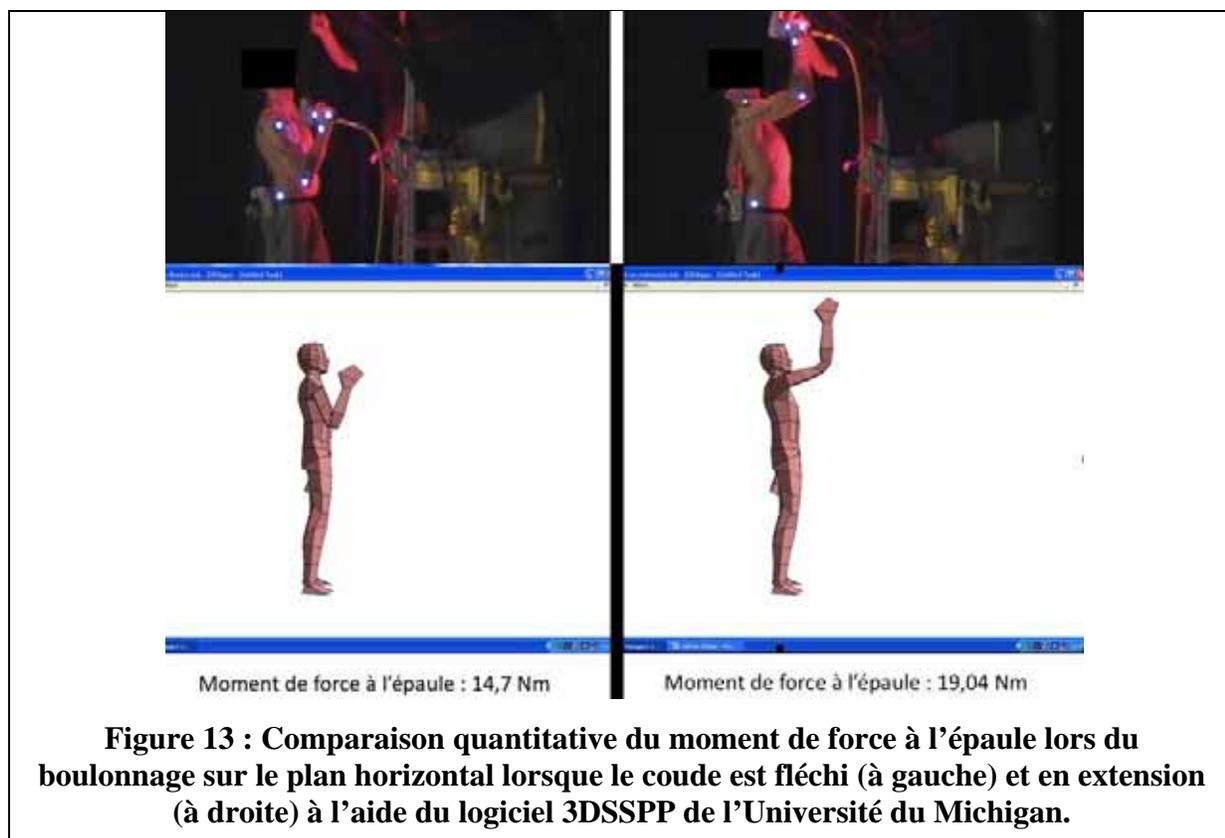
Selon les résultats obtenus pour les deux plans de travail, la contrainte physique associée au serrage final et au boulonnage en termes de demande musculaire moyenne et maximale est statistiquement moins importante pour plusieurs muscles lorsque le coude est fléchi. Bien que les

explications différent, cette moindre demande musculaire survenant lorsque le coude est fléchi est présente lors de l'utilisation des deux outils, tant sur le plan vertical que sur le plan horizontal. Les muscles qui profitent de cette réduction de l'activité myoélectrique induite par ce positionnement du coude sont surtout les muscles qui mobilisent le coude et l'épaule. Lors du serrage final sur le plan vertical pour le deltoïde antérieur, qui est un fléchisseur de l'épaule, l'utilisation de l'outil avec le coude fléchi induit une réduction de 9,69% de l'activité musculaire maximale et une diminution de 7,06% de la demande musculaire moyenne pour ce muscle. Ces résultats s'expliquent principalement par la diminution du moment de force induit par le positionnement du coude en flexion. Cependant, il s'avère particulièrement complexe de tenter de quantifier le moment de force à l'épaule induit par le boulonnage sur le plan vertical. En fait, l'outil est partiellement tenu par l'adaptateur. De plus, il est possible que certains sujets aient légèrement utilisé le poids de leur corps en poussant pour maintenir l'outil en position lors de son utilisation et ce, particulièrement avec la main non-dominante qui n'était pas instrumentée. Ce sont ces deux éléments qui compliquent la quantification du moment de force à l'épaule. Par contre, la diminution du moment de force à l'épaule peut être présentée qualitativement. Par exemple, lorsque le coude est fléchi, le bras de résistance (BR) diminue. Cette diminution du BR induit une réduction du moment de force à l'épaule. Cette réduction du moment de force est probablement responsable de la diminution de la demande musculaire moyenne et maximale lors du serrage final et du boulonnage sur le plan vertical lorsque le coude est fléchi.

Lors du serrage final et du boulonnage sur le plan horizontal avec le coude fléchi, la réduction de l'activité musculaire par rapport au coude en extension est encore plus importante. Cette réduction est de 33,96% de la capacité maximale pour le trapèze supérieur, de 29,57% pour celle du deltoïde antérieur et de 19,04% pour celle du deltoïde moyen. La demande musculaire moyenne du trapèze supérieur diminue de 29,01% et celle du deltoïde antérieur diminue de 23,56%. Ces diminutions de l'activité myoélectrique sont induites par la diminution de la contrainte associée au phénomène de tension-longueur (T/L) et du moment de force à l'épaule. En effet, la flexion du coude entraîne une diminution importante de l'angle relatif à l'épaule. Lorsque le coude est en extension, l'angle moyen des conditions comparables varie de 96 à 104 degrés, tandis qu'il varie de 28 à 33 degrés lorsque le coude est en flexion. Tout d'abord, la relation T/L du muscle agoniste explique une partie de l'augmentation de la demande musculaire des muscles de l'épaule en raison de leur raccourcissement. De plus, il a été démontré que l'augmentation de l'angle relatif avait pour effet d'augmenter la demande musculaire en raison de l'étirement des muscles antagonistes (extenseurs) de l'épaule. L'étirement de ces muscles entraîne une contrainte supplémentaire qui augmente la sollicitation des muscles fléchisseurs de l'épaule. De plus, comme il a été mentionné précédemment, la flexion du coude induit aussi une diminution du BR. La réduction du BR induit une diminution du moment de force, qui peut être aussi associée à la réduction de la demande musculaire moyenne et maximale. La diminution du moment de force à l'épaule est présentée par la figure 13. Ainsi, lors du boulonnage sur le plan horizontal avec le coude fléchi, le moment de force à l'épaule obtenu en tenant compte de la

posture, du poids de l'outil (avec la rallonge si applicable) et du moment de force de l'outil, donne une somme de 14,7 Nm, tandis qu'elle est de 19,04 Nm lorsque le coude est en extension pour le sujet 13.

Finalement, un autre élément pourrait expliquer la diminution de la demande musculaire lors du boulonnage le coude fléchi sur le plan horizontal. La rallonge de 45 centimètres pourrait possiblement avoir absorbé une partie du contrecoup en se déformant légèrement lors de l'impact. Ainsi, ceci aurait diminué la contrainte à laquelle étaient soumis les muscles des membres supérieurs en ayant possiblement allongé légèrement le temps d'application de la force. Il est aussi possible que ce soit simplement la masse de la rallonge qui augmente l'inertie et ainsi contribue à réduire l'importance du contrecoup transféré aux membres supérieurs des sujets.



Par rapport au type de saisie utilisé, la contrainte physique associée au serrage final et au boulonnage en termes de demande musculaire est statistiquement moins importante pour plusieurs muscles, lorsque la clé à chocs est saisie à deux mains. Ceci s'explique tout simplement par le fait que le travail musculaire dû à la tâche est réparti sur les deux membres supérieurs au lieu d'un seul. Bien que l'activité musculaire de l'ensemble des muscles diminue lorsque l'outil est saisi à deux mains, ce sont surtout les muscles qui mobilisent le coude et le poignet qui profitent de cette réduction de la contrainte physique. Par exemple, la saisie de l'outil à deux

mains entraîne une diminution de 8,76% de l'activité myoélectrique maximale du biceps brachial lors du serrage final. Toujours lors du serrage final, la diminution de l'activité musculaire maximale est de 4,27% pour l'extenseur radial du carpe. Pour l'extenseur commun des doigts, la demande musculaire maximale est toujours inférieure lorsque l'outil est saisi à deux mains et ce, peu importe le positionnement du coude. Lors du boulonnage sur le plan vertical, la baisse de la demande musculaire moyenne est, entre autres, de 3,76% pour l'extenseur commun des doigts et de 5,15% pour le triceps brachial

Pendant le serrage final sur le plan horizontal, l'activité musculaire maximale du biceps brachial est toujours inférieure lorsque l'outil est saisi à deux mains. Il en va de même pour le fléchisseur ulnaire du carpe avec une diminution de 5,12%. Lors du boulonnage sur le plan horizontal, l'activité musculaire moyenne du triceps brachial est aussi inférieure lorsque l'outil est saisi à deux mains et ce, peu importe l'outil utilisé. La demande musculaire moyenne diminue de 15% pour le fléchisseur ulnaire du carpe lorsque l'outil est saisi à deux mains. Cette diminution de l'activité musculaire maximale et moyenne lorsque l'outil est saisi à deux mains est causée par le partage bilatéral de la contrainte physique associée au serrage final ou au boulonnage. Ainsi, pour les muscles dont la fonction principale est de saisir l'outil, le fait de saisir à deux mains entraîne un partage du poids et de la contrainte liée au boulonnage et au serrage final sur les deux mains plutôt que sur une seule. Cette répartition de la contrainte est aussi effective pour les muscles responsables du maintien de l'outil en place pendant la période de boulonnage et de serrage final (ex : deltoïde antérieur).

Selon les résultats qui ont été présentés, il est plus complexe d'identifier un outil qui est plus avantageux quant à la demande musculaire moyenne et maximale. Cette complexité est induite par le plan expérimental imparfait de cette variable indépendante. Il s'agissait d'une limite connue et acceptée de ce projet. Cette limite est causée par les caractéristiques des clés à chocs pneumatiques retenues pour l'étude. Concrètement, la clé à chocs lourde possède une inertie importante et une grande vitesse, tandis que la légère présente une faible inertie et une petite vitesse. Si un plan expérimental parfait avait été désiré, le nombre d'outils aurait dû être doublé afin de combiner toutes les caractéristiques possibles. Cependant, l'objectif de cette expérimentation était de quantifier objectivement les stratégies observées qui avaient le potentiel de réduire la contrainte musculaire aux membres supérieurs, et non une analyse détaillée de l'impact des caractéristiques des clés à chocs pneumatiques. Dans cette optique, il ne s'agit pas d'une étude expérimentale qui ne porte que sur la vibration et les contrecoups, mais plutôt une étude ergonomique en laboratoire sur les postures visant à réduire les contraintes lors de l'utilisation d'une clé à chocs pneumatique dans le secteur des Services à l'automobile. De plus, la littérature présentée sur ce sujet reflète cette complexité. Celle-ci présente des divergences d'opinion entre différentes équipes de chercheurs. En fait, peu d'équipes de recherche ont tenté de déterminer l'impact des caractéristiques d'une clé à chocs sur la demande musculaire moyenne et maximale. Les chercheurs qui se sont intéressés à ce sujet en viennent souvent à des conclusions et recommandations différentes. Rappelons que, par exemple, Radwin et al. (1989)

recommandent un temps de serrage final plus long afin de réduire l'amplitude du contrecoup et ainsi tenter de réduire la demande musculaire maximale. Freivalds et Eklund (1993), quant à eux, indiquent qu'il est préférable de réduire le temps d'exposition à la contrainte. Selon eux, l'amplitude du contrecoup qui affecte généralement la sollicitation musculaire maximale, est moins problématique que la quantité de mouvement en rotation et la durée du boulonnage. La discussion quant au choix de l'outil sera divisée selon le plan de travail (vertical ou horizontal).

Il est nécessaire d'identifier et d'expliquer que dans certaines situations, certains résultats ne cadrent pas dans les explications qui ont été précédemment données. Par exemple, lors du serrage final et du boulonnage sur le plan vertical, la demande musculaire maximale et moyenne est inférieure lorsque l'outil léger est saisi à une main pour le deltoïde antérieur. Ce résultat aberrant peut être expliqué à partir des caractéristiques physiques de l'outil léger ainsi que par une spécificité du système musculaire. D'une part, l'inertie de l'outil léger est moins importante que celle de l'outil lourd, ce qui signifie que cet outil offre une moins grande résistance à la rotation induite par le contrecoup. D'autre part, le contrecoup est caractérisé par une forte composante excentrique pour les muscles impliqués dans des mouvements de supination de l'avant-bras. Le système musculaire est beaucoup plus fort lors d'un effort excentrique et ce, dans un rapport de deux pour un (Gowzitke et Milner, 1980). Concrètement, il est possible de formuler l'hypothèse que, dans cette situation, le manque d'inertie de l'outil léger aurait induit un contrecoup élevé qui aurait produit un effort excentrique important. Si tel est le cas, bien que l'activité musculaire moyenne et maximale soit inférieure lors de la saisie à une main, il serait plus avantageux qu'elle soit plus importante pour que la composante principale de la contraction soit plutôt isométrique afin de réduire les risques de micro-déchirures musculaires (Lieber et Friden, 1999).

L'augmentation de la demande au niveau des muscles fléchisseurs et abducteurs de l'épaule pourrait s'expliquer par une surcharge pondérale lorsque l'outil léger est tenu à deux mains. En effet, il semble que la présence de la deuxième main sur l'outil serve principalement à augmenter l'inertie du système « main-outil » et réduire l'effet du contrecoup. Toutefois, une partie du poids du membre supérieur de cette deuxième main serait transféré à l'autre, ce qui surchargerait les muscles de l'épaule du bras dominant qui sont principalement impliqués dans le maintien de la posture lors du travail sur le plan horizontal.

5.3.2.3 Analyse de l'effet de la vibration

Le tableau 8 présente les résultats en %CVM de l'analyse de l'effet de la vibration lors du maintien des postures de référence. Ces résultats indiquent que l'activité musculaire du trapèze supérieur n'a pas été influencée par l'outil utilisé ni par l'état de marche de celui-ci. De plus, la demande musculaire moyenne du deltoïde antérieur et du triceps brachial n'est pas affectée par

l'état de marche de l'outil. Pour le deltoïde antérieur, le deltoïde moyen, le biceps brachial, le triceps brachial, l'extenseur radial du carpe, l'extenseur commun des doigts, le fléchisseur superficiel des doigts et le fléchisseur ulnaire du carpe, l'outil lourd est toujours associé à une demande musculaire moyenne supérieure. Par exemple, lors du maintien de la position de référence avec l'outil lourd, l'activité musculaire moyenne de l'extenseur radial du carpe est de 13,13%CVM, tandis que cette activité diminue à 9,18%CVM lors du maintien de l'outil léger. Pour le deltoïde moyen, le biceps brachial, l'extenseur radial du carpe, l'extenseur commun des doigts, le fléchisseur superficiel des doigts et le fléchisseur ulnaire du carpe, le maintien de la posture de référence avec l'outil en marche a induit la demande musculaire moyenne la plus élevée. Par exemple, pour l'extenseur radial du carpe, le maintien de cette position avec l'outil arrêté est associé à une demande musculaire moyenne de 7,92%CVM. Cette demande augmente à 14,38%CVM lorsque l'outil est en marche. Pour l'analyse des postures de référence, il n'y a eu aucune interaction statistiquement significative entre l'outil et l'état de marche. De manière générale, l'augmentation de l'activité musculaire est plus importante lors du passage de l'outil léger à l'outil lourd pour les muscles qui jouent un rôle antigravitaire (biceps brachial et extenseur radial du carpe). De plus, l'activation de l'outil provoque une augmentation plus importante pour tous les muscles de l'avant-bras.

Tableau 8 : La demande musculaire en %CVM moy pour les situations de références, les résultats en gras représentent les différences significatives à $p < 0,05$.

	Conditions	Trapèze supérieur	Deltoïde antérieur	Deltoïde moyen	Biceps brachial	Triceps brachial	Extenseur radial du carpe	Extenseur commun des doigts	Fléchisseur superficiel des doigts	Fléchisseur ulnaire du carpe
Outil	Lourd	1.67	2.03	1.29	6.23	1.83	13.12	9.83	5.42	5.61
	Léger	1.37	1.62	1.13	3.87	1.40	9.18	7.30	4.14	4.56
État de marche	Arrêt	1.49	1.82	1.16	4.71	1.55	7.92	4.77	3.44	3.25
	Marche	1.55	1.82	1.25	5.39	1.68	14.38	12.35	6.12	6.93

Les résultats indiquent que l'outil lourd induit une demande musculaire moyenne plus importante. Par exemple, le maintien statique de l'outil lourd induit une demande musculaire moyenne de 6,23%CVM pour le biceps brachial et de 13,12 %CVM pour l'extenseur radial du carpe. Comparativement, le maintien de l'outil léger induit une demande musculaire moyenne de 3,87%CVM pour le biceps brachial et de 9,18%CVM pour l'extenseur radial du carpe. Cette demande musculaire moyenne plus importante lors du maintien de l'outil lourd est induite par son poids plus important, d'où une contrainte plus importante pour l'ensemble des muscles mobilisant les membres supérieurs.

En comparant les résultats des références obtenues lorsque l'outil est en marche et à l'arrêt, il est possible d'identifier une augmentation de la demande musculaire moyenne lorsque l'outil est en marche. Par exemple, l'activité myoélectrique moyenne du fléchisseur ulnaire du carpe est de

3,25%CVM lorsque l'outil est hors fonction et de 6,95%CVM lorsque l'outil est en fonction, tandis que celle de l'extenseur radial du carpe augmente de 7,92%CVM à 14,38%CVM. Il s'agit de deux muscles qui ne sont pas impliqués dans le maintien de l'état de marche de l'outil. Ces deux muscles ne participent pas à l'actionnement de la gâchette, leurs insertions distales étant situées au niveau du poignet. Il est probable que cette augmentation de l'activité musculaire moyenne soit induite par le réflexe tonique vibratoire. Cependant, il n'y a pas eu de différence significative quant à la demande musculaire moyenne lorsque l'outil lourd et l'outil léger ont été comparés alors qu'ils étaient en fonction. La présence de ce réflexe pourrait être attribuable à la proximité des tendons distaux, de l'extenseur radial du carpe et du fléchisseur ulnaire du carpe, par rapport à la source de vibrations produite par l'outil (Eklund and Hagbarth, 1966).

6. VOLET III : CONTRAINTES PHYSIQUES ASSOCIÉES À L'ACTIVITÉ DE PONÇAGE DE CARROSSERIE AUTOMOBILE

6.1 Problématique

6.1.1 Les ponceuses rotatives pneumatiques

En carrosserie automobile, les ponceuses rotatives pneumatiques sont des outils affectés à la préparation des surfaces à peindre. Lorsqu'elles sont utilisées directement sur le véhicule, les contraintes physiques sont surtout attribuables à l'angle et à la hauteur des surfaces à poncer (Marchand et Giguère 2010).

La plupart des études qui ont évalué l'impact de l'utilisation de ce type d'outils ne se sont malheureusement pas intéressées au secteur de l'automobile. Spieholz et al. (2001) ont évalué trois modèles de ces outils, dont un nouveau modèle « amélioré », chez trois sujets possédant au moins deux ans d'expérience en ébénisterie. L'activité musculaire et l'angle du poignet ont été mesurés, et la convivialité des outils a été évaluée par questionnaire. Les mesures physiologiques n'ont pas permis de déceler de différences à l'utilisation entre les trois ponceuses, mais l'évaluation psychophysique par questionnaire, confirmée en entrevues, a clairement fait ressortir que le nouveau modèle « amélioré » se classait dernier en termes de perception du confort et des vibrations. Sauf pour une période de familiarisation de cinq minutes, la durée du travail réalisé par les sujets n'est pas mentionnée. Les auteurs concluent à l'utilité des méthodes psychophysiques pour des situations où une étude contrôlée avec plusieurs sujets n'est pas possible, tout en avouant l'absence de rigueur et de support statistique pour leurs résultats. Bovenzi et al (2005) se sont quant à eux intéressés à l'effet des vibrations de sableuses orbitales sur une population de travailleuses du meuble (n=100) en comparaison avec un groupe contrôle (n=100) d'employées de bureau. Le niveau vibratoire des neuf modèles de sableuses utilisés dans les industries participantes a été mesuré. Les contraintes ergonomiques ont été évaluées pour 25 postes de travail à l'aide d'un indice de contrainte développé par Moore et Garg (1995). Les résultats montrent une association significative entre l'utilisation d'outils vibrants et la présence du syndrome du tunnel carpien (19% de prévalence chez les utilisatrices de sableuses) et d'inconfort au niveau des membres supérieurs. Ils montrent également que le niveau d'exposition aux vibrations mesurées, de même que l'indice de stress sur les membres supérieurs, semblent jouer un rôle multiplicateur pour le risque d'apparition de ces lésions. En effet, en fonction de la partie de l'élément à poncer, l'épaule peut s'ajuster et être plus ou moins élevée, entraînant un moment de force plus ou moins important. Or, la réduction d'un moment de force permet de diminuer la force musculaire requise pour contrer ce moment (Praagman et al., 2010). En ce qui concerne les contraintes musculaires au poignet, elles se retrouvent sur plusieurs axes lors du travail de ponçage. La raison principale réside dans le fait que les ponceuses à air comprimé sont des outils vibrants dont les oscillations ne sont pas symétriques;

ainsi, il est difficile de bien la contrôler et il en ressort des mouvements de déviation ulnaire et radiale (Mirka et al., 2001).

L'objectif de ce volet est d'identifier les dispositions (hauteur et orientation) du plan de travail et le modèle de ponceuse, qui permettent de réduire les contraintes musculaires aux membres supérieurs. Ce volet devrait permettre aussi de quantifier objectivement la charge musculaire imposée aux muscles des membres supérieurs pour les différentes conditions expérimentales.

6.2 Méthodologie spécifique

6.2.1 Sujets

Douze sujets expérimentaux hommes, droitiers et exempts de tout problème musculo-squelettique ont participé à l'expérimentation. Ces derniers, de même que le personnel de l'UQAM participant à ce projet, ont reçu une formation d'une heure sur l'utilisation d'une ponceuse industrielle à air comprimé et ont profité d'une période d'une heure pour se familiariser avec l'outil et avec les conditions expérimentales. Les participants n'étaient pas des professionnels de la carrosserie automobile, mais reproduisaient des postures standard observées lors de l'étude exploratoire (Marchand et Giguère, 2010).

Tableau 9 : Caractéristiques anthropométriques et âges des sujets.

	Taille (m)	Poids (kg)	Âge
Moyenne	1.753	77.8	23
Écart-Type	0.06	10.1	3.3
Minimum	1.64	61.4	20
Maximum	1.84	97.3	27

6.2.2 Conditions expérimentales

Les sujets avaient comme consigne de réaliser, avec leur main dominante, les opérations de ponçage sur des surfaces reproduisant 3 différentes sections de la carrosserie d'une voiture intermédiaire (toit, surface haute et basse de la porte). Pour la tâche du toit on retrouvait 8 conditions expérimentales avec la combinaison des facteurs suivants : 2 ponceuses (manche centré et décentré), 2 hauteurs (normale et modifiée) et 2 distances (éloignée et rapprochée). Pour la tâche du haut de porte on retrouvait 6 conditions expérimentales avec la combinaison des facteurs suivant : 2 ponceuses (manche centré et décentré), 2 hauteurs (normale et modifiée) et deux positions (assise pour la hauteur standard, et debout pour les deux hauteurs). Pour la tâche du bas de porte on retrouvait 12 conditions expérimentales avec la combinaison des facteurs suivants : 2 ponceuses (manche centré et décentré), 2 hauteurs (normale et modifiée) et trois positions (assise, debout et accroupie). Dans ce cas-ci, il s'agit d'une situation simulée qui implique un déplacement des membres supérieurs sur une surface de travail, donc, où les postures sont plus difficiles, sinon impossibles, à imposer aux sujets. Seules la hauteur et l'orientation des plans de travail changeaient. Les sujets étaient debout face au plan de travail et la hauteur de celui-ci pouvait varier soit selon la hauteur réelle de la voiture, soit selon une hauteur modifiée par l'utilisation d'un cric pneumatique qui permet de hausser partiellement le véhicule.

Les ponceuses étaient alimentées en air par un compresseur capable de fournir la pression requise pour un fonctionnement optimum des outils et d'un débit d'air suffisant pour ne pas occasionner de chutes de pression pendant les essais. Les caractéristiques des outils utilisés étaient notées (masse avec et sans extension, centre de gravité, moment de force au niveau du poignet). Les sujets devaient poncer une surface métallique peinte et légèrement convexe de 30 cm par 30 cm. Cette surface était montée sur un support construit avec des profilés d'aluminium à hauteur ajustable et inclinable, ce qui permet de reproduire les 3 sections de carrosserie décrites précédemment. La surface était retenue aux quatre coins par des jauges de contraintes, qui mesuraient les forces uni-axiales exercées avec l'outil sur celle-ci. Les signaux des jauges étaient transférés au logiciel d'acquisition qui faisait la sommation des quatre forces pour mesurer la force exercée contre la plaque lors des différents tests. Les figures 14 et 15 présentent un sujet en action sur le montage avec les deux types de ponceuse utilisée dans ce volet.

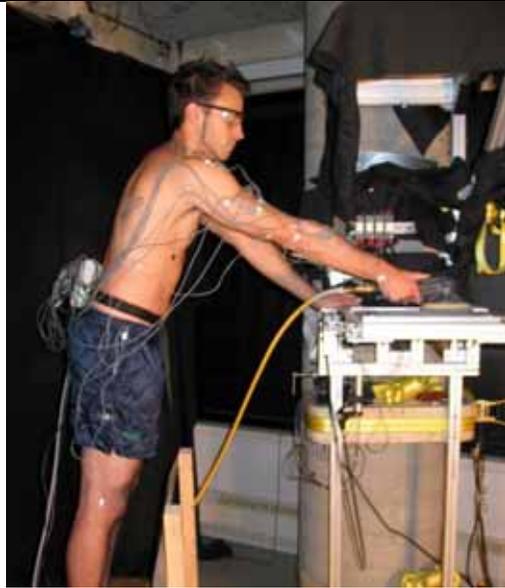


Figure 14 : Représentation d'une condition expérimentale où le sujet ponçe le toit avec des hauteurs modifiées.

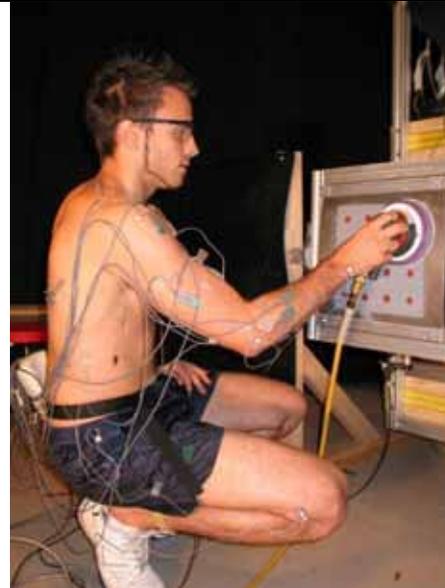


Figure 15 Représentation d'une condition expérimentale où le sujet ponçe le bas de porte avec des hauteurs modifiées.

La durée de l'essai pour chaque condition expérimentale était de 30 secondes et une période de repos de trois minutes en position assise était allouée aux sujets entre les conditions. L'ordre de passation des tests était aléatoire afin empêcher un effet de séquence expérimentale, qui serait associable à une fatigue musculaire accumulée. Les signaux issus des jauges de contraintes étaient enregistrés de façon synchrone avec les signaux ÉMG des muscles.

6.2.2.1 Constance entre les essais expérimentaux

Un des obstacles potentiels à la constance des essais est la pression appliquée sur les plaques de ponçage. En effet, d'un essai à l'autre, une pression plus ou moins grande appliquée par le sujet pourrait influencer tant le pourcentage d'utilisation musculaire que les angles relatifs et absolus.

Afin de contrer ce phénomène, deux mesures ont été prises. Premièrement, une formation dans l'heure précédant le début de l'expérimentation permettait aux sujets de se familiariser avec les outils et leur maniement, et les expérimentateurs leur indiquaient les consignes à respecter. Deuxièmement, les plaques de ponçages étaient munies de repères visuels, soit de petits cercles rouges peints à intervalles réguliers sur la plaque à sabler (voir les figures 16 et 17). Ces points rouges s'effaçaient avec un ponçage fait selon les critères des expérimentateurs, et l'objectif était d'effacer tous les points sur la plaque pendant la durée d'un essai. Cela imposait à la fois une certaine cadence mais aussi une certaine force, donc une constance entre les essais.

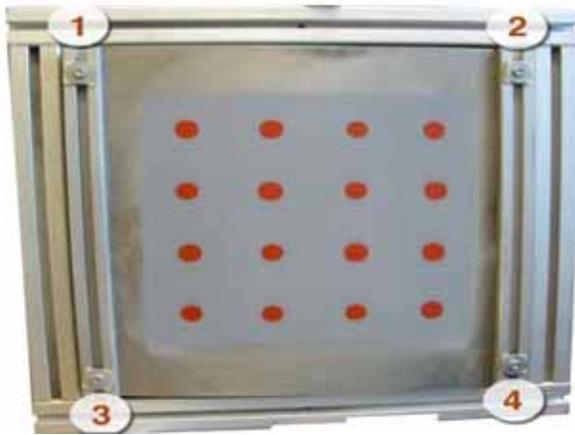


Figure 16 : Représentation de la surface à poncer

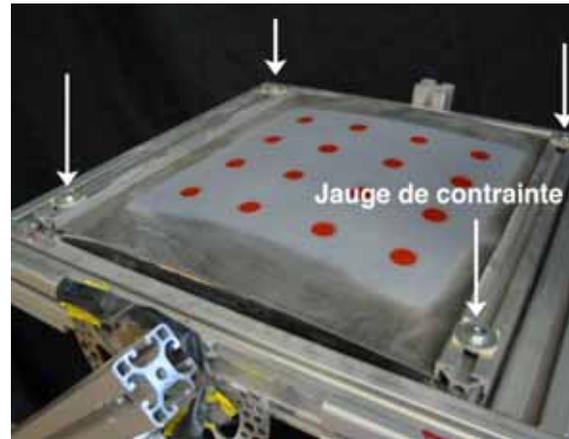


Figure 17 : Représentation du positionnement des jauges de contrainte

6.3 Résultats

6.3.1 Résultats des variables relatives aux jauges de force

L'analyse statistique (ANOVA) réalisée sur la force appliquée sur la surface de ponçage ne démontre aucune différence significative entre les conditions expérimentales étudiées. Ces résultats suggèrent que la force exercée par les sujets d'une condition à l'autre était constante.

6.3.2 Résultats des variables relatives aux angles pour la section de la porte basse

Le tableau 10 fait état des valeurs d'angles relatifs et absolus à l'épaule et au coude en fonction de différentes conditions, soient les outils, les hauteurs et les postures lors du ponçage de la porte basse. La modification de la hauteur de la porte par rapport au sol augmente l'angle absolu à l'épaule de seulement 5,4 degrés mais réduit son angle relatif de 23,3 degrés. Cette situation permet aux muscles fléchisseurs de l'épaule de se retrouver dans une position plus optimale.

Tableau 10 : Angles absolus et relatifs moyens mesurés lors du ponçage de la porte basse.

ANGLES	OUTILS			HAUTEURS			POSTURES			
	Centré	Décentré	P<0,05	Standard	Modifiée	P<0,05	Accroupie (1)	Assise (2)	Debout (3)	P<0,05*
Absolu Épaule	13.42	10.14	*	9.07	14.495	*	20.35	19.83	-4.83	1-3 ; 2-3
Absolu Coude	89.895	78.14	*	74.68	93.345	*	104.06	92.47	55.82	1-2 ; 1-3 ; 2-3
Relatif Épaule	67.42	66.35	NS	78.505	55.255	*	62.125	64.325	74.2	1-3 ; 2-3
Relatif Coude	105.025	114.38	*	117.27	102.14	*	96.635	111.075	121.4	1-2 ; 1-3 ; 2-3

*Les paires de chiffres présentées dénotent les différences significatives entre les conditions

6.3.3 Résultats des variables relatives aux angles de porte haute

Tableau 11 : Angles absolus et relatifs moyens mesurés lors du ponçage de la porte haute.

ANGLES	OUTILS			POSITIONS			
	Centré	Décentré	P<0,05	Assise (1)	Debout-Mod (2)	Debout-Stan (3)	P<0,05*
Absolu Épaule	19.14	15.855	*	32.56	16.745	3.19	*
Absolu Coude	100	89.915	*	120.95	95.5	68.42	*
Relatif Épaule	32.8	29.375	*	49.305	19.885	24.07	*
Relatif Coude	99.21	107.88	*	91.175	101.075	118.385	*

*dénotent les différences significatives entre les conditions

6.3.4 Résultats des variables relatives aux angles pour la section du toit

Le tableau 12 fait état des valeurs d'angles relatifs et absolus à l'épaule et au coude en fonction de différentes conditions, soient les outils, les hauteurs et les postures lors du ponçage du toit. Pour cette section de la voiture, la modification de la hauteur améliore beaucoup la posture pour ces deux articulations. Les angles absolus à l'épaule et au coude obtiennent des baisses importantes de 39 et 23 degrés, respectivement. L'angle relatif présente aussi une baisse importante de 29 degrés au niveau de l'épaule. Ces valeurs suggèrent que l'épaule se retrouve dans une situation plus favorable lorsque la hauteur du plan de travail est abaissée par rapport au travailleur.

Tableau 12 : Angles absolus et relatifs moyens mesurés lors du ponçage du toit.

ANGLES	OUTILS			HAUTEURS			DISTANCES		
	Centré	Décentré	P<0,05	Standard	Modifiée	P<0,05	Rapprochée	Éloignée	P<0,05
Absolu Épaule	76.48	74.24	*	95.03	55.69	*	74.29	76.43	*
Absolu Coude	87.1	83.78	*	97.19	73.77	*	85.19	85.69	NS
Relatif Épaule	93.14	87.36	*	104.57	75.93	*	99.05	81.45	*
Relatif Coude	167.81	167.63	NS	171.95	163.49	*	168.57	166.87	*

*dénotent les différences significatives entre les conditions

6.3.5 Résultats des variables relatives au pourcentage d'utilisation musculaire

Les tableaux suivants (13, 14 et 15) présentent le %CVM des muscles instrumentés lors de la réalisation des différentes conditions. La couleur de chaque case indique l'importance du %CVM : le vert indique un niveau idéal de charge statique (entre 0% et 5%). Le jaune indique un niveau acceptable de charge statique (entre 5.1% et 10%). Le rouge indique un niveau préoccupant de charge statique (au-dessus de 10%).

Tableau 13: Pourcentage d'utilisation musculaire selon différentes conditions lors des essais de ponçage de la porte basse.

MUSCLES	OUTILS			HAUTEURS			POSTURES			
	Centré	Décentré	P<0,05	Standard	Modifiée	P<0,05	Accroupie (1)	Assise (2)	Debout (3)	P<0,05*
Trapèze supérieur	2.91	3.15		3	3.06		5.35	2.39	1.35	1-2 1-3
Deltoïde antérieur	7.06	6.83		7.84	6.06	*	10.4	5.35	5.09	1-2 1-3
Deltoïde médian	3.01	2.77		3.15	2.63	*	3.85	3.01	1.81	1-2 1-3 2-3
Grand dorsal	3.01	2.88		3.36	2.51		2.32	3.44	3.08	
Grand pectoral	3.08	3.6	*	3.65	3.03	*	3.8	2.2	4.02	1-2 2-3
Biceps brachial	3.64	3.9		4.37	3.16	*	3.54	4.38	3.38	1-2 2-3
Triceps brachial	3.27	3.17		3.37	3.07	*	3.19	3.55	2.93	2-3
1er radial	6.76	6.52		6.72	6.61		6.96	6.54	6.43	
Extenseurs communs des doigts	7.68	5.67	*	5.92	7.43	*	7.54	6.53	6.06	1-3
Fléchisseurs superficiels des doigts	4.9	8.11	*	7.28	5.73	*	5.75	6.04	7.73	1-3 2-3
Cubital antérieur	12.94	14.22		13.44	13.72		14.28	12.46	14	

*Les paires de chiffres présentées dénotent les différences significatives entre les trois postures.

Tableau 14 : Pourcentage d'utilisation musculaire selon différentes conditions lors des essais de ponçage de la porte haute.

MUSCLES	OUTILS			POSITIONS			
	Centré	Décentré	P<0,05	Assise (1)	Debout-Mod (2)	Debout-Stan (3)	P<0,05*
Trapèze supérieur	3.39	3		5.87	2.64	1.07	1-2 ; 1-3 ; 2-3
Deltoïde antérieur	7.61	6.84		9.08	6.39	6.21	1-2 ; 1-3
Deltoïde médian	5.08	5.09		6.96	3.3	5.01	1-2 ; 1-3
Grand dorsal	1.68	1.6		1.88	1.54	1.5	1-2 ; 1-3
Grand pectoral	3.82	3.93		2.93	3.7	4.99	1-2 ; 1-3 ; 2-3
Biceps brachial	3.99	4.97		4.27	3.49	5.66	1-2 ; 1-3 ; 2-3
Triceps brachial	3.7	3.63		3.33	3.45	4.22	1-3 ; 2-3
1er radial	6.1	6.17		6.4	6.43	5.58	
Extenseurs communs des doigts	9.38	7.67	*	9.3	9.21	7.06	1-3 ; 2-3
Fléchisseurs superficiels des doigts	5.97	7.53		5.87	6.44	7.94	1-3 ; 2-3
Cubital antérieur	11.3	11.76		10.61	12.29	11.7	

*Les paires de chiffres présentées dénotent les différences significatives entre les trois positions

Tableau 15 : Pourcentage d'utilisation musculaire selon différentes conditions lors des essais de ponçage du toit.

MUSCLES	OUTILS			HAUTEURS			DISTANCES		
	Centré	Décentré	P<0,05	Standard	Modifiée	P<0,05	Approchée	Éloignée	P<0,05
Trapèze supérieur	7,45	8,05		8,72	6,78	*	7,28	8,22	
Deltoïde antérieur	6,92	6,51		6,98	6,45		6,44	6,99	
Deltoïde médian	11,14	10,18		13,27	8,04	*	9,6	11,72	
Grand dorsal	2,82	2,31		2,65	2,47		2,22	2,91	
Grand pectoral	2,72	2,68		2,65	2,75		2,68	2,72	
Biceps brachial	2,51	3,68	*	2,87	3,32		3,19	3	
Triceps brachial	8,02	7,11		8,22	6,9		7,24	7,89	
1er radial	6,53	6,01		6,41	6,13		6,45	6,09	
Extenseurs communs des doigts	10,3	9,6		9,16	10,74	*	9,69	10,21	
Fléchisseurs superficiels des doigts	7,15	9,34	*	8,7	7,79	*	8,18	8,31	
Cubital antérieur	14,8	14,17		14,69	14,27		14,51	14,45	

Les tableaux 16, 17 et 18 montrent la moyenne des cotes psychophysiques des sujets en fonction des diverses conditions pour chaque section (porte basse, haute, et le toit). Comme il a été expliqué plus haut, les cotes psychophysiques vont de 1 à 10, un chiffre plus élevé reflétant l'effort plus exigeant. Les relations significatives ($P<0,05$) sont indiquées par un astérisque (*).

Tableau 16 : Les cotes psychophysiques évaluées lors du ponçage de la porte basse.

PORTE BASSE	POSTURES			HAUTEURS			MANCHES			
	Accroupie	Assise	Debout		Modifiée	Standard		Centré	Décentré	
	3.58	2.96	3.5	1-2* 2-3*	3.17	3.53	*	3.06	3.64	*

Tableau 17 : Les cotes psychophysiques évaluées lors du ponçage de la porte haute.

PORTE HAUTE	POSITIONS				MANCHES		
	Assise	Deb-mod	Deb-stan		Centré	Décentré	
	2.88	3.04	2.83		2.75	3.08	*

Tableau 18 : Les cotes psychophysiques évaluées lors du ponçage du toit.

TOIT	DISTANCES			HAUTEURS			MANCHES		
	Rapprochée	Éloignée		Modifiée	Standard		Centré	Décentré	
	3.77	4.38	*	3.48	4.67	*	3.92	4.23	*

Pour les résultats associés à la section de la porte basse (tableau 13), on constate que les fléchisseurs superficiels des doigts bénéficient fortement de l'utilisation d'un manche centré, le %CVM étant de 4,9% en moyenne contre 8,11% avec le manche décentré. Ces valeurs peuvent être en partie attribuables à l'éloignement de la prise pour l'outil décentré qui augmente le moment de force au poignet lorsque l'on exerce une pression sur la surface avec la ponceuse. Les extenseurs des doigts ont une tendance inverse, le manche centré offrant un %CVM plus élevé (à 7,68%) que le décentré (à 5,67%). Cela s'explique par la forme des outils : l'outil centré a une prise plus large qui place la main dans une position plus ouverte. On retrouve dans cette position avec une extension plus importante au niveau du poignet, les muscles extenseurs sont plus courts et se retrouvent davantage sollicités pour produire la tension musculaire. Pour les cotes psychophysiques (tableau 16), c'est l'outil à manche centré qui est perçu comme étant plus facile à utiliser, avec un indice psychophysique de 3,06 contre 3,64 pour l'outil avec manche décentré. Cela s'explique par la prise du manche décentré, qui s'allonge et crée un effet de levier sur le poignet, lequel doit contracter ses muscles pour bien tenir l'outil. Cette différence valide celle observée au niveau de muscles responsables de la préhension de l'outil. La hauteur modifiée entraîne des valeurs du %CVM plus faibles pour le deltoïde antérieur, le deltoïde médian, le grand pectoral, le biceps, le triceps et les fléchisseurs superficiels des doigts. Les cotes psychophysiques aussi indiquent que la hauteur modifiée est perçue comme étant moins difficile à maintenir que la hauteur standard (3,17 contre 3,53), un autre résultat attendu vu l'angle absolu plus faible, ce qui se traduit par un moment de force moins élevé. L'extenseur commun des doigts est cependant moins sollicité à la hauteur standard. Ce phénomène est expliqué par l'orientation du ponçage en fonction de la hauteur : la hauteur standard force le travailleur à orienter la ponceuse vers le haut. Afin de mettre de la pression, le travailleur doit donc fléchir le poignet, sollicitant ses fléchisseurs des doigts. À la hauteur modifiée, le ponçage est orienté vers le bas : on observe alors l'effet de prise sollicitant les extenseurs des doigts. Au niveau des postures, on observe que la position accroupie est moins favorable que les positions assises et

debout pour le trapèze supérieur, deltoïde antérieur et deltoïde médian. Pour le deltoïde antérieur, cette position cause un niveau de charge musculaire statique préoccupant (supérieur à 10 %CVM). Les valeurs basses obtenues pour la position assise sont principalement attribuables à l'appui de l'avant-bras sur la cuisse qui a pour effet de réduire le moment de force exercé à l'épaule. Cet appui permet aussi au grand pectoral (muscle de l'épaule responsable de la flexion horizontale) de diminuer sa sollicitation alors que la cuisse aiderait à exercer une force contre la surface à poncer. La même tendance s'observe pour les cotes psychophysiques où la position assise est perçue comme étant significativement moins difficile à maintenir, avec un pointage de 2,96, que les positions accroupies (3,58) et debout (3,5). La position assise permettait aux sujets d'augmenter leur stabilité posturale et enlevait l'implication des jambes pour supporter le poids de leur corps, ce qui permet à ces dernières de fournir très peu d'effort.

Pour les conditions réalisées sur la section haute de la porte haute (tableau 14), le manche décentré permet de diminuer de 1.7 % du CVM la sollicitation des extenseurs communs des doigts. Encore une fois, cet outil permettrait une position plus fermée de la main qui avantagerait son rendement musculaire. Toutefois pour les cotes psychophysiques (tableau 17), le manche centré est perçu comme étant plus facile avec 2,75, tandis que le manche décentré à une valeur plus élevée à 3,08. La posture assise augmente la sollicitation musculaire pour trois muscles importants à l'épaule (trapèze supérieur, deltoïde antérieur et médian). Pour les deux postures debout, la posture modifiée présente un léger avantage sur celle standard pour cinq des sept muscles qui présentent des différences significatives entre ces deux conditions. Il est important de mentionner que le changement d'orientation de la surface causé par la modification de la hauteur permet un allègement musculaire significatif pour les fléchisseurs superficiels des doigts. Cette situation pour les hauts de portes favorise donc un meilleur appui de la ponceuse sur la surface.

Pour la section du toit (tableau 15), le fléchisseur des doigts est moins sollicité avec le manche centré (%CVM de 7,15% manche centré, 9,34% manche décentré), ce qui est cohérent avec les autres résultats observés pour les manches. Les cotes psychophysiques (6,10) associées aux manches montrent que les sujets trouvent l'outil au manche centré plus facile, avec une cote de 3,92, que l'outil au manche décentré (à 4,23). Cela est cohérent avec les résultats observés précédemment avec les mêmes outils. La hauteur modifiée permet elle aussi de diminuer les angles relatifs et absolus, tant à l'épaule qu'au coude, en comparaison avec la hauteur standard du toit. Par conséquent, les valeurs de %CVM plus faibles sont enregistrées dans le cas de la hauteur modifiée versus la hauteur standard pour le trapèze supérieur (6,78% < 8,72%), deltoïde médian (8,04% < 13,27%) et le fléchisseurs des doigts (7,79% < 8,7%). Cela est associé au positionnement du toit modifié, qui entraîne moins de flexion-abduction de l'épaule. Ces résultats sont cohérents avec la perception des sujets qui trouvent plus favorables la hauteur modifiée (cote de 3,48) que la hauteur standard (cote de 4,67).

7. VOLET IV : LES CONTRAINTES PHYSIQUES ASSOCIEES A L'ACTIVITE DE PEINTURE AUTOMOBILE

7.1 Problématique

Les peintres du secteur de la carrosserie automobiles sont à risque de développer des troubles musculosquelettiques, particulièrement au membre supérieur, lors de l'exécution de leur fonction. La tâche principale de ces travailleurs est principalement de peindre avec un pistolet des surfaces disposées verticalement et basses (les portes et les ailes) et d'autres horizontales et hautes (capot et toit). Selon l'étude exploratoire de Marchand et Giguère (2010), certaines sections de la voiture peuvent impliquer le maintien prolongé de mauvaises postures principalement à l'épaule et au poignet (figures 18 et 19). Lors de cette étude, les mauvaises postures aux membres supérieurs ont surtout été observées durant l'application de la peinture sur la section du toit de la voiture. Des flexions des épaules supérieures à 90 degrés et des déviations ulnaires importantes au poignet étaient toujours présentes lors de la réalisation de cette tâche. Pour le poignet, le problème est directement en lien avec le design des pistolets à peinture qui sont couramment utilisés dans ce milieu car il est davantage conçu pour réduire les stress sur la main lors d'une utilisation sur une surface verticale. Chez les peintres, la préhension de l'outil ainsi que l'activation de la détente, lorsque le poignet est placé dans une mauvaise posture, peuvent être les causes de l'apparition du syndrome du tunnel carpien. En effet, un effort de serrage peut entraîner une augmentation de la pression à l'intérieur du canal et donc les phénomènes de compression du nerf (Pohren, 1992). Pour réduire ces contraintes physiques, certaines pistes de solutions ont été observées et proposées lors de l'étude exploratoire de Marchand et Giguère (2010). Le but de ce volet est de valider objectivement ces pistes.



Figure 18 : La posture de travail d'un peintre lors de l'application de peinture sur une surface verticale (portière) à l'aide d'un pistolet standard.



Figure 19 : La posture de travail d'un peintre sur de l'application de peinture sur une surface horizontale (toit), à l'aide d'un pistolet standard.

Dix sujets expérimentaux ont participé à cette étude. Le tableau 19 présente les caractéristiques des sujets ainsi que l'écart type et les moyennes du groupe. Les participants devaient être

exempts de tout problème musculo-squelettiques après avoir complété un questionnaire sur la condition physique

Tableau 19 : Les caractéristiques des dix sujets du Volet IV.

	Âge (années)	Taille (m)	Poids (kg)
Moyenne	27.1	1.79	77.9
Écart-Type	8.6	0.05	14.7
Minimum	20	1.70	61.0
Maximum	50	1.87	113.1

7.2 Conditions expérimentales

La tâche des sujets consistait à peindre, avec leur main dominante, des surfaces de carton de différentes dimensions avec de l'eau. Les sujets devaient humecter le carton uniformément sur toute sa surface sans le détremper ou que des coulisses ne se forment. La formation d'une goutte d'eau sur le carton entraînait le rejet de l'essai en cours. Ces cartons étaient disposés afin de reproduire quatre sections différentes de la carrosserie d'une voiture intermédiaire (toit, capot, sections haute et basse d'une portière). Toutefois, comme les résultats obtenus pour les conditions associées aux deux sections des portières n'ont pas permis d'observer des différences significatives intéressantes, seuls les détails et les analyses des sections du toit et du capot sont présentés dans ce rapport.

Une moyenne surface (60cm X 120cm) et une grande surface (90cm X 110cm) furent utilisées pour représenter les conditions de toit et de capot, respectivement. Il est important de mentionner que, pour la condition de toit uniquement, la surface correspondait à la moitié de la dimension réelle de la pièce. Sur le terrain, les peintres ne peuvent couvrir la surface du toit en totalité lorsqu'ils sont d'un côté du véhicule. La procédure habituelle d'application de la peinture indique alors de débiter par un côté pour se diriger vers le milieu du toit. Ensuite, de manière à ne pas abîmer la peinture fraîche, ils passent du côté opposé du véhicule afin de peindre du milieu jusqu'au bord. Les hauteurs et les dimensions des surfaces utilisées représentant celles de la carrosserie d'une voiture intermédiaire ont toutes été déterminées à partir d'une Toyota Camry 2010.

Les cartons utilisés, qui représentaient les surfaces à peindre, étaient montés sur un support à hauteur ajustables et inclinables spécialement construits en extrudé d'aluminium à cette fin, qui permettait de reproduire les quatre sections décrites précédemment. Deux hauteurs (avec et sans banc), deux inclinaisons (droit et incliné) et deux pistolets (standard et modifié) étaient utilisés pour la condition du toit (figures 20 et 21). Deux surfaces (sur et sous) et deux inclinaison (droit et incliné) étaient utilisés pour les conditions du capot (figures 22 et 23). Le temps d'exécution

pour les sections de toit et de capot était de 40 secondes. Afin de prévenir l'accumulation de fatigue au membre supérieur, un repos de 3 minutes était accordé entre chaque condition.

Hauteur standard et sans inclinaison



Figure 20 : Exemple pour représenter deux conditions de la section du toit (1)

Hauteur modifiée et avec inclinaison



Figure 21 : Exemple pour représenter deux conditions de la section du toit (1)

Sur le capot et sans inclinaison



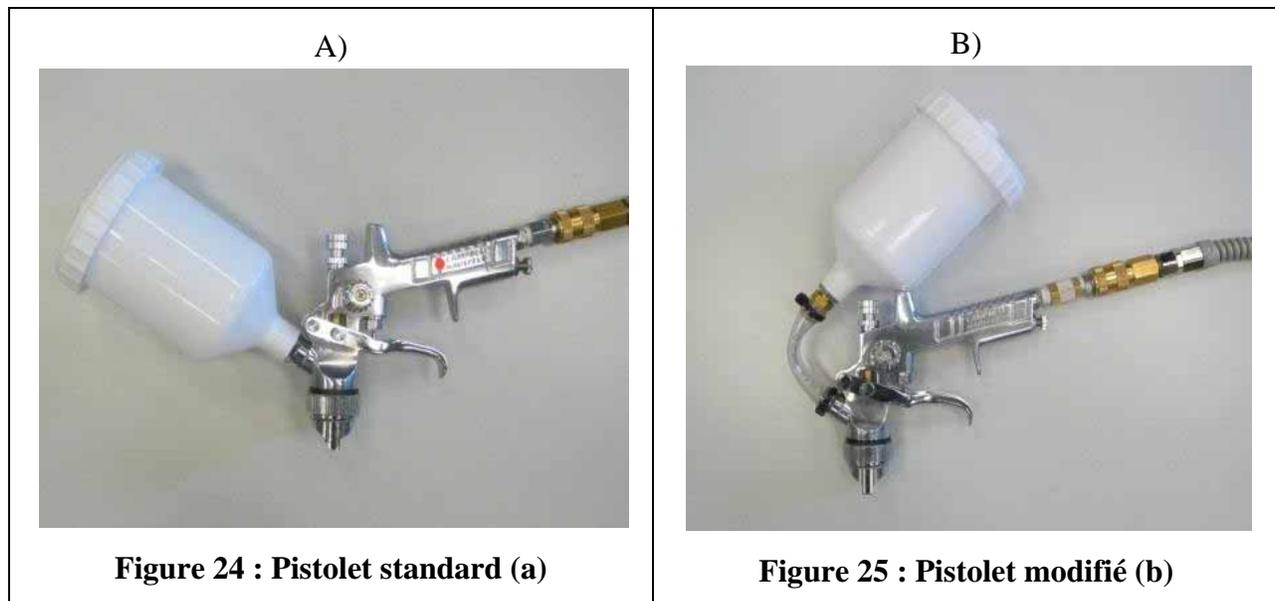
Figure 22 : Exemples pour représenter deux conditions de la section du capot (1)

Sous le capot et avec inclinaison



Figure 23 : Exemples pour représenter deux conditions de la section du capot (2)

Deux pistolets de marque Campbell Hausfeld ont été utilisés lors de l'expérimentation : le pistolet standard et le pistolet modifié. L'alimentation de ces pistolets se fait par gravité, afin de permettre l'écoulement du liquide. Le pistolet standard a principalement été conçu pour le travail sur des surfaces verticales. La disposition du réservoir, avec un angle de 30° par rapport à la verticale, permet de balancer presque parfaitement le pistolet lors de sa tenue à la verticale. L'outil exerce un très faible moment de force sur l'articulation du poignet puisque la résistance, créée par le poids du réservoir plein, passe sur le centre de la prise de l'outil. Toutefois, lorsqu'il est utilisé pour peindre une surface horizontale, la force de rotation exercée par le poids du réservoir se retrouve loin de la prise (figure 24). En changeant la disposition du réservoir (figure 25), celui-ci devient plus près du centre de la prise pour le pistolet modifié.



7.3 Résultats

La section suivante présente les résultats obtenus pour les deux variables dépendantes évaluées dans cette étude. Le pourcentage moyen de la contraction volontaire maximale (%CVM) et les côtes psychophysiques seront présentés selon deux sections distinctes, soit : la section du capot et la section du toit. Il est à noter que tous les résultats traités dans cette section proviennent des muscles du côté droit (dominant) de chacun des sujets.

7.3.1 La section du capot (plan horizontal)

Les conditions sur la section du capot ont été réalisées selon des conditions de surfaces (sur et sous) et d'inclinaison (droit et incliné). Lors de l'application de peinture, dans la chambre de peinture, la pièce repose sur un trépied inclinable. Le peintre doit alors ajuster sa posture en fonction de l'orientation de la surface et de l'espace qu'il dispose. La posture debout était adoptée pour les conditions sur la surface tandis qu'elle était accroupie (avec un genou au sol) pour les conditions sous la surface. L'inclinaison modifiée permet alors de faciliter la zone d'accès à la surface et augmente ainsi la proximité du travailleur de manière à réduire le coût musculaire à l'épaule. Les résultats analysés ont été regroupés dans le tableau 20 qui présente les valeurs moyennes de %CVM obtenues pour les différentes conditions de surfaces et d'inclinaisons de chacun des muscles ainsi que l'effet significatif principal.

Pour les conditions de surfaces, cinq muscles présentent un effet significatif soit, le deltoïde antérieur, le deltoïde postérieur, le grand pectoral, le triceps et le premier radial. Pour les conditions d'inclinaisons, le même nombre de muscles présente un effet significatif soit, le

deltoïde médian, le deltoïde postérieur, le trapèze supérieur, le triceps et les extenseurs communs des doigts

Tableau 20 : Les valeurs moyennes du pourcentage de la contraction volontaire maximale (% CVM) des conditions de la section du capot selon la surface (sur - sous) et l'inclinaison (droit – incliné), pour chacun des muscles

Muscles	Surfaces			Inclinaisons		
	sur	sous	p	droit	incliné	p
Deltoïde antérieur	8,58	13,36	*	11,41	10,53	
Deltoïde médian	10,83	9,71		13,03	7,50	*
Deltoïde postérieur	3,24	2,31	*	3,61	1,94	*
Trapèze supérieur	14,33	16,93		19,55	11,70	*
Grand pectoral	2,14	3,18	*	2,62	2,70	
Grand dorsal	2,19	3,40		3,26	2,33	
Biceps brachial	5,05	5,14		5,30	4,89	
Triceps	4,47	3,38	*	5,16	2,70	*
Extenseurs communs des doigts	12,81	13,59		14,53	11,87	*
Premier radial	11,35	8,62	*	10,50	9,48	
Fléchisseurs superficiels des doigts	4,38	3,93		3,86	4,46	
Cubital antérieur	5,19	5,81		5,42	5,58	

Légende : * si $p < 0,05$

Le deltoïde antérieur présente un effet significatif pour la variable de surface. En effet, les valeurs de %CVM sont supérieures pour les conditions sous la surface. La flexion à l'épaule est plus prononcée que pour la condition sur le capot. Ceci s'explique par le fait que la posture sous le capot semble plus difficile à maintenir à cause de la posture du membre supérieur. Pour conserver le bec du pistolet perpendiculaire à la surface, le poignet doit effectuer une déviation ulnaire. Or, puisque son amplitude est limitée, l'épaule doit compenser avec une flexion pour favoriser le maintien du pistolet. Le deltoïde antérieur est alors surchargé afin de maintenir le membre supérieur pour la condition sous le capot. Pour ce qui est du deltoïde médian, l'effet significatif est présent pour la variable d'inclinaison. Le muscle responsable de l'abduction de l'épaule travaille davantage lorsque la surface est droite (0 degré). Lorsque la surface est droite,

cela implique que la partie éloignée de celle-ci est à plus de 90 cm du travailleur. Le deltoïde médian doit alors stabiliser le membre supérieur qui est tendu complètement. Le deltoïde médian et le deltoïde antérieur montrent des valeurs élevées de %CVM lors du travail. Ces muscles sont donc susceptibles de subir une surcharge à long terme. Ce risque de surcharge est présent également chez le trapèze supérieur, où les valeurs de %CVM se situent toutes dans la zone problématique (plus de 10%, lors d'un travail statique). Même si la surface et l'inclinaison sont significatives, les résultats ne sont pas à la baisse. Quant à eux, le grand pectoral et le triceps présentent un effet significatif pour la variable de surface. Le grand pectoral est plus avantageux sur le capot grâce à un angle relatif plus petit. Tandis que le triceps a un coût musculaire plus élevé sur le capot puisque la position du coude est en extension complète. De plus, la condition de surface inclinée est avantageuse pour le triceps et les extenseurs communs des doigts, comme l'indique l'effet significatif pour ces deux muscles. Lors de la préhension du pistolet, la surface inclinée permet une légère diminution de la sollicitation musculaire des extenseurs des doigts. En effet, l'orientation de la surface à 45 degrés permet de diminuer la sollicitation musculaire des extenseurs du poignet d'environ 3% et ainsi de conserver une position relativement neutre comparativement à la surface droite, où le poignet se retrouve en déviation ulnaire.

Afin d'observer l'effet d'interactions possibles, la condition de surfaces et la condition d'inclinaisons furent analysées conjointement pour chacun des muscles. De cette manière, il a été possible d'identifier les interactions significatives qui décrivent les divergences entre les conditions. Quatre muscles présentent un effet d'interaction significatif soit le deltoïde médian, le deltoïde postérieur, le grand pectoral et le triceps. Afin de mieux analyser l'interaction Surface*Inclinaison, le tableau 21 montre la différence entre les conditions pour une valeur fixée.

Tableau 21 : Les effets d'interactions significatifs spécifiques entre les valeurs moyennes du pourcentage de la contraction volontaire maximale (% CVM) des conditions de la section du capot selon la surface et l'inclinaison, pour chacun des muscles significatifs.

Muscles	Surfaces	Inclinaisons		
		droit	incliné	(p < 0,05)
Deltoïde médian	sur	15,6	6,0	*
	sous	10,4	9,0	
	(p < 0,05)	*	*	
Deltoïde postérieur	sur	4,8	1,4	*
	sous	2,5	1,7	
	(p < 0,05)	*	*	
Grand pectoral	sur	1,8	1,3	*

	sous	3,4	2,1	
	(p < 0,05)	*		
Triceps	sur	6,5	2,0	*
	sous	3,8	1,7	
	(p < 0,05)	*		

Pour les quatre muscles présentés dans ce tableau, la variable d'inclinaison présente un effet significatif pour la condition sur le capot. Leur coût musculaire est supérieur lors d'un travail sur une surface droite comparativement à une surface inclinée. Le deltoïde médian et le deltoïde postérieur présentent des valeurs de %CVM de 2,6 et de 3,4 fois plus élevées, respectivement, pour une condition sur le capot droit (0 degré). Cela s'explique par le fait qu'une surface à angle droit (0 degré) exige de maintenir le membre supérieur tendu afin de couvrir la totalité de la surface. Au contraire, la surface inclinée permet au travailleur d'être à proximité de la surface et ainsi réduire les mouvements de grande amplitude à l'épaule et au coude. Effectivement, le coude en flexion ne sollicite pas l'action du triceps ou très peu. Le travail sur une surface inclinée permet de réduire le coût musculaire du triceps de 3,25 fois comparativement à son travail sur une surface droite, où le coude est maintenu en extension. De plus, la variable inclinaison (droit, incliné) présente un effet significatif sur les différentes surfaces. Pour une surface droite (0 degré), les quatre muscles mentionnés plus haut présentent des valeurs de %CVM plus grandes lors d'un travail sur le capot. Tandis que pour une surface inclinée (45 degrés), les valeurs de %CVM du deltoïde médian, deltoïde postérieur et du grand dorsal sont plus basses pour les conditions sur le capot. Nous pouvons l'expliquer par le fait que les postures optimales varient en fonction de l'inclinaison et du côté de la surface. Pour une surface droite (0 degré), la position accroupie sous le capot est plus avantageuse en termes de coût musculaire, pour les stabilisateurs de l'épaule et du coude, puisqu'elle permet au travailleur de conserver le membre supérieur fléchi et près du corps.

Quant à la surface inclinée, la posture optimale pour les muscles stabilisateurs est réalisée lors du travail sur le capot. En somme, il est plus avantageux de réaliser le travail sur la surface plutôt qu'en dessous. De plus, l'inclinaison de la surface aide à diminuer la sollicitation musculaire de la plupart des muscles, mais pas complètement. Il serait donc avantageux de créer un support à pièce pivotant des deux côtés de manière à ce que le travailleur n'ait pas à élever le membre supérieur dominant plus haut que 45 degrés. Alors, il serait possible d'éviter la surcharge des muscles fléchisseurs (deltoïde antérieur et trapèze supérieur).

Pour l'analyse de cotes psychophysiques, l'inclinaison de la surface est favorable pour la région de l'avant-bras et du poignet. En effet, le tableau 22 présente un effet significatif pour ces deux régions anatomiques. La surface inclinée (45 degrés) nécessite une moins

grande amplitude de mouvement au poignet. La préhension de l'outil est perçue comme plus confortable, donc moins exigeante selon les sujets.

Tableau 22 : Les valeurs moyennes des cotes psychophysiques de la section du capot selon la surface (sur – sous) et l'inclinaison (droit – incliné), pour chacune des régions anatomiques, ainsi que l'effet significatif principal.

Régions anatomiques	Surface			Inclinaison		
	sur	sous	p	droit	incliné	p
Épaule	4,4	4,2		4,6	4,0	
Avant-bras	4,0	3,8		4,3	3,5	*
Poignet	4,2	3,8		4,5	3,5	*
Légende : * si $p < 0,05$						

Pour cette section, la problématique majeure du travail sur la pièce est l'amplitude de mouvement demandée pour accéder à la surface du capot en totalité. Pour les conditions de surfaces, les résultats des angles à l'épaule et au coude varient en fonction de la zone à peindre (éloignée ou rapprochée). En effet, le travail sur la surface en zone éloignée exige de tendre le membre supérieur loin devant tandis que pour la zone rapprochée, le bras est près du corps. Selon les résultats obtenus, une grande amplitude articulaire à l'épaule est présente lorsque le travail est effectué en zone éloignée comparativement à une zone rapprochée. Peindre sous le capot se fait avec une flexion importante du coude, ce qui permet de conserver le membre supérieur près du corps. De plus, l'amplitude articulaire à l'épaule est avantageuse uniquement lorsque le travail est réalisé en zone éloignée. Pour ces conditions sous le capot, la section éloignée désigne le point de départ lors de l'expérimentation et non la distance de la surface par rapport au participant. Selon nos observations, les sujets ne bougeaient pas leurs pieds pour se repositionner adéquatement sous la surface. L'adaptation face à la réalisation du travail se faisait avec le positionnement tendu du membre supérieur par la majorité des sujets. Or, cette adaptation n'était pas toujours à l'avantage d'un coût musculaire plus faible puisque la zone dite « rapprochée » occasionnait une flexion importante à l'épaule.

Pour peindre sur le capot, au contraire, les résultats ont démontrés que l'application de peinture réduisait la sollicitation des muscles à l'épaule et au poignet. Les peintres ont donc avantage à éliminer le travail sous la surface du capot puisqu'elle engendre également des problèmes de stabilité due au positionnement inadéquat des membres inférieurs contre le sol : flexion importante des genoux, pieds en contact partiel avec le sol, etc. (Dababneh et Waters, 1999). En travaillant uniquement sur la surface, la hauteur du trépied pourrait être abaissée afin de réduire les amplitudes de mouvement. La hauteur d'une surface de travail et le type de surface (horizontale, inclinée, etc.) sont des paramètres importants lors d'une analyse ergonomique de

travail (ASSTSAS, 2005; Grandjean, 1988; Dababneh et Waters, 1999). Il est connu qu'une surface de travail trop haute affecte la posture de l'épaule ainsi que l'activation musculaire (EMG) à cette articulation (Mell et al. 2006). Un abaissement du plan de travail favoriserait davantage la réduction du coût musculaire du trapèze supérieur et des trois portions du deltoïde. Rappelons-nous que cette hauteur avait été déterminée afin qu'un travailleur puisse passer sous la pièce pour réaliser le travail.

Bien que la surface puisse se baisser, il n'en demeure pas moins que l'atteinte des extrémités de la pièce est difficile d'accès lorsque celle-ci est à l'horizontale. Effectivement, Björing et Hägg (1999) ont démontré que le travail sur une surface horizontale présente plus de risques de développer une tendinite à l'épaule à cause de la réalisation d'une abduction prononcée du membre supérieur. La surface inclinée permet donc de réduire l'angle de flexion et d'abduction à l'épaule puisque l'inclinaison de la surface permet un léger abaissement de la hauteur du plan de travail, en zone rapprochée. Aussi, les valeurs du %CVM montrent une diminution de la sollicitation de tous les muscles lors d'un travail sur un plan incliné. Cette situation est d'autant plus avantageuse pour les extenseurs du poignet puisque le plan de travail incliné permet de réduire la déviation ulnaire et facilite la préhension du pistolet (Lamoureux et Hoffer, 1995; Terrel et Purswell, 1976). Pour cette condition, la moyenne des cotes psychophysiques présente des effets significatifs au niveau de l'avant-bras et du poignet. En effet, l'inclinaison de la surface à 45° permet au poignet de conserver sa position neutre ce que le plan horizontal (droit) ne permet pas. Les sujets ont sûrement trouvés que les muscles à l'avant-bras et au poignet, qui interviennent lors de la préhension du pistolet, étaient moins sollicités. De plus, la perception des participants indique que l'effort était plus exigeant pour une surface horizontale, lors d'un travail sur le capot.

Afin de maximiser les avantages d'un travail sur une surface inclinée et de réduire les contraintes associées à la zone éloignée, le trépied devrait pouvoir pivoter sur 180° de manière à permettre l'inclinaison de 45° sur les deux côtés. Le travailleur pourrait alors réaliser le travail sur la première moitié du capot, et faire pivoter la pièce de l'autre côté pour travailler sur l'autre moitié. Dans un tel cas, les mouvements à l'épaule et au poignet conserveraient de faibles amplitudes de mouvement puisque le peintre travaillerait toujours sur la partie inférieure devant lui.

7.3.2 La section du toit (plan horizontal)

Les conditions sur la section du toit ont été réalisées selon des conditions de hauteurs (standard et modifié), d'inclinaisons (droit et incliné) et de pistolets (standard et modifié). En effet, la hauteur modifiée correspond à l'ajout d'un banc afin de surélever le travailleur par rapport à son plan de travail. Quant à la variation de l'inclinaison du toit, elle provient de la simulation d'un système de levage aux quatre roues. Le côté opposé au plan de travail du peintre (ex : roues avant et

arrière du côté droit), sur le véhicule, est surélevé de manière à obtenir une pente de 8 degrés d'inclinaison au toit. Ces deux variables permettent de faciliter l'accès à la surface et ainsi réduire le coût musculaire à l'épaule. De plus, ces modifications ont été pensées dans le but de réduire les contraintes associées à la prise du pistolet sur un plan horizontal. Dans le même ordre d'idée, la modification du pistolet a été réalisée afin de diminuer la charge de travail des muscles responsables de la préhension d'un pistolet sur un plan horizontal. La prise des deux pistolets est similaire, mais le centre de masse (balancement) est différent.

Les résultats analysés ont été regroupés dans le tableau 23 qui présente les valeurs moyennes du %CVM obtenues pour les différentes conditions de hauteurs, d'inclinaisons et de pistolets pour chacun des muscles étudiés ainsi que l'effet significatif principal. Pour les conditions de hauteurs, cinq muscles présentent un effet significatif soit, les trois portions du deltoïde (antérieur, médian et postérieur), le trapèze supérieur et le triceps. Pour les conditions d'inclinaisons, les mêmes muscles montrent un effet d'interaction à l'exception du deltoïde antérieur. Finalement, trois muscles démontrent un effet significatif, pour les conditions de pistolets, soit les extenseurs communs des doigts, le premier radial et le cubital antérieur. Les résultats démontrent que les conditions de hauteurs ont eu une influence sur les muscles de l'épaule. La hauteur modifiée, qui permet de réduire l'angle relatif à l'épaule, a permis une réduction de la sollicitation musculaire des trois portions du deltoïde (antérieur, médian et postérieur) de 3,12%, 6,05% et 1,48% respectivement. Le trapèze supérieur, qui est impliqué dans l'élévation de l'omoplate lorsque le membre supérieur est tendu vers l'avant, montre une réduction de 6,81% de la sollicitation musculaire pour une hauteur modifiée. Diminuer la hauteur du plan de travail avec l'ajout d'un banc est très avantageux pour le coût musculaire du travailleur. Toutefois, les valeurs de %CVM restent dans une zone problématique (plus de 10%) pour le deltoïde médian et le trapèze supérieur, et ce, même si la condition est modifiée. L'inclinaison contribue également à réduire le coût musculaire pour les muscles du deltoïde médian et le trapèze supérieur. Cependant, les valeurs élevées du %CVM du deltoïde médian sont dues aux larges dimensions de la pièce qui créent une abduction importante à l'épaule. Le trapèze supérieur, qui intervient lors de l'abduction à l'épaule, est lui aussi sollicité fortement, tel que le démontrent ses résultats de 22,32% et 20,55% pour les conditions d'inclinaison droit et incliné, respectivement. La variation des pistolets, quant à elle, n'a aucune influence sur les muscles localisés au niveau de l'épaule.

Tableau 23 : Les valeurs moyennes du pourcentage de la contraction volontaire maximale (% CVM) des conditions de la section du toit selon la hauteur (standard - modifiée), l'inclinaison (droit – incliné) et le pistolet (standard – modifié), pour chacun des muscles

Muscles	Hauteur			Inclinaison			Pistolet		
	standard	modifiée	p	droit	incliné	p	standard	modifié	p
Deltoïde antérieur	12,31	9,19	*	11,05	10,46		10,86	10,64	
Deltoïde médian	19,67	13,02	*	17,75	14,95	*	16,69	16,01	
Deltoïde postérieur	5,23	3,75	*	4,95	4,03	*	4,49	4,49	
Trapèze supérieur	24,84	18,03	*	22,32	20,55	*	21,52	21,35	
Grand pectoral	1,70	1,78		1,72	1,75		1,72	1,75	
Grand dorsal	3,10	2,31		2,86	2,55		2,71	2,70	
Biceps brachial	5,47	5,38		5,25	5,59		5,28	5,56	
Triceps	8,34	5,01	*	7,47	5,88	*	6,80	6,55	
Extenseurs communs des doigts	11,63	11,61		11,73	11,51		12,75	10,49	*
Premier radial	9,68	10,17		10,04	9,81		11,11	8,74	*
Fléchisseurs superficiels des doigts	4,28	4,10		4,17	4,21		3,84	4,54	
Cubital antérieur	5,87	5,72		5,72	5,87		5,55	6,05	*

Légende : * si $p < 0,05$

Pour le triceps, les valeurs du %CVM sont acceptables (zone jaune) et elles vont dans le même sens avec une réduction de la sollicitation musculaire lors d'un travail sur une hauteur modifiée. Un bon positionnement, lors d'une hauteur modifiée, permet au travailleur de se rapprocher de la surface et ainsi permettre la flexion du coude. Le triceps (long chef), qui est un extenseur de l'épaule et du coude, mobilise le membre supérieur vers l'avant afin de stabiliser la position. Son action est alors moins importante lorsque l'angle à l'épaule et au coude sont réduits, d'où la baisse du coût musculaire. La condition inclinée montre également un avantage pour ce muscle associé à la réduction de l'angle relatif à l'épaule.

Les muscles de l'avant-bras ne présentent aucun effet significatif pour les variables de hauteurs et d'inclinaisons. Toutefois, la variation des pistolets modifie le travail des extenseurs du poignet et des doigts ainsi qu'un fléchisseur du poignet. La préhension du pistolet est restée la même pour les deux types de pistolets. Afin d'orienter le bec du pistolet vers le bas (sur un plan horizontal), le poignet effectue une déviation ulnaire. Le premier radial, qui est responsable de la déviation radiale du poignet, est alors très étiré. Les muscles extenseurs du poignet et des doigts sont également étirés puisqu'ils sont sollicités lors de la préhension du pistolet et des mouvements d'extension au poignet suite au balayage de la surface. Un muscle trop étiré perd de sa capacité contractile et ainsi demande une plus grande sollicitation musculaire pour fournir la même force. De plus, l'orientation de la charge (le réservoir), qui se traduit par le centre de masse de l'outil, peut contribuer à la réduction de la sollicitation d'un muscle. Comme le démontrent les résultats, le déplacement vers l'arrière du réservoir sur le pistolet modifié réduit la sollicitation musculaire des muscles extenseurs à l'avant-bras. La réduction du %CVM est de 2,26% et de 2,67% pour les extenseurs communs des doigts et le premier radial respectivement, pour le pistolet modifié. Les valeurs présentées sont toutefois élevées due à la prise du pistolet qui crée une surcharge sur les extenseurs. Les valeurs du %CVM des fléchisseurs au poignet montrent, quant à eux, une augmentation de la sollicitation musculaire pour le pistolet modifié. La position du réservoir vers l'arrière (pistolet modifié) offre une résistance supplémentaire sur les fléchisseurs, de sens opposé. Le cubital antérieur, qui effectue la déviation ulnaire du poignet, doit fournir davantage de force lors de la préhension du pistolet sur une surface horizontale. Toutefois, cette augmentation de la sollicitation des fléchisseurs est mineure comparativement à la diminution du %CVM des extenseurs.

Les conditions de hauteurs, d'inclinaisons et de pistolets furent analysées conjointement pour observer l'effet d'interactions possibles pour chacun des muscles. Seul le deltoïde antérieur présente une interaction significative, entre les variables d'inclinaisons et de pistolets. Le tableau 24 ci-dessous, montre les interactions significatives spécifiques des deux variables ainsi que les valeurs moyennes du %CVM du deltoïde antérieur.

Tableau 24 : Les effets d'interactions significatifs spécifiques entre les valeurs moyennes du pourcentage de la contraction volontaire maximale (% CVM) des conditions de la section du toit.

Muscles	Inclinaisons	Pistolets		
		standard	modifié	(p < 0,05)
Deltoïde antérieur	droit	11,4	10,7	*
	incliné	10,3	10,6	
	(p < 0,05)	*		

L'effet principal du deltoïde antérieur n'était pas significatif pour les conditions de pistolets. Toutefois, la combinaison de l'inclinaison et du pistolet forme le seul effet d'interaction significatif spécifique pour ce muscle. En effet, la première rangée de valeurs du tableau 23 indique que le pistolet standard exige un coût musculaire supérieur lorsque le travail est réalisé sur une surface droite. Ceci s'explique par le fait que le pistolet modifié favorise la préhension de l'outil alors que le pistolet standard est plus exigeant à maintenir sur un plan horizontal. Le centre de masse du pistolet modifié, qui se retrouve plus près que celui de l'autre pistolet, réduit le bras de résistance et ainsi le moment de force à l'épaule. Cette petite différence due au déplacement de la charge (réservoir) permet de soulager l'effort du deltoïde antérieur lorsque le membre supérieur est tendu vers l'avant. Ces résultats démontrent l'avantage du pistolet modifié qui a été conçu spécifiquement pour les surfaces horizontales. De plus, l'inclinaison de la surface est bénéfique à la réduction de la sollicitation musculaire du deltoïde antérieur. Pour un travail avec le pistolet standard, les valeurs du %CVM sont de 11,4% et de 10,3% pour une inclinaison droite (0 degré) et incliné (8 degrés). L'inclinaison de la surface permet de réduire l'angle relatif à l'épaule, ce qui entraîne une diminution du coût musculaire du muscle responsable de la flexion de l'épaule.

Pour l'analyse de cotes psychophysiques, plusieurs effets significatifs sont présents pour les différentes articulations. Selon les résultats des cotes psychophysiques, la hauteur modifiée a un effet bénéfique sur les trois régions anatomiques (tableau 25). La hauteur modifiée permet au travailleur de se rapprocher du plan de travail et ainsi lui procurer un meilleur confort. Suivant la même logique, les résultats des sujets démontrent que l'effort est plus faible lorsque la hauteur est modifiée (ajout d'un banc). L'inclinaison présente le même effet sur chacune des régions anatomiques pour la condition modifiée. En effet, l'inclinaison du toit permet de réduire l'angle relatif à l'épaule et diminue la déviation ulnaire du poignet lors de la préhension de l'outil. Les résultats des sujets démontrent qu'ils perçoivent un effort plus faible sur une surface inclinée, pour la région de l'épaule, de l'avant-bras et du poignet. Quant à la modification du pistolet, les participants ressentent une tension moins grande au niveau du poignet. Cela est logique puisque le pistolet modifié permet de réduire la charge exercée sur les déviateurs radiaux qui sont étirés.

Tableau 25 : Les valeurs moyennes des cotes psychophysiques de la section du toit selon la hauteur (standard - modifiée), l'inclinaison (droit – incliné) et le pistolet (standard – modifié), pour chacune des régions anatomiques

Régions anatomiques	Hauteur			Inclinaison			Pistolet		
	standard	modifiée	p	droit	incliné	p	standard	modifié e	p
Épaule	5,8	4,9	*	5,6	5,1	*	5,4	5,3	
Avant-bras	4,7	4,1	*	4,7	4,1	*	4,5	4,3	
Poignet	5,6	4,4	*	5,3	4,7	*	5,4	4,6	*
Légende : * si $p < 0,05$									

Pour peindre le toit, l'inaccessibilité de la pièce lors d'un travail sur une surface non modifiée est également problématique. Selon les résultats obtenus pour des travailleurs de grandeur moyenne de 1,79m (5' 10), où la portée moyenne est sensiblement égale, les muscles situés au niveau de l'épaule (deltoïde antérieur, deltoïde médian et trapèze supérieur) et les muscles extenseurs du poignet (extenseurs communs des doigts et premier radial) sont grandement impliqués lors des conditions de hauteurs et d'inclinaisons non modifiées. En effet, la position du membre supérieur se retrouve plus haute que le niveau des épaules pour atteindre la surface du toit. De plus, la largeur non négligeable de la pièce engendre une abduction à l'épaule lors des mouvements de balayage (Björing et Hägg, 1999). Une élévation du membre supérieur, en flexion et en abduction, augmente alors la charge mécanique à l'épaule (Sigholm et al., 1982. Jarvholm et al., 1988). En effet, la valeur du moment de force à une articulation est proportionnelle à la distance séparant la charge de cette articulation. La flexion du tronc peut permettre une meilleure portée sur la surface de travail. Au lieu de maintenir le coude tendu, la flexion du tronc permet au travailleur de se rapprocher de la zone et de fléchir le coude lors du travail. La condition de hauteur modifiée permet alors de réduire l'amplitude articulaire de l'épaule et du coude, de tous les angles évalués.

La manipulation de la hauteur d'une surface de travail est un élément important pour prévenir le travail avec les membres supérieurs surélevés (Grandjean, 1988; Järholm et al., 1991; Badabneh et Waters, 1999). D'ailleurs, la modification de la hauteur a permis une réduction de près de 3% de la sollicitation du muscle responsable de la flexion à l'épaule. Considérant que la hauteur ajustée est fixe, une modification plus importante de la hauteur favoriserait une meilleure réduction du coût musculaire au deltoïde antérieur. En plus, l'inclinaison de la surface présente des effets significatifs pour la majorité des muscles étudiés. Dans le même ordre d'idée, un meilleur gain de l'inclinaison du toit pourrait être réalisable si les chambres de peintures étaient munies d'élévateurs pneumatiques aux quatre roues.

Le deltoïde antérieur et médian et le trapèze supérieur présentent des valeurs du %CVM supérieur à la limite du 10% pour un travail statique. Considérant que l'étude actuelle fait abstraction de la fatigue musculaire lors de l'expérimentation, toutefois elle peut apparaître lors d'un cycle de travail chez un peintre. Lors d'une contraction prolongée avec différents groupes musculaires, le délai d'apparition de la fatigue varie subséquemment (Barry et Enoka, 2007). Cette variation peut être causée, entre autres, par le type de fibres musculaires et le positionnement des articulations. Or, le changement d'orientation de l'avant-bras, même en maintenant les mêmes angles aux articulations de l'épaule et du coude, peut influencer la durée de la force et la position des tâches (Rudroff et al., 2007).

Les résultats des muscles de l'avant-bras et du poignet sont influencés par la modification du pistolet. Le pistolet modifié, qui présente un déplacement du centre de masse vers l'arrière, a été conçu pour les conditions sur un plan horizontal spécifiquement. Cette modification est justifiée par le fait que la prise du pistolet standard occasionne une déviation ulnaire importante, en plus du réservoir qui applique une charge dans ce sens. Les résultats pour le pistolet standard démontrent qu'une telle posture au poignet augmente la sollicitation musculaire des extenseurs du poignet qui sont actifs lors de la prise du pistolet. Effectivement, ces muscles travaillent en synergie avec les fléchisseurs du poignet pour effectuer la préhension du pistolet. Bien que le centre de masse de l'outil soit mieux réparti, l'angle entre la buse et la prise de l'outil reste toutefois problématique pour conserver le poignet dans une position optimale. La modification de la prise du pistolet aurait été complexe à réaliser dans le court laps de temps dévolu à cette étude. De plus, les coûts et les matériaux nécessaires à la fabrication d'un tel produit n'étaient pas disponibles dans le budget de cette étude. Le pistolet modifié a donc conservé la même prise que le pistolet standard, toutefois, la charge du réservoir a été déplacée judicieusement.

Une mauvaise posture à elle seule ne constitue pas un facteur de risque amenant à une blessure. Toutefois, une combinaison de facteurs de risques peut à long terme développer un problème musculo-squelettique, tel une mauvaise posture et une charge importante. Bien que le poids du pistolet soit faible, la nature du travail statique accentue cette charge sur une longue période de travail. Nous avons pu constater que le déplacement du centre de masse du pistolet modifié réduit la sollicitation des muscles extenseurs du poignet. Même si le muscle est encore étiré, la charge du réservoir se dirige dans le sens opposé de l'étirement et favorise ainsi un allègement musculaire, comparativement aux résultats du pistolet standard. Avec les résultats obtenus (épaule et coude), les angles ne permettent pas de quantifier l'influence du pistolet sur le poignet. Seuls les séquences vidéo des conditions et les %CVM démontrent que la condition de hauteur modifiée sur un plan incliné améliore la posture du poignet et réduit la sollicitation musculaire respectivement (Werner et al., 1997). Il ne faut pas oublier que la quantité de peinture contenue dans le réservoir modifie la charge du pistolet et rend son maintien plus exigeant pour les muscles à l'avant-bras et au poignet.

8. RECOMMANDATIONS

8.1 Recommandations associées aux activités boulonnage

La première recommandation est de toujours saisir l'outil à deux mains lors du boulonnage. Comme cela a été précédemment présenté, cette stratégie induit une diminution de la contrainte musculaire ainsi qu'une possible diminution de l'effort excentrique associé aux contrecoups.

La réalisation du boulonnage avec le coude fléchi est conseillée lors de l'utilisation de la clé à chocs pneumatique sur le plan vertical. Ce positionnement cause une diminution du BR, une diminution de l'étirement passif des muscles extenseurs de l'épaule qui peuvent nuire aux fléchisseurs et une réduction du raccourcissement des muscles agonistes. Ceci a pour effet de diminuer la demande musculaire moyenne et maximale lors du boulonnage dans un plan vertical.

L'utilisation d'une rallonge de 45 centimètres est conseillée lors du boulonnage sur le plan horizontal de manière à permettre la flexion du coude. La flexion du coude induit une diminution du BR et de l'étirement passif des muscles extenseurs de l'épaule. Ceci a pour effet de réduire la demande musculaire moyenne et maximale lors du boulonnage sur le plan horizontal.

Quant au choix de l'outil, à partir des résultats présentés, il s'avère difficile de déterminer un outil qui serait hors de tout doute plus avantageux lors de son utilisation sur le plan vertical. D'une manière générale, les résultats ont présenté un certain avantage pour l'outil lourd lors du boulonnage sur le plan horizontal. Par contre, les résultats permettent difficilement de prendre une décision quant à l'outil recommandé lors du boulonnage sur le plan vertical.

8.2 Recommandations associées aux activités de ponçage

Afin d'améliorer la posture lors du ponçage du toit, un banc devrait être disposé de sorte que les travailleurs pourraient y monter pour effectuer leurs tâches. Une telle installation permet principalement de réduire l'angle relatif à l'épaule. L'amélioration de la posture permet de diminuer la sollicitation des muscles de l'épaule et de la ceinture scapulaire.

Pour le ponçage des sections basses de la voiture, il est recommandé d'utiliser un banc et un appui comme sa propre jambe. L'épaule est alors soulagée de la charge statique que représente le poids du bras. De plus, lorsque l'orientation de la surface est vers le bas (ex: bas de porte), la gravité entraîne l'objet dans la même direction sauf que le mouvement devant être effectué est vers le haut. La force étant déployée doit donc être plus importante puisqu'il faut contrer la gravité ainsi qu'appliquer la pression nécessaire pour effectuer la tâche.

8.3 Recommandations associées aux activités de peinture

Pour le pistolet à peinture, le modèle standard convient principalement pour l'application des produits sur une surface verticale. Lors de travail sur un plan horizontal (par exemple: le toit ou le capot), la position standard du réservoir vient nuire au travailleur en éloignant le centre de masse de l'outil de la prise et augmenter ainsi les contraintes aux articulations du membre supérieur. Pivoter le barillet de l'avant à l'arrière du pistolet, permettrait au contraire de rapprocher le centre de masse de l'outil de la main et ainsi atténuer le moment de force au poignet.

Pour le dessus du capot, un support à pivots permet d'incliner la surface vers le peintre, diminuant ainsi la flexion nécessaire à l'épaule et la déviation ulnaire au poignet lorsqu'un pistolet standard est utilisé. Pour le dessous du capot, le support inclinable permet de réduire les contraintes ressenties aux articulations du poignet et de l'épaule en plus de fournir une meilleure visibilité au peintre.

Pour la section du toit, il est avantageux de se surélever pour principalement de réduire l'angle relatif à l'épaule. Cette amélioration de la posture permet également de diminuer le recrutement des muscles l'épaule et de la ceinture scapulaire.

9. CONCLUSION

Les résultats de cette étude ont permis de quantifier de façon objective les contraintes physiques observées, lors d'une précédente activité de recherche dans les garages, chez les mécaniciens, peintres et carrossiers (Marchand et Giguère, 2010). Ils ont particulièrement démontré, que pour réduire les contraintes musculaires aux membres supérieurs, la modification des postures utilisées semble plus importante que le poids des outils. Le premier volet a apporté un éclairage nouveau sur la pénibilité des situations de travail où les bras se retrouvent au-dessus des épaules. Elle a mis en évidence que l'angle relatif à l'épaule doit absolument être considéré lors de l'analyse des contraintes posturales. Pour l'épaule, les résultats obtenus remettent en question la validité de l'analyse des moments de force qui sont réalisés avec les logiciels existants sur le marché. Ils confirment aussi que la mesure seule de l'EMG ne représente pas le niveau de tension exercé sur les différentes structures musculaires (fibres, tendons et insertions tendineuses). L'EMG demeure seulement une variable intéressante pour identifier les situations susceptibles de causer plus rapidement de la fatigue lorsqu'un fort pourcentage des fibres musculaires (ou unités motrices) est requis pour faire la tâche.

Le volet sur le boulonnage a permis de démontrer que certaines stratégies réduisent considérablement les niveaux de sollicitation musculaires. Par exemple, l'utilisation de la rallonge pour le travail sous le véhicule permet de réduire les contraintes à l'épaule même si elle augmente grandement le poids de l'outil. Les résultats ont démontré aussi que la tenue de l'outil à deux mains semble essentielle pour limiter les contraintes associées à la présence des contre-coups lors de la phase de serrage.

Pour le travail de ponçage, les résultats ont démontré que l'utilisation d'un banc permet d'amélioration de la posture et de diminuer la sollicitation des muscles de l'épaule et de la ceinture scapulaire. On constate aussi l'importance pour les travailleurs, d'utiliser des dispositifs qui permettent de changer l'orientation des surfaces à poncer pour réduire les contraintes musculaires aux avant-bras.

Chez les peintres, l'optimisation de la hauteur de travail a permis de réduire les pourcentages d'une contraction volontaire maximale pour les muscles de l'épaule et de la ceinture scapulaire. Cette baisse suggère que la variation de hauteur d'un plan de travail et son inclinaison a un effet positif sur la demande musculaire associée à une posture. Les résultats ont aussi démontrés que l'utilisation du pistolet modifié présente un effet significatif pour certains muscles du poignet, mais que l'outil ne permet pas de réduire de manière importante l'activation des muscles fléchisseurs du poignet. Il serait intéressant de poursuivre cette étude en tentant de concevoir un type de poignée qui permettrait de réduire les contraintes physiques associées à la préhension du pistolet sur une surface horizontale.

Il est important de mentionner que l'évaluation des contraintes physiques à l'aide des mesures de la cinématique était particulièrement difficile pour les volets 2 et 3. En effet, lorsque les outils sont tenus à deux mains ou encore appuyer contre une surface, il devient très difficile de mesurer les contraintes que la combinaison « posture-outil » exerce sur les articulations des membres supérieurs. Dans ces situations, l'EMG demeure probablement le indice qui soit en mesure de fournir une mesure fiable des contraintes physiques et tenant compte du niveau de raccourcissement ou d'allongement des muscles étudiés.

Les résultats de cette étude ont permis de valider objectivement plusieurs pistes de solutions pour réduire les contraintes aux membres supérieurs. Les recommandations du présent rapport seront remises aux conseillers en prévention de ce secteur d'activité et pourront être utilisées comme amorce pour des interventions futures.

BIBLIOGRAPHIE

- Armstrong T.J., Fine L.J., Radwin R.G et Silverstein B.S. Ergonomics and the effects of vibration in hand-intensive work. *Scand. J Work Environ Health*, 13(4):286-289, 1987.
- Armstrong T.J., Bir C., and Foulke J.. Muscle responses to simulated torque reactions of hand-held power tools. *Ergonomics* 42 (1):146-159, 1999.
- Barregard, L. Short daily exposure to hand-arm vibrations in Swedish car mechanics. *Applied occupational and environmental hygiene*. 18 (1): 35-40, 2003.
- Bovenzi M., La Vedova A., et Nataletti P.. Work-related disorders of the upper limb in female workers using orbital sanders. *International Archives of Occupational and Environmental Health* 78 (4):303-310, 2005.
- Brown, S.J., Child, R.B. Day, S.H., Donnelly, A.E. Exercise-induced skeletal muscle damage and adaptation following repeated bouts of eccentric muscle contractions. *Journal of sports sciences*, 15: 215-222, 1997.
- Byström, S., Hall, C., Welander, T., Kilbom, A. Clinical disorders and pressure-pain threshold of the forearm and hand among automobile assembly line workers. *Journal of hand surgery*, 20(6): 782-790, 1995.
- Cailliet, R. 1981. *Shoulder pain*. 2, ed. (F.A Davis Company, Philadelphia).
- Chaffin, D.B. 1973. Localized muscle fatigue – definition and measurement. *Journal of Occupational Medicine*, 15 (4), 346-354.
- Clarkson, P.M., Sayers, S.P. Etiology of exercise-induced muscle damage. *Canadian journal of applied physiology*. 24: 234-248, 1999.
- Courtney T.K. et Webster B.S.. Disabling occupational morbidity in the United States. *J. Occ. and Env. Med.*, 41(1):60-69, 1999.
- Debabneh, A. Waters, T. 1999. The ergonomic use of hand tools : Guidelines for the practitioner. *Apply Occupational Environmental Hygiene*, 14 (4) : 208-215
- Dolezal, B. Potteiger, J.A., Jacobsen, D.J., Benedict, S.H. Muscle damage and resting metabolic rate after acute resistance exercise with and eccentric overload. *Medicine and science in sports and exercise*. 32: 1202-1207, 2000.
- Eklund, G., Hagbarth, K.E. Normal variability of tonic vibration reflexes in man. *Experimental neurology*. 16: 80-82, 1966.
- Forsman, M., Cyren, H., Moller, T. Activity in five muscles during joint securing using pneumatic nutrunners. *International journal of industrial ergonomics*. 29(1): 21-32, 2002.
- Freivalds A. et Eklund J.. Reaction torques and operator stress while using powered nut runners. *Applied Ergonomics* 24 (3):158-164, 1993.
- French, E.B. Price, W.H. 1962. Anterior tibial pain. *Br Med J*. 315, 1290-1296.

- Giguère, D., Marchand, D., Rouleau, A., Giusti, L. et Jargot, J. : " Congrès annuel de l'Association canadienne d'ergonomie (38e), Toronto (On), 17 - 19 octobre 2007., Comptes-rendus disponibles sous forme électronique. ISBN 978-0-9732384-5-7.
- Godon, B. Crielaard, J.M. 2005. Syndrome des loges en traumatologie du sport. *Rev Med Liege*. 60 (2), 109-116.
- Gold J.E, Fulmer S.et Tak S.. Ergonomic hazards in automotive service technicians, *Meeting Diversity in Ergonomics. Proceedings of the 16th Congress of the International Ergonomics Association*, Maastricht, The Netherlands, 10-14 July 2006, Edited by R.N. Pikaar, E.A.P. Koningsveld and P.J.M. Settels. Elsevier, Amsterdam. Disponible sur CD-ROM, 2006.
- Gowitzke, B. A., Milner, M. Understanding the scientific bases of human movement. Williams and Wilkins, 1980.
- Grandjean, E. 1988 Fitting the task to the man: A textbook of occupational ergonomics. Philadelphia : Taylor and Francis.
- Grieco, A., Molteni, G., De Vito, G., Sias, N. Epidemiology of musculoskeletal disorders due to biomechanical overload. *Ergonomics*. 41(9): 1253-1260, 1998.
- Hagberg, M., Silverstein, B., Wells, R., Smith, M.J., Hendrick, H.W., Carayon, P., Pérusse, M. Work in related musculoskeletal disorders: A reference book for prevention, Kuorinka I. et Forcier L. Taylor & Francis, 1995.
- Hansson J.E., Eklund L. et Kihlberg S. Vibration in car repair work. *Applied Ergonomics* 18 (1):57-63, 1987.
- Jarvholm, U. Palmerud, G. Herberts, P. Hogfors, C. Kadefors, R. 1988. Intramuscular pressure in the supraspinatus muscle. *Journal Orthop Res*. 6 : 230-238.
- Jarvholm, U. Palmerud, G. Herberts, P. Hogfors, C. Kadefors, R. 1989. Intramuscular pressure and electromyography in the supraspinatus muscle at shoulder abduction. *Clinic Orthop Relat Res*. 245, 102-109.
- Jarvholm, U. Palmerud, G. Karlsson, D. Herberts, P. Kadefors, R. 1991. Intramuscular pressure and electromyography in four shoulder muscles, *Journal of Orthopaedic Research*, 9 : 609-619.
- Kant I., Notermans J.H.V et Borm P.J.A. Observations of working postures in garages using the Ovako Working Posture Analysing System (OWAS) and consequent workload reduction recommendations. *Ergonomics*, 1990, 33(2):209-220
- Komi, P.V., Buskirk, E.R. Effects of eccentric and concentric muscle conditioning on tension and electrical activity of human muscle. *Ergonomics*, 15: 417-434.
- Kuorinka I. et Forcier L., éd. Work related musculoskeletal disorders (WMSDs) – A reference book for prevention. Taylor & Francis, 1995, 421 p.
- Lamoreux, L. Hoffer, M. M. 1995. The effect of wrist deviation on grip and pinch strength. *Clinical orthopedics and related research*. 314, 152-155.

- Lee, C.C. Nelson, E. Davis, K.G. Marras, W.S. 1997. An ergonomic comparaison of industrial spray paint guns. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 19, 425-435.
- Lieber, R.L., Fridén, J. Mechanisms of muscle injury after eccentric contraction. *Journal of science and medicine in sport* 2 (3): 253-265, 1999.
- Lin, J.H., Radwin, R.G., Richard, T.G. Handle dynamics predictions for selected power and tool applications. *Human factors*. 45(4): 645-656, 2003.
- Lin, J.H., McGorry, R.W., Dempsey, P.G., Chang, C.C. Handle displacement and operator responses to pneumatic nutrunner torque buildup. *Applied ergonomics*. 37 : 367-376, 2006.
- Maline J. *Simuler le travail*. Les Éditions de l'ANACT, Montrouge, 1994, 156 pages.
- Marchand, D, Giguère, D. « Les risques de troubles musculo-squelettiques aux membres supérieurs dans le secteur des services à l'automobile – Étude exploratoire ». *Études et recherches / Rapport R-645*, Montréal, 2010, IRSST, 107 pages.
- Marchand, D., Giguère, D. et Rouleau, A. : « Importance des contraintes exercées à l'épaule lors du maintien de certaines postures observées chez les travailleurs des services à l'automobile ». *Congrès de la SELF* (43, 2008, Ajaccio, France). 17 - 19 septembre 2008.
- McGill, S.M. The biomechanics of low back injury: implications on current practice in industry and the clinic. *J. Biomechanics* 30(5): 465-475, 1997.
- Mell, AG. Friedman, MA. Hughes, RE. Carpenter, JE. 2006. Shoulder muscle activity increases with wrist splint use during a simulated upper-extremity work task. *American Journal of Occupational Therapy*, 60, 320-326.
- Mirka, G. A. Shivers, C. Smith, C. Taylor, J. 2002. Ergonomic interventions for the furniture manufacturing industry. Part II – Handtools. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 19, 275-287.
- Moen, B.E., Hollund, B.E., Torp, S. A descriptive study of health problems on car mechanics' hands. *Occup. Med.* 45(6): 318-322, 1995.
- Moore J.S. et Garg A.. The strain index : a proposed method to analyse jobs for risk of distal upper extremity disorders. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.* 56:443-458, 1995
- Musson, Y., Burdorf, A., Van Drimmelen, D. Exposure to shock and vibration and symptoms in workers using impact power tools. *Annals of occupational hygiene.*, 33(1):85-96, 1989.
- Nieminen, H. Hameenoja, S. 1995. Quantification of the static load component in muscle work using nonlinear filtering of surface EMG. *Ergonomics*, vol.38, no.6, 1172-1183.
- Nussbaum, M.A., Clark, L.L., Lanza, M.A., Rice, K.M. Fatigue and endurance limits during intermittent overhead work. *AIHAJ.* 62: 446-456, 2001.
- Pohren C. 1992. Enquête sur la fréquence du syndrome du canal carpien aux postes de piquage. *Rapport Préliminaire. Arch Mal Prof.* 55 : 519-20.

- Praagman, M., Chadwick, E.K.J., Van Der Helm, F.C.T., Veeger, H.E.J. 2010. The effect of elbow angle and external moment on load sharing of elbow muscles. *Journal of Electromyography and Kinesiology*, 20 (5), 912-922.
- Punnett, L. Fine, L.J. Keyserling, WM. Herrin, GD. Chaffin, DB. 2000. Shoulder disorders and postural stress in automobile assembly work. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 26 (4), 283-291.
- Radwin R.G., Vanbergeijk E.et Armstrong T.J.. Muscle response to pneumatic hand tool torque reaction forces. *Ergonomics* 32 (6):655-673, 1989.
- Rudroff, T. Barry, BK, Stone, AL. Barry, CL. Enoka, RM. 2007. Accessory muscle activity influences variation in time to task failure for different arm postures and loads. *Journal Appl Physiol*. 102 : 1000-1006.
- Semid, O. Identification et évaluation des facteurs de risques à l'origine des lésions musculo-squelettiques aux membres supérieurs dans le secteur des services automobiles. Mémoire présenté à l'Université du Québec à Trois-Rivières comme exigence partielle de la Maîtrise en sécurité et Hygiène industrielle, UQTR, 2002, 89 pages.
- Sigholm, G. Herberts, P. Almstrom, C. Kadefors, R. 1982. Electromyographic analysis of shoulder muscle load. *Journal Orthop Res*. 1 : 379-386.
- Sjogaard, G. Kiens, B. Jorgensen, K. Saltin, B. 1986. Intramuscular pressure, EMG and blood flow during low-level prolonged static contraction in man. *Acta Physiol. Scand.*, 128, 475-484.
- Sommerich, C.M., Mcglothlin, J.D, Marras, W.S., 1993. Occupational risk-factors associated with soft-tissue disorders of the shoulder – a review of recent investigations in the literature. *Ergonomics*, 36 (6), 697-717.
- Spielholz P, Bao S et Howard N.. A practical method for ergonomic and usability evaluation of hand tools: a comparison of three random orbital sander configurations. *Applied Occupational and Environmental Hygiene* 16 (11):1043-1048, 2001.
- Talag, T.S. Residual muscular soreness as influenced by concentric, eccentric and static contractions. *Research Quaterly*, 44 : 458-469, 1973.
- Terrell, R. Purswell, J. L. 1976. The influence of forearm and wrist orientation on static grip strength as a design criterion for hand tools. *Proceedings of the sixth congress of the International Ergonomics Association*. p 28-32.
- Torp, S. Riise, T. Moen, BE. 1996. Work-related musculoskeletal symptoms among car machanics : a descriptive study. *Occupational Medicine*. Vol.6, No.6, 407-413.
- Wieslander, G., Norbäck, D., Göthe, C-J., Juhlin, L. Carpal tunnel syndrome (CTS) and exposure to vibration, repetitive wrist movements and heavy manual work : A case referent study. *J. indust. Med* 46 : 43-47,1989.
- Winter, D.A. 2005. *Biomechanics and Motor Control of Human Movement*. 3. ed. John Wiley & Sons.