

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
DÉPARTEMENT DE KINANTHROPOLOGIE

QUANTIFICATION DES CONSÉQUENCES BIOMÉCANIQUES, SUR LES
MEMBRES SUPÉRIEURS, DE L'UTILISATION D'UN PISTOLET À PEINTURE
PAR LES PEINTRES DE CARROSSERIE DU SECTEUR DES SERVICES À
L'AUTOMOBILE

MÉMOIRE

PRÉSENTÉ

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DE LA MAÎTRISE EN KINANTHROPOLOGIE

PAR

JUDITH P-MARTIN

SEPTEMBRE 2011

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de ce mémoire se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

REMERCIEMENTS

La réalisation de ce projet de maîtrise n'aurait pu être possible sans la participation de plusieurs personnes. À leur façon, ces collègues et amis m'ont apporté leurs connaissances et leurs soutiens.

Je tiens à remercier tout spécialement Carole Roy (UQAM) pour sa généreuse implication au cours de l'expérimentation de ce projet. Elle a été d'une aide très précieuse de par sa gentillesse et son enthousiasme contagieux.

J'aimerais également remercier monsieur Benoît Sansregret (UQAM) pour son expertise dans le domaine de l'enregistrement vidéo. Son travail acharné sur la réalisation d'images et sa disponibilité spontanée ont été grandement appréciés.

De plus, je veux remercier monsieur Robin Drolet (UQAM), technicien en électrotechnique, pour son aide et ses conseils lors de la réalisation de montages. De plus, merci à monsieur Bertrand Fournier, statisticien (UQAM, SCAD), pour avoir investi de son temps dans la réalisation des nombreuses analyses statistiques.

Deux collègues, Christian Kelly et Vincent Gauthier-Mandeville, m'ont apporté leur aide au cours de ce projet. Je tiens à les remercier pour leurs conseils et leur soutien.

Ensuite, je tiens à remercier monsieur Marc Bélanger (UQAM) et monsieur André Plamondon (UQTR) qui ont accepté le rôle de membre interne et de membre externe, respectivement, pour l'évaluation de ce mémoire. Leur expertise et leur sens de l'analyse scientifique m'ont permis de perfectionner mes écrits et mon sens critique.

Je veux aussi souligner la collaboration spéciale de monsieur Denis Giguère (IRSST) à ce projet. Ses connaissances et son aide furent un atout important.

Finalement, je veux remercier mon directeur de maîtrise, monsieur Denis Marchand (UQAM), pour la confiance qu'il m'a témoignée durant ce projet. Son professionnalisme et sa rigueur sont des valeurs acquises que je continuerai d'appliquer sur le marché du travail. Il a été une personne ressource très importante dans mon cheminement académique et professionnel.

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES FIGURES	vi
LISTE DES TABLEAUX	x
RÉSUMÉ	xiii
INTRODUCTION	1
CHAPITRE I	
REVUE DE LITTÉRATURE	3
1.1 LES CONTRAINTES AUX MEMBRES SUPÉRIEURS	3
1.1.1 Les contraintes à l'épaule	3
1.1.2 Les contraintes au coude	12
1.1.3 Les contraintes du poignet	16
1.2 LA CHARGE STATIQUE	20
1.3 ÉLECTROMYOGRAPHIE (EMG)	27
1.4 LES OUTILS	28
1.5 LES MOMENTS DE FORCE DE L'OUTIL	31
1.6 LES OBJECTIFS	34
CHAPITRE II	
MÉTHODOLOGIE	35
2.1 SUJETS	35
2.2 CONDITIONS EXPÉRIMENTALES	36
2.3 MONTAGES EXPÉRIMENTAUX	42
2.3.1 Mesures du montage	43
2.4 PISTOLETS À PEINTURE ET COMPRESSEUR À AIR	45
2.5 MESURES	47
2.5.1 Analyses cinématiques	47
2.5.2 Analyses musculaires	48
2.6 PERCEPTION DE L'EFFORT	53
2.7 ANALYSE STATISTIQUE	54

2.8 LES LIMITES	54
CHAPITRE III	
PRÉSENTATION ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS	56
3.1 LA TAILLE DES SUJETS	57
3.2 LA SECTION BASSE DE LA PORTIÈRE (PLAN VERTICALE)	58
3.2.1 Le pourcentage de contraction volontaire maximale	58
3.2.2 Les angles absolus et relatifs	61
3.2.3 Les cotes psychophysiques	61
3.3 LA SECTION HAUTE DE LA PORTIÈRE (PLAN VERTICALE)	62
3.3.1 Le pourcentage de contraction volontaire maximale	62
3.3.2 Les angles absolus et relatifs	68
3.3.3 Les cotes psychophysiques	70
3.4 LA SECTION DU CAPOT (PLAN HORIZONTALE)	71
3.4.1 Le pourcentage de contraction volontaire maximale	71
3.4.2 Les angles absolus et relatifs	76
3.4.3 Les cotes psychophysiques	80
3.5 LA SECTION DU TOIT (PLAN HORIZONTALE)	81
3.5.1 Le pourcentage de contraction volontaire maximale	81
3.5.2 Les angles absolus et relatifs	86
3.5.3 Les moments de force	89
3.5.4 Les cotes psychophysiques	93
CHAPITRE IV	
DISCUSSION	94
4.1 SECTION BASSE DE LA PORTIÈRE	94
4.2 SECTION HAUTE DE LA PORTIÈRE	96
4.3 SECTION DU CAPOT	98
4.4 SECTION DU TOIT	100
CONCLUSION	104

ANNEXE A	106
ANNEXE B	110
BIBLIOGRAPHIE	111

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I

Figure 1.1 La structure détaillée du muscle et du tendon, tirée de W. McArdle et al., 2001.....	4
Figure 1.2 La posture de travail d'un peintre lors de l'application de peinture sur une surface verticale (portière) et sur une surface horizontale (toit), à l'aide d'un pistolet standard	5
Figure 1.3 La posture de travail d'un peintre, avec le bras au-dessus de l'horizontale, lors de l'application de peinture sur une surface horizontale du toit (A) et du capot (B), à l'aide d'un pistolet standard.....	7
Figure 1.4 La posture de travail d'un peintre, avec le bras au-dessus de l'horizontale, lors de l'application de peinture sur une surface horizontale du toit à l'aide d'un pistolet standard. (A) Section éloignée (centre du toit), (B) Section rapprochée (bord du toit)....	7
Figure 1.5 Les cinq positions prises lors de l'étude de Marchand et al., 2008.....	8
Figure 1.6 Moments de force (Nm) obtenus selon les différents angles relatifs à l'épaule lors d'une mobilisation passive du bras, tiré de Marchand et al., 2008.....	9
Figure 1.7 La tension que peut générer un muscle à différent niveau d'étirement, tiré d'Anatomie du geste sportif de Wirhed, 1985.....	10
Figure 1.8 La courbe de la relation Tension-Longueur agoniste / antagoniste modifiée, à partir de la figure d'Anatomie du geste sportif de Wirhed, 1985.....	11
Figure 1.9 Pourcentages d'utilisation musculaire moyens des deltoïdes obtenus selon les différents angles relatifs à l'épaule et où le bras était toujours maintenu à l'horizontale, tiré de Marchand et al., 2008.....	12
Figure 1.10 Épicondylite : Inflammation des tendons qui s'attachent sur la face externe du membre supérieur (épicondyle latérale), tiré de Raffle, Adams et Baxter, 1994.....	13
Figure 1.11 La posture de travail d'un peintre lors de l'application de peinture sur une surface verticale (portière) et sur une surface horizontale (toit), à l'aide d'un pistolet standard.....	14
Figure 1.12 L'influence de la position articulaire sur le travail d'un muscle, tirée de Chaffin, 2006.....	15
Figure 1.13 La posture de travail d'un peintre, au poignet, lors de l'application de peinture sur une surface verticale (portière) et sur une surface horizontale (toit), à l'aide d'un pistolet standard.	17
Figure 1.14 Les valeurs d'EMG dynamique et statique du muscle extenseur ulnaire du carpe obtenues pour différents angles lors d'une déviation ulnaire du poignet, Goldstein, 1994.....	18
Figure 1.15 La déviation ulnaire du poignet lors d'un travail sur une surface horizontale, à l'aide d'un pistolet standard.....	19

Figure 1.16 Le modèle du développement d'une blessure à partir d'une charge statique, version adaptée tirée de Chaffin, 2006.....	21
Figure 1.17 Processus d'apparition de blessures lors d'un effort soutenu, tirée de McGill, 1997.....	22
Figure 1.18 Processus d'apparition de blessures lors d'un repos insuffisant, d'après McGill, 1997.....	22
Figure 1.19 La prédiction de l'endurance par Von Rohmert, 1968.....	23
Figure 1.20 Abduction, circulation et pression dans le muscle sus-épineux, Jarvholm, 1988.....	25
Figure 1.21 Moyennes PIM (mmHg) et EMG normalisés pour le sus-épineux selon cinq angles différents à l'épaule en abduction, Jarvholm et al., 1989.....	26
Figure 1.22 Les différents pistolets à peinture offerts sur le marché.....	28
Figure 1.23 Le centre de gravité (CG) de l'outil (a) ainsi que la préhension de l'outil sur un plan vertical (b).....	29
Figure 1.24 Les mesures pour le calcul du moment de force sur un pistolet standard, A) pour une condition sur un plan vertical et B) pour une condition sur un plan horizontal.....	32
Figure 1.25 Les divers moments de force du pistolet selon différentes orientations lorsque le réservoir est plein.....	32
Figure 1.26 La représentation de la position du poignet et du pistolet pour l'application de peinture A) sur un plan vertical et B) sur un plan horizontal.....	33
CHAPITRE II	
Figure 2.1 Les conditions de la section horizontale du toit, avec et sans banc, sur un plan droit et incliné.....	39
Figure 2.2 Les conditions de la section horizontale du capot, sur et sous la surface, avec un plan droit et incliné.....	40
Figure 2.3 Les conditions de la section verticale haute du côté standard et modifié, à l'aide d'une position accroupie et debout.....	41
Figure 2.4 Les conditions de la section verticale basse du côté standard et modifié, à l'aide d'une position accroupie.....	42
Figure 2.5 A) Le montage expérimental. B) Le panneau d'inclinaison.....	42
Figure 2.6 Un cric pneumatique à 3 boudins avec une hauteur de levée de : A) 160mm-440mm, B) 190mm-480mm.....	44
Figure 2.7 Le banc utilisé lors des conditions modifiées du toit (42 cm).....	44
Figure 2.8 L'angle de 30° du réservoir (à la verticale) sur le pistolet standard.....	45

Figure 2.9 Le travail sur un plan horizontal (toit) avec A) le pistolet standard et B) le pistolet modifié.....	46
Figure 2.10 La représentation du bouton de réglage à air (à gauche) et du bouton de réglage de la quantité de liquide (à droite), tiré du livret du détaillant.....	47
Figure 2.11 La localisation des différents muscles sélectionnés pour l'étude, tiré de Hansen, 2004.....	49
Figure 2.12 La localisation des différents muscles de l'avant-bras droit, tiré de Hansen, 2004.....	50
Figure 2.13 A) La représentation d'une électrode de surface DELSYS et B) la pose de l'électrode sur le deltoïde antérieur.....	50
Figure 2.14 La représentation schématique des signaux a) brut, b) rectifié et c) filtré.....	51
Figure 2.15 La représentation schématique des données sélectionnées pour le calcul du pourcentage de contraction volontaire maximale (%CVM).....	52
CHAPITRE III	
Figure 3.1 Le pourcentage de contraction volontaire maximale (%CVM) du deltoïde antérieur en fonction de la taille des sujets, pour deux hauteurs différentes.....	58
Figure 3.2 L'effet d'interaction des variables de postures et de hauteurs (section du capot) sur le pourcentage de la contraction volontaire maximale (% CVM) du deltoïde médian.....	65
Figure 3.3 Les valeurs moyennes des côtes psychophysiques de la section du capot selon la surface (sur-sous) et l'inclinaison (droit-incliné), pour la région de l'épaule.....	81
Figure 3.4 Évaluation de l'angle absolu au membre supérieur droit, à l'aide du logiciel MaxTraq.....	90
Figure 3.5 Les angles absolus à l'épaule pour les conditions de a) toit - (H) standard - (I) droit - (Pistolet) standard et de c) toit - (H) modifiée - (I) incliné - (Pistolet) modifié en comparaison avec les postures identiques b) et d) obtenu par le logiciel 3DSSPP (4.2) pour le calcul du moment de force à l'épaule droite.....	91
ANNEXE A	
Figure A.1 L'effet d'interaction des variables de hauteurs et de postures sur le pourcentage de la contraction volontaire maximale (% CVM) du deltoïde postérieur.....	107
Figure A.2 L'effet d'interaction des variables de hauteurs et de postures sur le pourcentage de la contraction volontaire maximale (% CVM) du grand pectoral.....	107
Figure A.3 L'effet d'interaction des variables de hauteurs et de postures sur le pourcentage de la contraction volontaire maximale (% CVM) du grand dorsal.....	107
Figure A.4 L'effet d'interaction des variables de hauteurs et de postures sur le pourcentage de la contraction volontaire maximale (% CVM) du triceps.....	108

- Figure A.5 L'effet d'interaction des variables de surfaces et d'inclinaisons sur le pourcentage de la contraction volontaire maximale (% CVM) du deltoïde médian.....108
- Figure A.6 L'effet d'interaction des variables de surfaces et d'inclinaisons sur le pourcentage de la contraction volontaire maximale (% CVM) du deltoïde postérieur....108
- Figure A.7 L'effet d'interaction des variables de surfaces et d'inclinaisons sur le pourcentage de la contraction volontaire maximale (% CVM) du grand pectoral.....109
- Figure A.8 L'effet d'interaction des variables de surfaces et d'inclinaisons sur le pourcentage de la contraction volontaire maximale (% CVM) du triceps.....109
- Figure A.9 L'effet d'interaction des variables d'inclinaisons et de pistolets sur le pourcentage de la contraction volontaire maximale (% CVM) du deltoïde antérieur.....109

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE I

Tableau 1.1 Les valeurs de prédiction du temps d'endurance (min) en fonction de la force relative (%), version adaptée de Chaffin, 2006.....	24
--	----

CHAPITRE II

Tableau 2.1 Les caractéristiques des dix sujets.....	35
Tableau 2.2 Les mesures des sections horizontales du toit.....	43
Tableau 2.3 Les mesures des sections horizontales du capot.....	43
Tableau 2.4 Les mesures des sections verticales basses et hautes du côté.....	43
Tableau 2.5 Les postures adoptées lors de la contraction isométrique volontaire maximale pour les douzes muscles.....	53
Tableau 2.6 Panonceau de l'échelle de Borg modifiée pour la quantification de l'effort physique.....	54

CHAPITRE III

Tableau 3.1 Les valeurs moyennes du pourcentage de la contraction volontaire maximale (%CVM) des conditions de la section basse de la portière selon la hauteur standard et modifiée, pour chacun des muscles, ainsi que l'effet significatif principal.....	59
Tableau 3.2 Les valeurs moyennes des angles à l'épaule et au coude et les effets significatifs pour les conditions de la section basse de la portière.....	61
Tableau 3.3 Les valeurs moyennes du pourcentage de la contraction volontaire maximale (%CVM) des conditions de la section haute de la portière selon la hauteur (standard-modifiée) et la posture (accroupie-debout), pour chacun des muscles, ainsi que l'effet significatif principal.....	63
Tableau 3.4 Les effets d'interactions significatifs entre les valeurs moyennes du pourcentage de la contraction volontaire maximale (%CVM) des conditions de la section haute de la portière selon la hauteur et la posture, pour chacun des muscles significatifs.....	66
Tableau 3.5 Les effets d'interactions significatifs spécifiques entre les valeurs moyennes du pourcentage de la contraction volontaire maximale (%CVM) des conditions de la section haute de la portière selon la hauteur et la posture, pour chacun des muscles significatifs.....	67
Tableau 3.6 Les valeurs moyennes des angles à l'épaule et au coude et les effets significatifs pour les conditions de la section haute de la portière.....	68

Tableau 3.7 Les effets d'interactions significatifs spécifiques entre les valeurs moyennes des angles à l'épaule et au coude des conditions de la section haute de la portière selon les hauteurs et les postures, pour chacun des angles significatifs.....	69
Tableau 3.8 Les valeurs moyennes des côtes psychophysiques de la section haute de la portière selon la hauteur (standard-modifiée) et la posture (accroupie-debout), pour chacune des régions anatomiques, ainsi que l'effet significatif principal.....	70
Tableau 3.9 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, ainsi que l'effet significatif principal.....	72
Tableau 3.10 Les effets d'interactions significatifs 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.....	74
Tableau 3.11 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.....	74
Tableau 3.12 Les valeurs moyennes des angles à l'épaule et au coude, sur la zone éloignée de la section du capot et les effets significatifs.....	76
Tableau 3.13 Les valeurs moyennes des angles à l'épaule et au coude, sur la zone rapprochée de la section du capot et les effets significatifs.....	77
Tableau 3.14 Les valeurs moyennes des écarts des angles à l'épaule et au coude de la section du capot et les effets significatifs.....	77
Tableau 3.15 Les effets d'interactions significatifs spécifiques entre les valeurs moyennes des angles à l'épaule et au coude, sur la zone éloignée de la section haute du capot selon les surfaces et les inclinaisons, pour chacun des angles significatifs.....	78
Tableau 3.16 Les effets d'interactions significatifs spécifiques entre les valeurs moyennes des angles à l'épaule et au coude, sur la zone rapprochée de la section haute du capot selon les surfaces et les inclinaisons, pour chacun des angles significatifs.....	79
Tableau 3.17 Les effets d'interactions significatifs spécifiques entre les valeurs moyennes des écarts des angles à l'épaule et au coude, de la section haute du capot selon les surfaces et les inclinaisons, pour chacun des angles significatifs.....	79
Tableau 3.18 Les valeurs moyennes des côtes 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.....	80
Tableau 3.19 Les valeurs moyennes du pourcentage de la contraction volontaire maximale (%CVM) des conditions de la section du toit selon la hauteur (standard-modifiée) et l'inclinaison (droit-incliné) et le pistolet (standard-modifié), pour chacun des muscles, ainsi que l'effet significatif principal.....	83

Tableau 3.20 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 selon l'inclinaison et le pistolet, pour chacun des muscles significatifs.....	86
Tableau 3.21 Les valeurs moyennes des angles à l'épaule et au coude, sur la zone éloignée de la section du toit, et leurs effets significatifs.....	87
Tableau 3.22 Les valeurs moyennes des angles à l'épaule et au coude, sur la zone rapprochée de la section du toit, et leurs effets significatifs.....	87
Tableau 3.23 Les valeurs moyennes des écarts des angles à l'épaule et au coude, sur la zone éloignée de la section du toit, et leurs effets significatifs.....	88
Tableau 3.24 Les effets d'interactions significatifs spécifiques entre les valeurs moyennes des angles à l'épaule et au coude, sur la zone éloignée de la section du toit selon les hauteurs, les inclinaisons et les pistolets, pour chacun des angles significatifs.....	89
Tableau 3.25 Les valeurs moyennes des côtes psychophysiques de la section du toit selon la hauteur (standard-modifiée) et l'inclinaison (droit-incliné) et le pistolet (standard-modifié), pour chacune des régions anatomiques, ainsi que l'effet significatif principal.....	93

RÉSUMÉ

Le milieu des Services à l'automobile est un secteur d'activité comportant plusieurs travailleurs manuels. Depuis les dernières années, plusieurs études ont démontré que ce milieu est touché d'une manière importante par les troubles musculosquelettiques aux membres supérieurs (TMS-MS). Les écrits associés aux peintres de carrosserie automobiles établissent un lien entre la charge statique, les postures de travail, les pistolets utilisés et le développement de TMS-MS.

Cette étude avait pour objectif d'évaluer des stratégies utilisées lors de l'application de peinture à l'aide de deux types de pistolets par des peintres d'expérience ayant préalablement été observés par Giguère et al. (2007) lors d'une étude exploratoire portant sur les TMS-MS dans le secteur des Services à l'automobile. Ces stratégies avaient été identifiées en raison de leur potentiel à diminuer les contraintes physiques aux membres supérieurs associées à l'application de peinture pour différents plans, de hauteurs diverses.

Dix sujets ont réalisé des manœuvres sur quatre sections différentes (portière basse, portière haute, capot et toit). Ces sujets devaient faire dix-huit conditions expérimentales qui furent créées à partir de la combinaison des variables indépendantes. Ces variables comportaient : la hauteur du plan de travail (standard et modifiée), la posture de travail (accroupie et debout), l'inclinaison de la surface (droit et incliné), le type de pistolets (standard et modifié). Les quatre variables n'ont pas été utilisées pour chacune des sections analysées. Tous les résultats ont été utilisés pour les analyses statistiques multifactorielles.

L'activité musculaire a été mesurée avec l'électromyographie (EMG) de surface pour douze muscles du membre supérieur droit. L'évaluation des moments de force externes exercés par le pistolet a été faite. De plus, la vidéo a permis d'évaluer le positionnement angulaire des membres supérieurs pour les articulations de l'épaule et du coude. La perception psychophysique de l'effort associée aux différentes conditions expérimentales a aussi été recueillie pour chacun des sujets.

Selon les résultats de l'EMG, l'optimisation de la hauteur de travail a permis de réduire les pourcentages de la contraction volontaire maximale pour le trapèze supérieur et le deltoïde antérieur aux conditions sur la section du toit. Cette baisse suggère que l'élévation du travailleur amène un effet positif sur sa posture, comme le témoigne la demande musculaire. Le muscle fléchisseur de l'épaule, qui est moins raccourci en raison de la baisse de l'angle relatif à l'articulation, déploie alors moins de force pour réaliser le même mouvement. De plus, l'inclinaison de la surface permet aussi de modifier la posture du travailleur. L'angle de 45 degrés à la section du capot permet le rapprochement des segments du travailleur et ainsi réduit le moment de force à l'épaule lors de l'application de peinture. Cette situation abaisse les %CVM des trapèzes supérieurs et deltoïdes antérieurs et les angles relatifs et absolus à l'articulation de l'épaule.

Enfin, les résultats ont aussi démontré que l'utilisation du pistolet modifié présentait un effet significatif, mais que l'outil ne permettait pas de réduire de manière importante l'activation des muscles extenseurs et fléchisseurs du poignet. Bien que le centre de gravité de l'outil modifié à été mieux balancé, la déviation au poignet était quand même présente.

Il serait intéressant de poursuivre cette étude en tentant de concevoir un type de poignée qui permettrait de réduire les contraintes physiques au poignet associées à la préhension du pistolet sur une surface horizontale.

Mots clés : mécanique automobile, trouble musculo-squelettique au membre supérieur, ergonomie, électromyographie, biomécanique, pistolet à peinture, carrosserie

INTRODUCTION

Depuis plusieurs années déjà, 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 (TMS) aux membres supérieurs sont à l'origine d'une hausse des jours d'arrêts 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 TMS est de 122 jours \pm 25, alors qu'il n'est que de 70 \pm 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 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 TMS-MS peuvent être causées par la combinaison de mauvaises postures et le poids des outils. Ces deux facteurs, propices à l'apparition des lésions, impose des contraintes musculaires aux travailleurs.

Dans le cadre d'une étude universitaire de deuxième cycle, Semid (2002) s'est intéressé aux données de compensation de la CSST couvrant la période de 1995 à 1997 pour le secteur des Services à l'automobile. Pour ces trois années, les TMS-MS (les épaules surtout, mais aussi les poignets, les coudes et le cou) comptent pour 7,6% du total des lésions compensées. Les fréquences observées pour l'ensemble des lésions musculo-squelettiques reliées au travail de ce secteur (excluent, par exemple, les entorses dues aux chutes), mettent en évidence une fréquence élevée de TMS chez les manutentionnaires, le personnel administratif, mais surtout chez les mécaniciens de concessionnaires automobiles, en particulier pour les entorses au cou, les tendinites à l'épaule et les bursites. Bien que le travail des mécaniciens de concessionnaires automobiles présente plusieurs facteurs de risques qui causent l'apparition de TMS, le projet présent s'intéresse en particulier aux peintres travaillant dans les ateliers de peinture. Dans son étude, Semid présente l'observation de ce type de

travail sur quatre postes chez un concessionnaire, dont l'un d'eux porte sur la préparation et la peinture d'un élément de carrosserie. Les conclusions démontrent que les membres supérieurs sont grandement sollicités lors de cette tâche pour l'articulation de l'épaule, du coude, du poignet et du cou. De plus, ces observations confirment que les carrossiers (peintres) sont plus sujets à subir une épicondylite que le reste des travailleurs (mécaniciens) selon les différences observées entre leurs tâches. Chez les peintres, la supination et la pronation de l'avant-bras avec efforts correspondent à 37% de la durée de la tâche (Semid, 2002). De plus, ces travailleurs doivent tenir le poignet en extension avec effort sur de longues périodes, mobilisant ainsi des muscles bien identifiés.

Le choix des postures de travail, chez les peintres, se fait selon l'orientation du plan de travail (surface horizontale et verticale) et de la hauteur du plan de travail (toit – portière). Une étude exploratoire (Rouleau et al, 2008) plus approfondie sur les peintres de carrosserie automobile fait la lumière sur les problématiques originelles associées aux troubles musculosquelettiques. L'observation, réalisée dans quatre concessionnaires automobiles, permet de constater que les postures étudiées pour la peinture d'une surface horizontale surélevée induisent un plus grand effort. Par exemple, l'application de peinture sur le toit oblige le peintre à étirer le membre supérieur au-dessus de l'horizontale, soit avec un angle relatif à l'épaule de plus de 90 degrés. À ce sujet, une étude épidémiologique regroupant plusieurs recherches de différents chercheurs arrive à la conclusion que 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. Le travail statique, réalisée avec de mauvaises postures, est particulièrement considéré comme nuisible car le manque de vascularisation des tissus musculaires ne fait qu'accentuer l'inflammation du tendon lors d'un effort (Nieminen et Hameenoja, 1995).

CHAPITRE I

REVUE DE LITTÉRATURE

Les peintres de carrosserie automobiles sont à risque de développer des troubles musculosquelettiques, particulièrement au membre supérieur, lors de l'exécution de leur fonction. La posture du travailleur ainsi que la durée du travail peuvent influencer l'implication des muscles. Une mauvaise posture jumelée à une exposition prolongée avec effort peuvent également amener, à long terme, à la dégénérescence des tissus et ainsi à l'apparition d'une lésion. Le but de ce projet est de valider des pistes de solutions susceptibles de réduire les coûts dues aux TMS-MS. Les pistes de solutions ont été observées et proposées dans l'étude exploratoire réalisée par Marchand et Giguère (2010).

Les prochains chapitres traiteront des troubles musculosquelettiques ainsi que la cause de leurs origines. De plus, il sera question des postures de travail, de la force déployée en fonction de la longueur du muscle (tension-longueur), de la durée prolongée d'un effort, des outils et des moments de force induits par le membre supérieur ainsi que celui de l'outil.

1.1 LES CONTRAINTES AUX MEMBRES SUPÉRIEURS

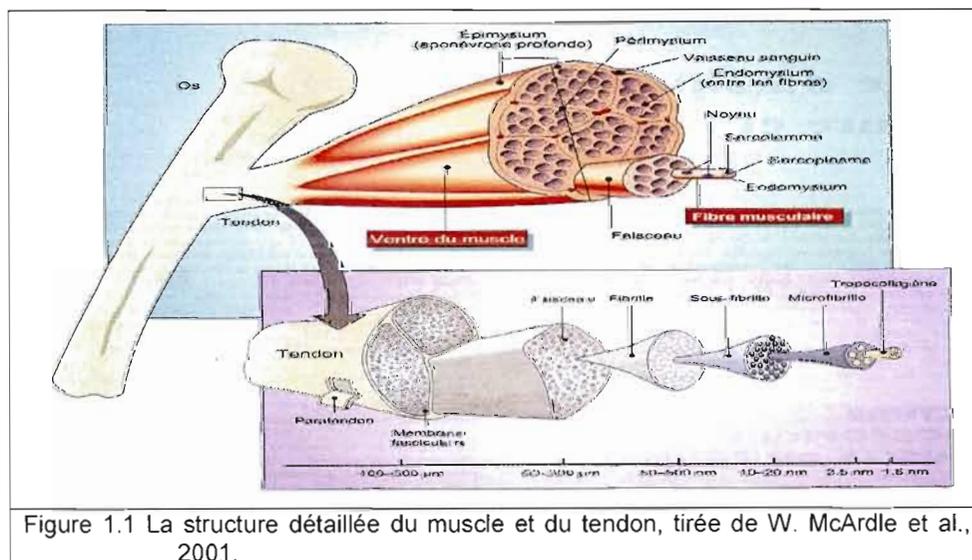
1.1.1 LES CONTRAINTES À L'ÉPAULE

1.1.1.1 Les troubles musculosquelettiques

Les troubles musculosquelettiques (TMS) surviennent lorsque les segments sont soumis à des facteurs de risques. Un travail répétitif, qui peut demander 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 sa sollicitation et son positionnement ainsi que par ceux 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 à l'épaule (articulation) augmente. Il a été démontré qu'une posture avec l'élévation des membres supérieurs est un facteur de risque des blessures à l'épaule (Punnett, Fine, Keyserling, Herrin et Chaffin, 2000). Une charge supplémentaire est appliquée à l'épaule due à l'éloignement de l'avant-bras, ce qui peut contribuer à l'apparition d'une contrainte musculaire. En accord avec Kuorinka et al. (1987), il y a une relation entre les tendinites à l'épaule et le travail avec flexion et abduction des bras. Un effort statique maintenu dans une telle position peut également favoriser le développement d'une lésion tendineuse (Jarvholm et al., 1989).

Le tendon se caractérise comme étant un amas de fibres de collagène qui relie le muscle à une partie du squelette (figure 1.1). Grâce à sa structure particulière, il possède une grande résistance. Le tendon permet donc de transmettre les forces musculaires à la structure osseuse afin d'initier le mouvement désiré. En d'autres termes, le tendon et le muscle forment une composante dynamique qui permet le mouvement (McArdle, 2001). La principale contrainte mécanique qui s'exerce sur le tendon est la force de traction développée par le muscle lors d'un effort musculaire.



Or, lorsque la position articulaire ainsi que la tension statique interviennent 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 considérablement 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. En effet, un travail musculaire intense ou prolongé peut engendrer une inflammation locale significative en réponse à une blessure tissulaire (Saxton, 2000). Une fois cette situation atteinte, l'inflammation du tendon se désigne par le terme tendinite. Ce trouble musculo-squelettique peut survenir sur les trois articulations du membre supérieur (MS) : à l'épaule, au coude et au poignet.

1.1.1.2 La posture de travail

Les mauvaises postures constituent un facteur de risque qui contribue au développement des TMS-MS. La posture de travail dépend en grande partie de l'orientation du plan de travail ainsi que de sa hauteur. Lors de l'application de peinture sur une surface verticale, la posture adoptée permet une proximité avec la zone de travail (figure 1.2 A). De cette façon, l'amplitude à l'épaule est diminuée, ce qui réduit la charge appliquée à cette articulation.

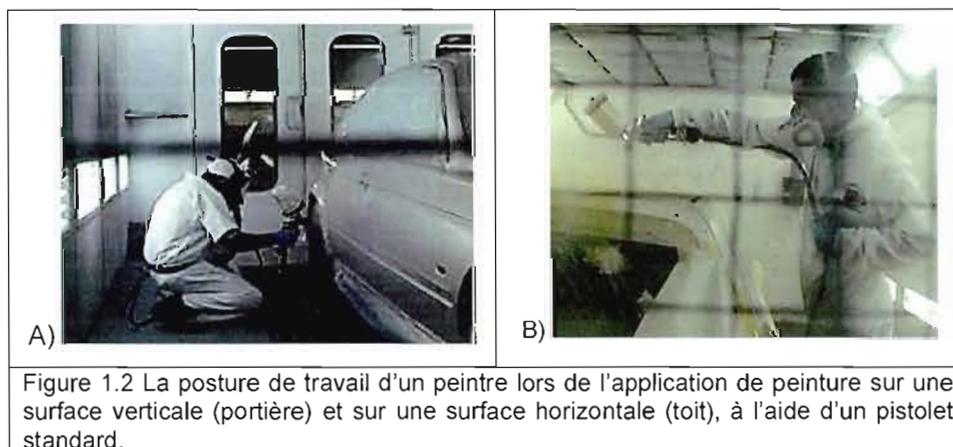
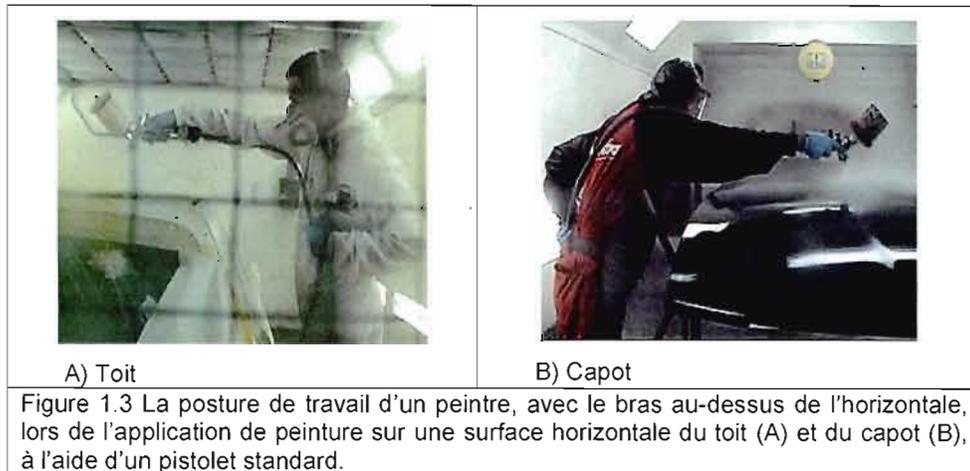


Figure 1.2 La posture de travail d'un peintre lors de l'application de peinture sur une surface verticale (portière) et sur une surface horizontale (toit), à l'aide d'un pistolet standard.

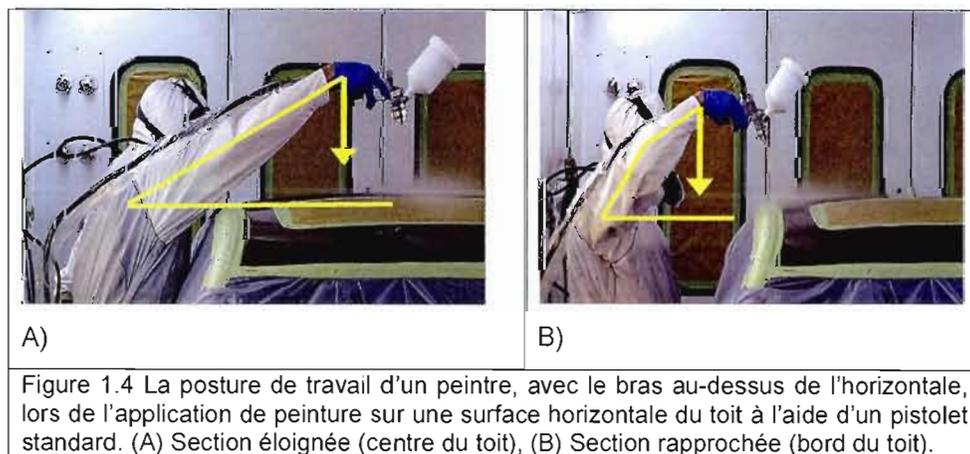
Toutefois, lors d'un travail réalisé sur une surface horizontale, la posture adoptée augmente l'amplitude articulaire de l'épaule (figure 1.2 B). Une surface de travail trop haute est reconnue pour affecter la posture de l'épaule ainsi que l'activité musculaire (EMG) à l'épaule (Mell et al. 2006). Pour ce type de surface, l'application de la peinture est réalisée la majeure partie du temps sur des pièces de carrosserie assemblées. Une pièce comme le toit peut représenter une réelle problématique d'accessibilité compte tenu de sa hauteur (figure 1.2 B). De plus, les compagnies automobiles ne cessent de grossir les modèles de voitures. Un travailleur de taille moyenne doit compenser pour cette hauteur en augmentant l'amplitude articulaire à l'épaule de manière à effectuer le travail convenablement. Comme l'indique la figure 1.2 B, le bras du travailleur se retrouve au-dessus de l'horizontale. De plus, le plan horizontal rend difficile l'accès à la partie centrale de la pièce. Lorsqu'il s'agit d'une grande superficie comme le toit, l'articulation du coude doit être placée en extension complète afin de couvrir toute la surface. Dans une telle position, le levier obtenu (longueur du bras) provoque un moment de force maximal à l'épaule lorsqu'il n'y a aucune charge dans la main. Or, lorsque le pistolet est maintenu à bout de bras (au-dessus de l'horizontale), celui-ci contribue à l'augmentation du moment de force à l'épaule (Rouleau et al., 2008).

Pour un capot de voiture (figure 1.3 B), qui constitue la seule pièce peinte sur un trépied, le membre supérieur est également au-dessus de l'horizontale. Selon la Norme ISO 11226, un travail est non recommandé lorsque l'angle relatif à l'épaule dépasse 90 degrés et que l'effort est prolongé. Le positionnement de l'articulation, à grande amplitude, nuit au travailleur. Dans ce sens, un individu est plus susceptible de se blesser lorsque les limites de l'articulation sont dépassées (Saxton, 2000). De plus, les muscles ne sont pas performants lorsque la limite articulaire est presque atteinte (voir la section 1.1.1.4 La relation Tension-Longueur). La tension développée par un muscle dépend de sa longueur, donc, de la position articulaire adoptée.



1.1.1.3 Le moment de force

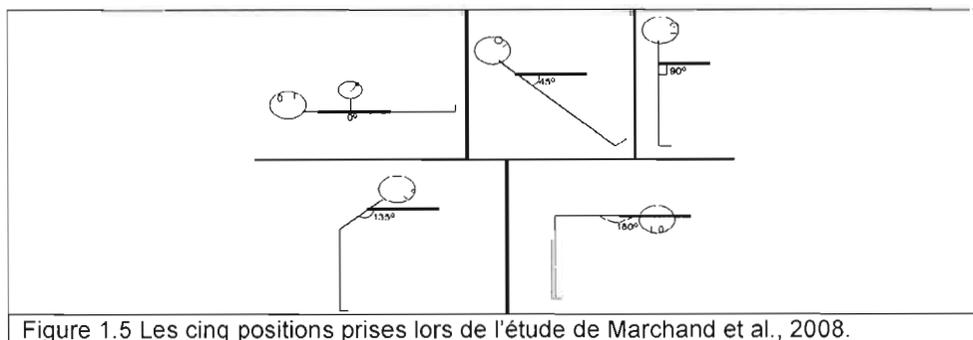
Un moment de force (M) peut être représenté par une contrainte observée à l'articulation. Il se définit comme étant une force de rotation exercée sur un segment qui tourne autour d'un axe (articulation). Le moment de force à l'épaule est la distance perpendiculaire à partir de la ligne d'action du muscle (figure 1.4) jusqu'au centre de cette articulation (Otis et al., 1994). Celui-ci permet de quantifier l'effort associé au travail d'une articulation, dans une posture spécifique.



Le moment de force est plus grand lorsque le coude est en extension, pour un même angle à l'épaule. Puisque le levier est plus grand, dû à l'extension complète du coude (figure 1.4 A), la charge maintenue dans la main aura pour effet d'accentuer le moment de force à l'épaule. La contrainte à l'épaule devient alors plus importante pour l'application de peinture sur la section centrale du toit. Quant à eux, les rebords du toit permettent la proximité du travailleur et ainsi la possibilité de fléchir le coude (figure 1.4 B). Un levier plus court multiplié avec une même charge aura comme résultat un moment de force plus petit. Toutefois, la position du membre supérieur au-dessus de l'horizontale est conservée.

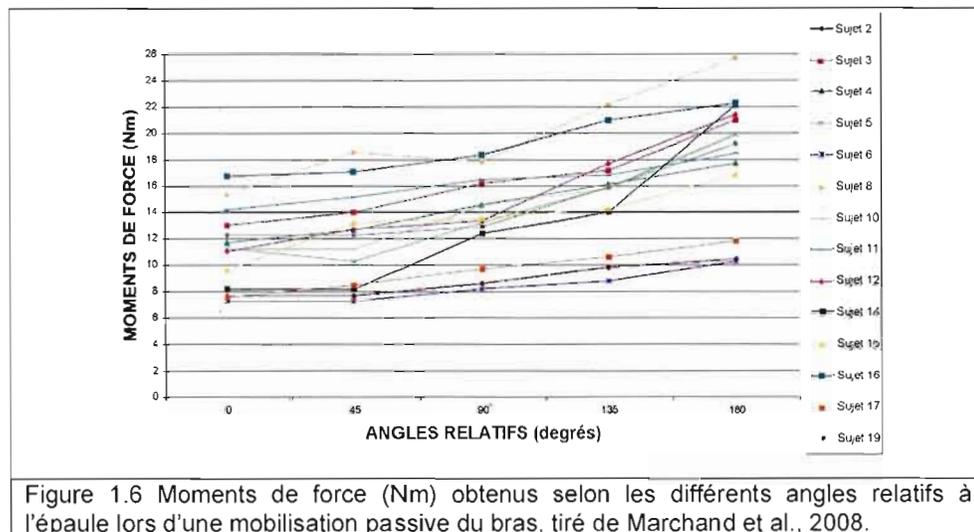
Pour les peintres de carrosserie, ce sont les muscles fléchisseurs et abducteurs de l'épaule qui sont davantage sollicités lors d'un travail de peinture. Afin de mieux comprendre l'implication des muscles de l'épaule, lors de différentes postures statiques, Marchand et al. (2008) ont procédé à une étude comparative des moments de force.

La figure 1.5 présente les cinq positions évaluées lors de l'étude. Selon un logiciel standard de calcul des moments de force (3DSSPP, Université du Michigan), les résultats sont identiques pour toutes les différentes positions. Sur les schémas (figure 1.5), le levier (bras) conserve sa position à l'horizontale sur toutes les positions et le poids du segment ne change pas puisque le sujet est le même. Logiquement, si l'on en croit la définition d'un moment de force, les résultats devraient être exacts.



Cependant, lorsque les forces de rotation exercées ont été prises en laboratoire à l'aide d'un dynamomètre, les résultats se sont avérés différents. Il

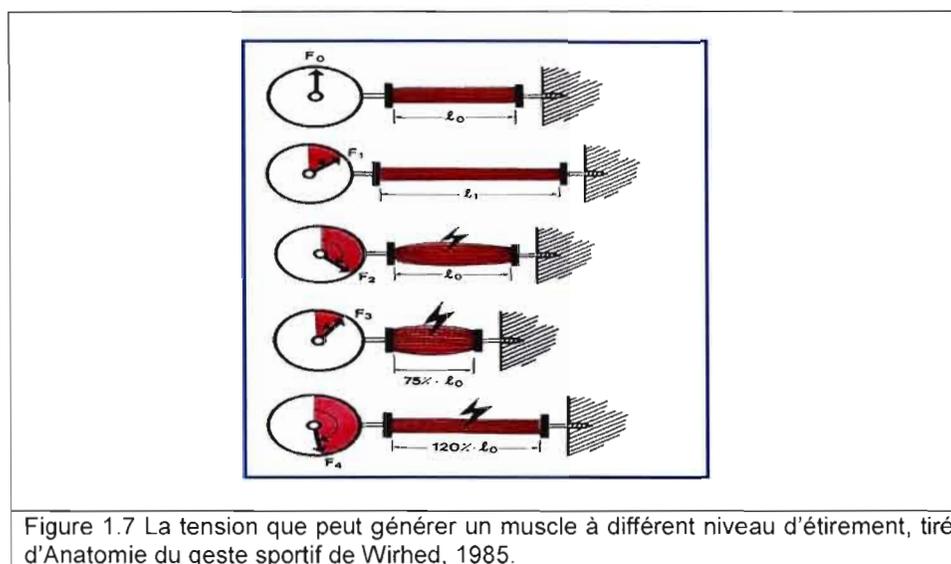
est possible de constater que l'augmentation du moment de force à l'épaule est proportionnelle à l'augmentation de l'angle relatif pour cette articulation (figure 1.6). Malgré que l'angle absolu à l'épaule soit invariable, l'angle relatif, quant à lui, contribue à faire varier le moment de force. Cette variation est obtenue grâce à la modification de la longueur des muscles antagonistes qui augmente passivement les moments de force exercées sur l'épaule.



1.1.1.4 La relation Tension-Longueur

La relation de tension-longueur (T-L) explique la variation de la force qu'un muscle peut générer selon sa longueur (Gordon, 1966 ; Carlson et Wilkie, 1974). La figure 1.7 présente différentes situations où le muscle réagit en produisant de la tension. Lorsque le muscle est au repos (L_0), aucune tension n'est enregistrée sur le dynamomètre. Par contre, lorsqu'il est étiré (L_1), le muscle produit de la tension. Ce phénomène est dû aux composantes élastiques du muscle (éléments passifs) qui tendent à ramener les fibres dans leur état de repos. De plus, la force de contraction musculaire transmise au tendon dépend de l'angle entre les fibres et le tendon des muscles pennés (Degens et al., 2009).

Ensuite, lorsqu'une stimulation électrique est envoyée (commande motrice), le muscle génère beaucoup plus de tension lorsque sa longueur est plus grande. Le muscle, qui est stimulé alors qu'il est étiré à sa longueur de repos (L_0), développe plus de tension que celui raccourci à 75 % de la longueur au repos (figure 1.7). Plus la longueur du muscle diminue, plus il est difficile pour les fibres musculaires de produire de la tension puisque leur pouvoir contractile diminue (voir la figure 1.8). Toutefois, lors d'un raccourcissement déterminé des fibres musculaires, alors que le muscle en entier est raccourci, il est plus facile d'appliquer un fin contrôle du mouvement (Degens et al., 2009).



Pour la réalisation d'un travail sur une surface horizontale élevée (toit), les muscles responsables de la flexion de l'épaule sont raccourcis lorsque l'angle à l'épaule du travailleur est de 90 degrés (figure 1.4). La tension musculaire est alors moins grande, comme l'indique F_3 à la figure 1.7. Pour une même charge et un levier constant, plus le muscle est raccourci, plus la demande musculaire sera importante pour maintenir la même position par rapport à une situation où le muscle est moins raccourci. De ce fait, dans une telle position, les muscles fléchisseurs à l'épaule sont tellement raccourcis qu'ils doivent utiliser beaucoup plus de fibres pour développer la tension nécessaire au maintien de la posture (Marchand et al., 2008). La longueur du muscle influence donc aussi le niveau de sollicitation, comme le démontre la figure 1.8.

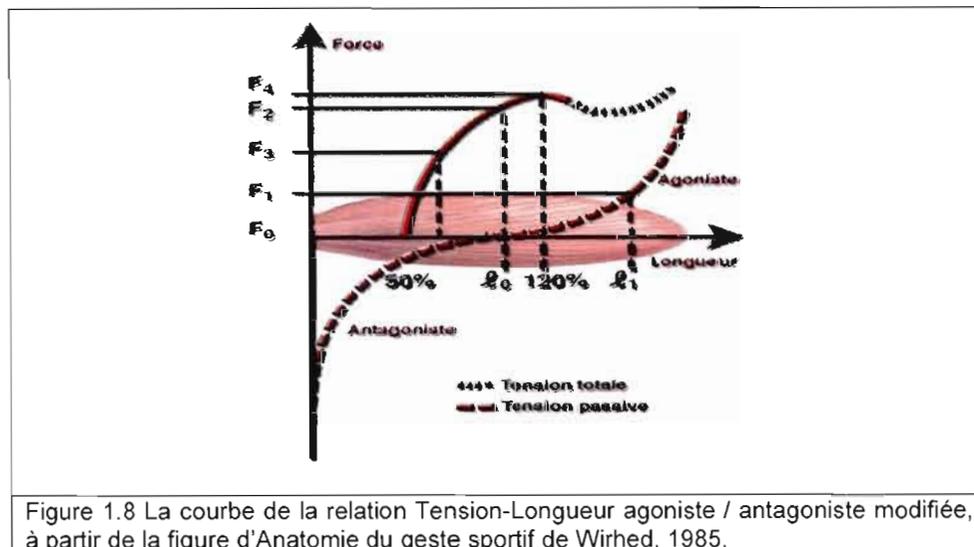


Figure 1.8 La courbe de la relation Tension-Longueur agoniste / antagoniste modifiée, à partir de la figure d'Anatomie du geste sportif de Wirhed, 1985.

Cette figure présente la courbe tension-longueur qui comporte toutes les composantes précédemment mentionnées. Le pouvoir contractile du muscle (fibres musculaires) 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 (L_0).

La courbe de la tension passive de l'antagoniste fût rajoutée de manière à mieux représenter la réalité, dans cette figure modifiée (figure 1.8). En effet, les muscles antagonistes peuvent induire une contrainte par l'étirement passif au niveau de l'articulation de l'épaule. Ces muscles, tels que le grand dorsal et le grand rond, peuvent nuire au travail de l'agoniste. Il est mentionné que l'agoniste (fléchisseurs de l'épaule) génère peu de tension lorsqu'il est raccourci, comme dans l'exemple cité plus haut. À l'inverse, l'antagoniste qui est étiré peut produire beaucoup de force grâce aux composantes élastiques du muscle. Dans une telle position, l'agoniste devra fournir une tension plus forte afin de vaincre la résistance offerte par l'antagoniste. Cette résistance à l'étirement que possède tous les muscles au-delà de leur longueur de repos est influencée par plusieurs facteurs : l'importance relative des enveloppes conjonctives, la longueur du muscle et l'orientation des fibres (Wilkie, 1976). Des muscles bipennés très

courts peuvent, par exemple, exercés une tension passive très importante lorsqu'ils sont étirés.

Dans l'étude de Marchand et al. (2008), une relation est obtenue entre le pourcentage d'utilisation musculaire moyen (PUM) des deltoïdes et l'angle relatif à l'épaule, lorsque le bras est maintenu à l'horizontal, pour tous les sujets. Les résultats de PUM moyen des deltoïdes permettent de quantifier le niveau d'activation réalisé par les muscles de l'épaule pour chaque angle relatif. La figure 1.9 présente le pourcentage d'utilisation musculaire moyen (PUM moyen) mesuré à l'aide de l'électromyographie (EMG). Cette figure démontre donc que la hausse de la demande musculaire est induite par le raccourcissement des muscles agonistes, mais aussi par l'étirement passif des muscles antagonistes, qui accentue la charge externe pour les deltoïdes chez 19 sujets.

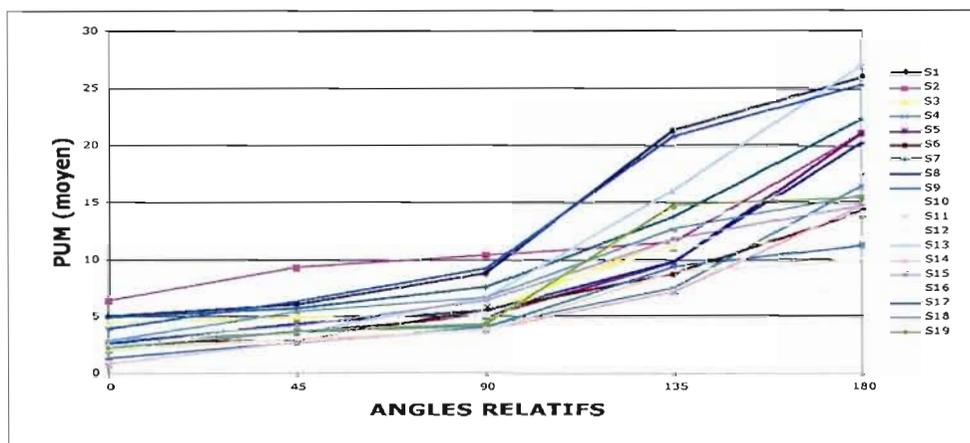


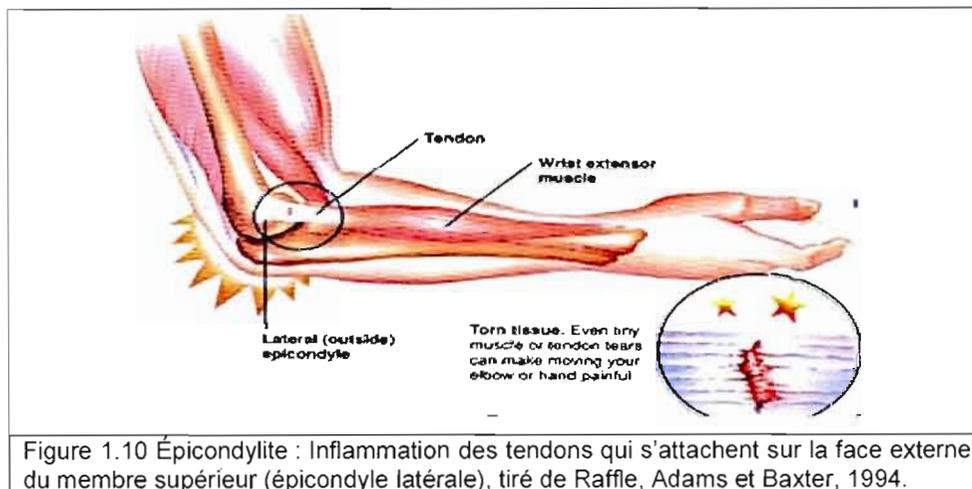
Figure 1.9 Pourcentages d'utilisation musculaire moyens des deltoïdes obtenus selon les différents angles relatifs à l'épaule et où le bras était toujours maintenu à l'horizontale, tiré de Marchand et al., 2008.

1.1.2 LES CONTRAINTES AU COUDE

1.1.2.1 Les troubles musculosquelettiques

Chez les peintres, l'articulation du coude est aussi à risque compte tenu des mouvements de pronation et de supination qui sont effectués lors du maintien du pistolet. Les TMS sont également présents à cette articulation, tout

particulièrement sous forme de tendinopathie. L'épicondylite, aussi appelé « tennis elbow », est la lésion la plus répandue qui touche cette articulation, chez les travailleurs. Il s'agit en fait d'une surutilisation des muscles extenseurs qui peut mener à une inflammation ou à une irritation de l'insertion du tendon (Park et al., 2008). Cette inflammation survient aux tendons et aux tissus avoisinants la face externe de l'épicondyle latérale du membre supérieur, voir la figure 1.10. Bien souvent, le mode d'utilisation de ces muscles de l'avant-bras détermine l'apparition d'une épicondylite. Ces muscles contrôlent les mouvements de la main et du poignet.



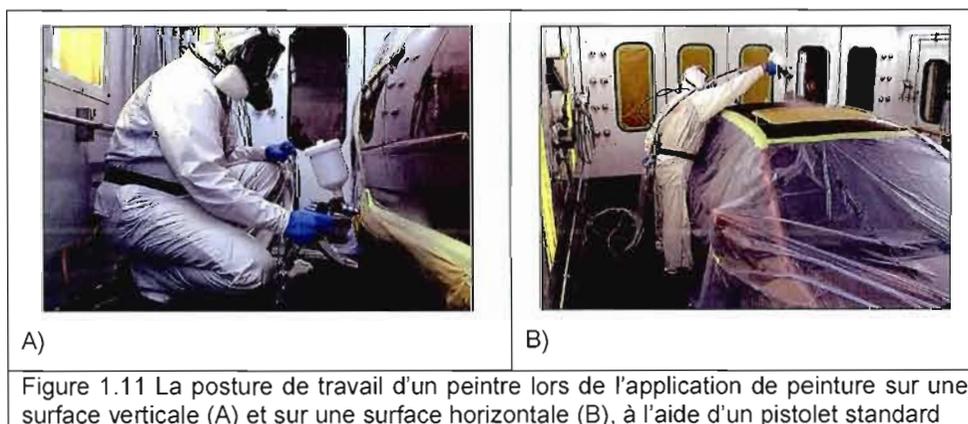
Les actions principales des muscles rattachés à la face externe du coude sont l'extension des doigts et du poignet et la supination de l'avant-bras (CCHST, 1999). Il s'agit donc des muscles extenseurs du poignet et des doigts et des muscles supinateurs de l'avant-bras. Or, chez les peintres, la supination et la pronation de l'avant-bras avec efforts correspondent à 37% de la durée de la tâche (Semid, 2002). Effectivement, ces travailleurs doivent effectuer des gestes tels que la préhension de l'outil, l'extension du poignet et le déplacement de l'avant-bras, ce qui contribue à l'apparition de la lésion. Même une sollicitation de faible importance pendant une longue période peut favoriser le développement de troubles tendineux à l'épicondyle (Sjogaard, 1986). Pour ces actions, les muscles extenseurs du poignet et des doigts travaillent de manière importante lors du maintien du pistolet. Rogier et al. (2009) mentionnent que le travail avec

une charge supérieure à 1 Kg lors d'un travail statique de la main pendant la majorité du cycle de travail avec une extension presque complète (0-45°) au coude, sont des facteurs de risque au développement d'une TMS au coude.

De plus, les muscles supinateurs de l'avant-bras sont également impliqués dans les mouvements de précision lors de l'application de peinture. Les muscles responsables des mouvements simultanés de supination de l'avant-bras et de flexion du poignet, reliés à la préhension de l'outil et à son maniement, peuvent engendrer une force considérable sur les tendons. D'ailleurs, une étude démontre qu'un travail avec les membres supérieurs élevés devant le corps, les poignets en flexion ou en déviation ainsi que des mouvements de précision pendant une journée de travail sont des facteurs de risque pour développer une épicondylite latérale (Haahr et Andersen, 2003). La position des articulations au membre supérieur joue donc un rôle important sur la santé des travailleurs.

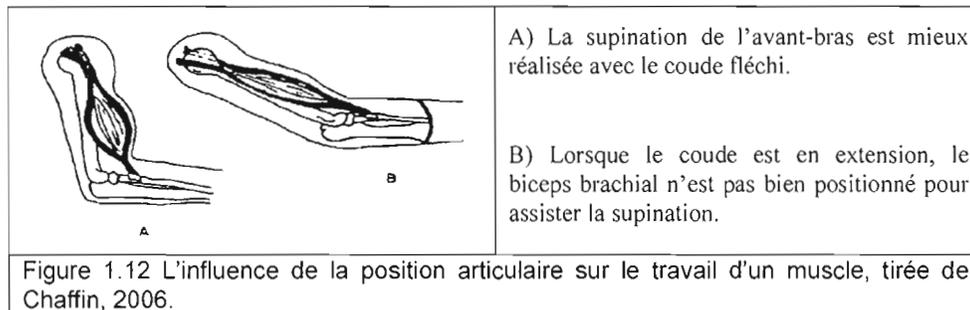
1.1.2.2 La posture de travail

Lors de l'application de peinture sur une surface verticale, la posture de travail du peintre favorise le rapprochement des segments au corps. De plus, la surface permet au travailleur de réaliser l'effort avec le coude fléchi (figure 1.11 A).



Cette position avantage le travail du biceps brachial qui peut intervenir lors de la stabilisation de l'avant-bras. Le positionnement articulaire est important

puisqu'il permet au muscle de produire plus de force, comme le montre la figure 1.12. Lorsque le coude est en extension, le levier (bras de force) du biceps brachial n'est plus avantage par rapport à l'épaule et au coude. Il en va de même pour tous les autres muscles du membre supérieur qui ont avantage à être utilisés de façon optimale. Cette posture optimale est représentée par un angle relatif à l'épaule de zéro ainsi qu'un angle de 90° au coude.



De plus, la hauteur de la pièce à peindre joue un rôle important dans l'activation des muscles de l'avant-bras. L'utilisation d'un pistolet à plus de 75 cm du sol, sur la partie supérieure d'une portière, constitue une situation idéale pour le maintien du pistolet. En effet, le poignet est en position neutre, ce qui exige uniquement le travail des extenseurs du poignet afin de maintenir le pistolet durant la tâche.

Toutefois, pour une condition à moins de 30 cm du sol, sur la partie basse d'une portière, le travailleur doit faire une extension au coude. Comme mentionné plus haut, le biceps brachial n'est pas avantage afin de contribuer à la stabilisation de l'avant-bras. Également, à cette hauteur, le maintien à la verticale du pistolet est difficile à réaliser. Le travailleur effectue donc un mouvement de supination de l'avant-bras de manière à incliner légèrement le pistolet. Du même coup, les muscles extenseurs du poignet sont soumis à la force de gravité due au changement d'orientation du poignet. La compensation posturale adoptée par le travailleur, causée par l'accessibilité réduite à la section, permet d'envisager une hausse de la demande des muscles supinateurs et extenseurs rattachés à la face externe du coude.

1.1.3 LES CONTRAINTES AU POIGNET

1.1.3.1 Les troubles musculosquelettiques

Finalement, une étude réalisée auprès de 7000 travailleurs de l'Ohio indique que la partie du corps la plus touchée par les TMS est le poignet avec 48% (Tanaka et al., 1988). Chez les travailleurs qui manipulent des outils, cette articulation semble plus à risque puisqu'elle est utilisée pour maintenir la charge et les muscles autour de celle-ci travaillent également, produisant ainsi des forces ou des charges importantes. Tout comme à l'articulation de l'épaule et du coude, les facteurs de risques peuvent causer l'apparition d'une tendinite au poignet. De plus, un autre type de TMS peut survenir dans cette région, soit le syndrome du tunnel carpien. Ce dernier résulte, quant à lui, d'une compression ou d'un frottement du nerf médian situé dans le tunnel carpien, à l'articulation du poignet. La pression à l'intérieur du tunnel carpien est alors élevée lorsque le poignet est placé en flexion ou en extension où quand l'articulation effectue des actions tels que : fermer le poing ou tenir des objets (Barr et al., 2004). La sollicitation d'une articulation au-delà d'une certaine amplitude articulaire peut donc avoir des effets néfastes sur les éléments (tissus) qui l'entourent. Chez les peintres de carrosserie automobile, 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 ou les doigts en pince peuvent entraîner une augmentation de la pression à l'intérieur du canal et donc les phénomènes de compression du nerf (Pohren, 1992). Le poignet est une articulation hautement sollicitée puisqu'en plus de contribuer au mouvement d'application de la peinture, elle est aussi en charge du maintien du pistolet. Le poignet, qui est placé en position neutre sur le pistolet, doit s'ajuster en fonction de la surface à peindre. Une déviation (abduction-adduction) du poignet, par rapport à la position neutre, peut alors contribuer à l'apparition d'un trouble musculo-squelettique à cette articulation (Armstrong and Chaffin, 1979). De même que 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.

1.1.3.2 La posture de travail

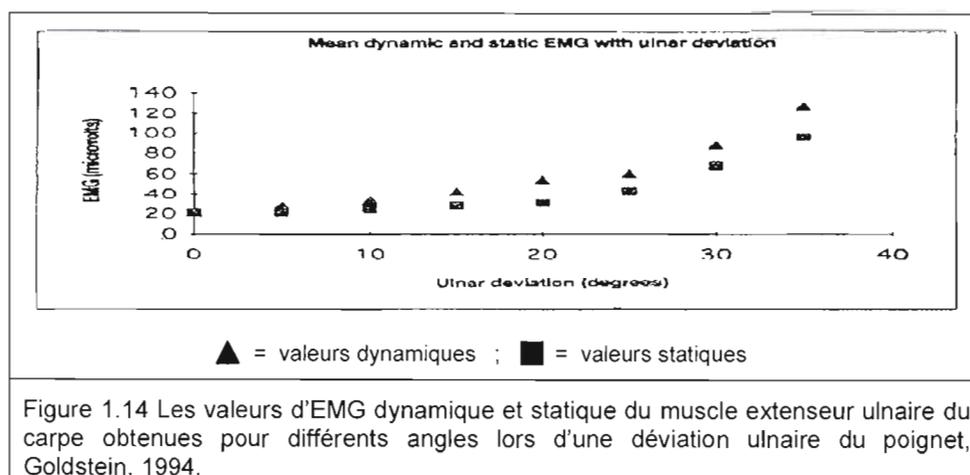
Pour une surface verticale, les mouvements d'extension et de flexion au poignet surviennent lors de l'application de la peinture (gauche-droite). Les travailleurs observés préalablement maintiennent le poignet fixe et contrôlent ainsi le mouvement à partir de l'épaule. Cette technique est favorisée lorsque la surface de balayage est grande (Marchand et Giguère, 2010). Toutefois, les pièces plus difficile d'accès ou légèrement ondulés par section obligent le travailleur à modifier l'angle au poignet. Comme le démontre la figure 1.13 A, le travail sur une surface verticale permet de conserver le poignet droit. Le pistolet standard est spécifiquement conçu pour ce type de surface afin de réduire les contraintes au poignet (il en sera question dans la section des outils).



Figure 1.13 La posture de travail d'un peintre, au poignet, lors de l'application de peinture A) sur une surface verticale et B) sur une surface horizontale, à l'aide d'un pistolet standard

D'ailleurs, il est important que le poignet reste en position neutre lors de l'utilisation du pistolet. Cette posture est favorable parce que dès que l'orientation du poignet est changée, la force de préhension qu'une personne est capable de déployer sur le pistolet diminue. Par exemple, pour une déviation ulnaire (adduction) de 45 degrés, la force de préhension change d'un maximum de 100% à un maximum de 75%, soit une diminution de 25% de la force (Putz-Anderson, 1994). De plus, il semble que la force de préhension de la main

influence l'activité des muscles impliqués à l'épaule. Le trapèze et le deltoïde médian présentent une corrélation positive entre le degré d'activité musculaire à l'épaule et l'intensité de la force de préhension pour différentes positions statiques avec le membre supérieur dominant (Sporrong et al., 1995). D'autres facteurs qui influencent la force de préhension sur l'outil sont : le poids de l'outil, le moment de force exercé sur la prise, le coefficient de friction, la forme de la poignée, etc. Ils seront abordés en détail dans la section 1.4 sur les outils. Cette réalité survient lors de l'application de peinture sur une surface horizontale, où le pistolet doit être incliné vers le bas de manière à conserver la direction du jet perpendiculairement à la surface (figure 1.13 B). De ce fait, le poignet doit effectuer une déviation ulnaire (adduction) de plus de 20° afin de maintenir la posture (Mirka et al. 2002). Une étude, menée sur l'action du muscle extenseur ulnaire du carpe (également un adducteur du poignet) a révélé que plus le degré de déviation ulnaire est élevé, plus le degré de contraction de ce muscle (EMG) l'est aussi (Goldstein, 1994). La figure 1.14 présente l'activité électrique du muscle extenseur ulnaire du carpe pour différents angles lors d'une déviation ulnaire, où le degré zéro équivaut à la main en pronation (paume vers le sol). Sur cette figure, les valeurs dynamiques représentent l'activité électrique (EMG) obtenu lors d'un mouvement de déviation ulnaire avec un certain angle. Tandis que les valeurs statiques ont été enregistrées lors d'une position statique pour un certain angle, qui nous intéresseront davantage dans ce cas-ci.



La composante statique représente davantage le travail des peintres. Or, les valeurs statiques démontrent bien que le maintien de la déviation ulnaire au poignet augmente l'activation du muscle évalué. En outre, le stress sur les tendons est plus grand à l'articulation du muscle impliqué. De plus, le protocole ne comprend pas de charge à la main lors de la posture. L'ajout d'un poids supplémentaire, associé au pistolet à peinture, ne ferait qu'augmenter le stress sur les structures musculaires et tendineuses.

La position des jambes fléchies, lors de certaines conditions (figure 1.2), peut créer une instabilité posturale et influencer la position du tronc et du membre supérieur. Cependant, ce projet s'est penché exclusivement sur le travail du membre supérieur.

1.1.3.3 La déviation ulnaire

La déviation ulnaire créée lors d'un travail sur une surface horizontale cause l'étirement des muscles antagonistes. Dans cette situation, l'articulation n'est pas placée dans une position naturelle et optimale. Les muscles responsables de la déviation radiale (abduction) du poignet sont très étirés (figure 1.15).



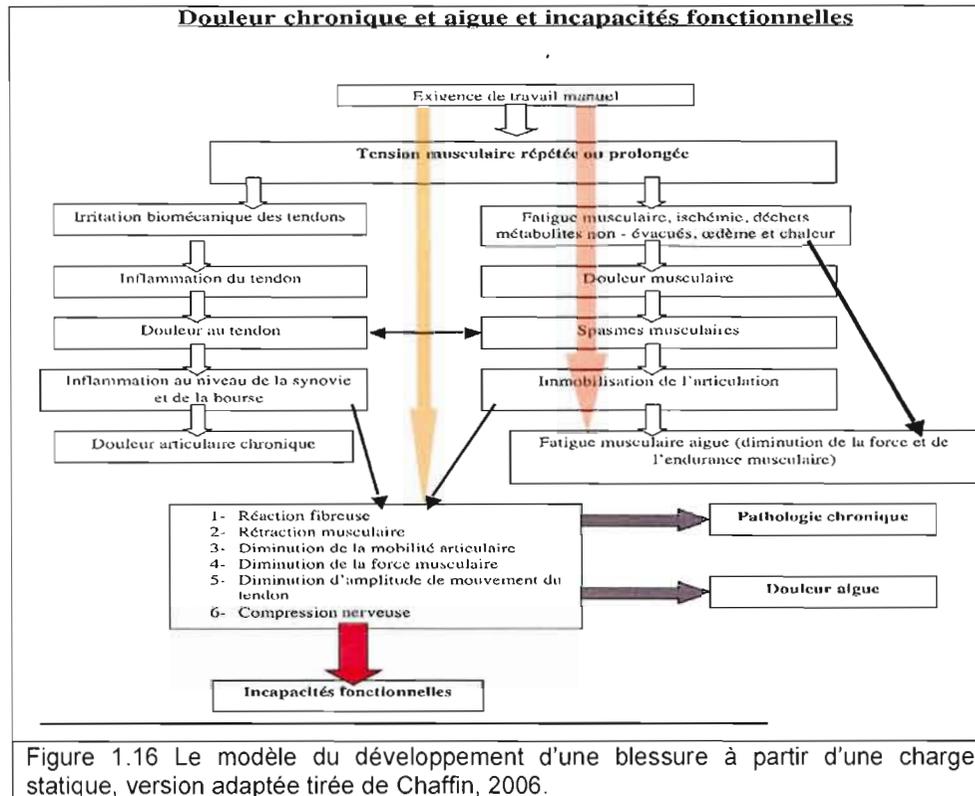
Figure 1.15 La déviation ulnaire du poignet lors d'un travail sur une surface horizontale, à l'aide d'un pistolet standard

Un étirement important, qui est maintenu sur une longue période, peut aussi perturber la circulation sanguine des muscles. En effet, Welsh et Segal (1996) ont démontré que l'étirement d'un muscle provoque une vasoconstriction ainsi qu'une réduction du flot sanguin localisé. De plus, il est très commun de trouver un haut taux de déviation aux poignets dans l'industrie (Marras et Schoenmarklin, 1993). La conception des pistolets à peinture ainsi que le travail sur un plan

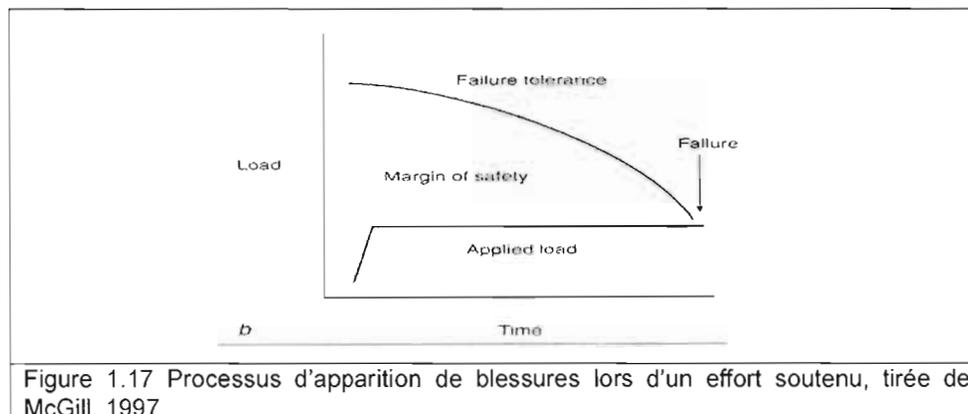
horizontal peut être en partie la cause des problèmes reliés aux déviations du poignet.

1.2 LA CHARGE STATIQUE

L'effort statique prolongé fait partie de la réalité des peintres de carrosserie automobile. Lors de la réalisation du travail, l'application de la peinture sur une pièce doit être achevée de façon continue afin d'obtenir un fini uniforme. De ce fait, cela peut prendre quelques secondes, et même, quelques minutes afin de peindre une grande surface en entier. Même si le pistolet à peinture ne présente pas une charge importante, la charge statique ne doit pas être négligée pour autant. La préhension de l'outil (par exemple, l'activation de la détente sur le pistolet à peinture) ou le maintien de l'élévation du membre supérieur obligent une contraction isométrique de la part des muscles responsables de ces actions. Le muscle est alors maintenu en tension constante sans aucun relâchement. Lors d'un mouvement dynamique, le sang circule facilement grâce à la contraction et au relâchement du muscle. Dans ce cas-ci, le sang s'évacue difficilement causant ainsi l'accumulation des déchets. Le muscle est alors sous-alimenté et le débit sanguin est insuffisant (Cailliet, 1981), ce qui provoque une apparition d'inconfort. Selon les observations (Marchand et Giguère, 2010), les peintres seraient davantage concernés par le modèle qui explique l'apparition de la douleur à partir d'un effort musculaire prolongé (charge statique). La figure 1.16 présente une séquence d'événements produisant l'apparition d'une blessure suite à une tension musculaire prolongée (voir les étapes présentées à droite de la figure). Ce sont les étapes à franchir avant que l'articulation devienne non fonctionnelle.

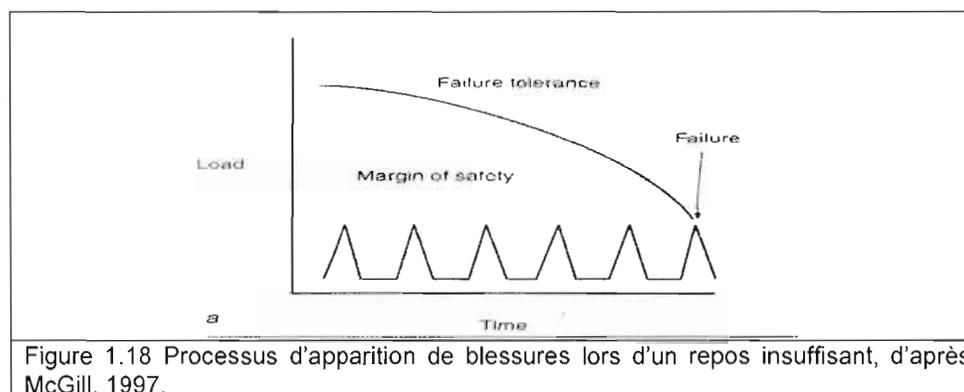


Dans son ouvrage, McGill explique très bien la cause d'une lésion, survenue suite à l'application prolongée d'une charge. Le processus d'apparition de blessures lors d'un effort statique (McGill, 1997) est élaboré sur un laps de temps qui peut varier de quelques heures à quelques années (figure 1.17). Il s'agit d'une force externe, inférieure au seuil de tolérance des tissus, qui est maintenue de façon prolongée. Au fil du temps, la diminution de l'irrigation sanguine provoque la dégénérescence des tissus tendineux. Le seuil de tolérance des tissus diminue alors jusqu'à ce qu'il devienne plus faible que la force externe appliquée. Lorsque la jonction des deux courbes survient, l'apparition d'une lésion peut survenir.



L'activation de la détente du pistolet à peinture ainsi que le maintien de ce dernier constituent des actions qui obligent le travailleur à adopter une contraction isométrique (statique). Par exemple, les muscles extenseurs du poignet doivent se contracter tout au long du travail où le pistolet est maintenu en l'air. Tel que mentionné plus haut, le manque de relâchement musculaire crée une mauvaise circulation sanguine. Le manque d'irrigation affaiblit alors la tolérance des tissus jusqu'à l'atteinte de sa limite.

Selon le même auteur (McGill, 1997), ce seuil de tolérance des tissus peut également être atteint si un repos est insuffisant durant le travail (figure 1.18). Un effet de répétition peut survenir lorsque le travailleur fait des flexions et des extensions répétées au poignet, lors de l'application de la peinture au pistolet. Un travail de plusieurs heures consécutives jumelé à une période de repos trop courte peuvent être également une cause de l'apparition d'une blessure.



La charge statique peut être quantifiée à l'aide de l'EMG, qui enregistre l'activité électrique d'un muscle au travail. Cette étape consiste à connaître le niveau d'activation musculaire lors de ce travail. Pour être plus exacte, ces valeurs sont transformées en pourcentage de contraction volontaire maximale (%CVM) qui indique l'implication du muscle pendant l'effort. Cette notation sera conservée pour la suite du document. Autrefois, la courbe de Rohmert (1968) prédisait que les contractions musculaires en dessous de 15% de la capacité maximale pouvaient être maintenues indéfiniment sans fatigue. La figure 1.19 montre cette courbe qui fut créé afin d'établir une relation entre l'endurance et le niveau d'effort. D'une façon logique, le pourcentage de force musculaire utilisée (niveau d'effort) est inversement proportionnel au temps que prend le muscle à perdre volontairement la capacité de produire de la force (endurance). L'étude de Sato et al. (1984) apporte l'élément nouveau que la fatigue serait développé au cours de tous les niveaux d'effort. Cependant, la réaction à la fatigue est différente pour chaque muscle selon le type de fibres qui le compose (Enoka et Duchateau, 2008). Il est donc important de traiter l'analyse de chaque groupe musculaire séparément.

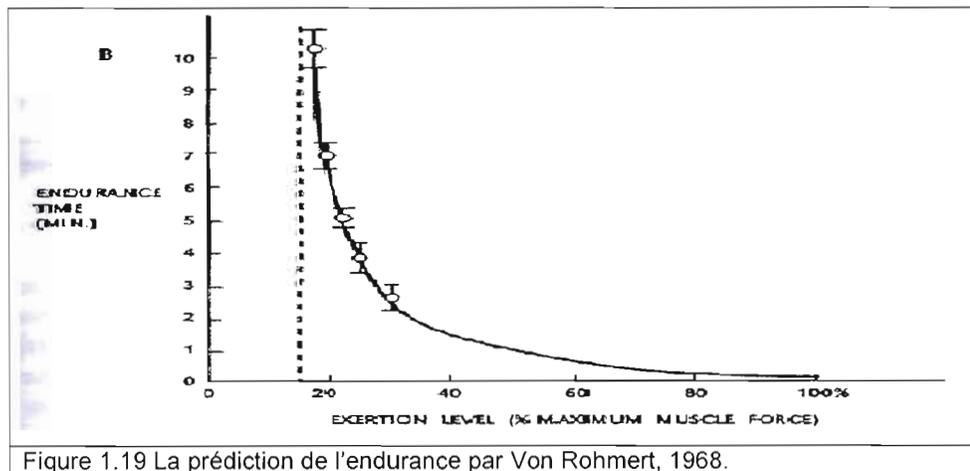


Figure 1.19 La prédiction de l'endurance par Von Rohmert, 1968.

Quelques années plus tard, Sjogaard et al. (1986) ont trouvé une augmentation significative dans la perception de la fatigue, sur un effort de longue durée, lorsque la contraction volontaire maximale équivaut à 5%. Ils déterminent, par la même occasion, la limite d'endurance à 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 ce chiffre, la hausse du recrutement de fibres musculaires provoque l'augmentation de la tension dans le muscle, nuisant ainsi à l'irrigation sanguine. La fatigue musculaire ayant été identifiée comme un contribuant au développement des troubles musculo-squelettiques (Chaffin, 1973), il n'est pas à l'avantage du peintre de travailler dans des conditions favorisant la fatigue (effort statique prolongé). Afin de mieux cibler les conditions de fatigue, Van Dieen et Oude Vrielink (1994) ont déterminé des coefficients de régression de la force relative avec les équations logarithmiques du temps d'endurance obtenues par cinq études réalisées auparavant. Le tableau 1.1 présente donc les valeurs de prédiction du temps de maintien (min) en fonction de la force relative (%). Une estimation peut être réalisée en déterminant le %CVM utilisé à l'aide de l'EMG, qui correspond à la force relative (%) lors d'un travail, afin d'estimer le temps de maintien.

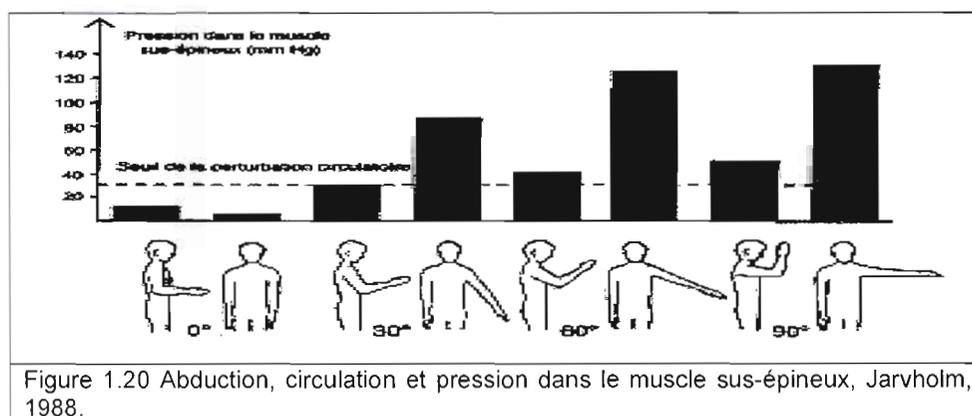
Tableau 1.1 Les valeurs de prédiction du temps d'endurance (min) en fonction de la force relative (%), version adaptée de Chaffin. 2006.

Relative Force (%)	Endurance Time (min.)					
	Average	Minimum	Maximum	Range	SD	CV (%)
2	18.2	10.2	33.1	22.9	7.5	41.3
4	16.5	9.3	29.4	20.1	6.7	40.6
6	15.0	8.5	26.2	17.6	6.0	40.0
8	13.6	7.8	23.3	15.5	5.4	39.4
10	12.4	7.1	20.7	13.5	4.8	38.8
30	4.8	2.9	7.9	4.9	1.7	35.5
50	1.9	1.2	3.4	2.2	0.7	37.3
70	0.7	0.4	1.5	1.0	0.3	39.9
90	0.3	0.2	0.6	0.5	0.1	45.1

Note : SD = standard deviation ; CV = coefficient of variation.

Les valeurs de prédictions de ce tableau tiennent compte d'une généralité applicable à plusieurs muscles. Compte tenu de la variabilité des résultats, la version adaptée de Chaffin (2006) donne un simple aperçu de la capacité du temps d'endurance d'un muscle.

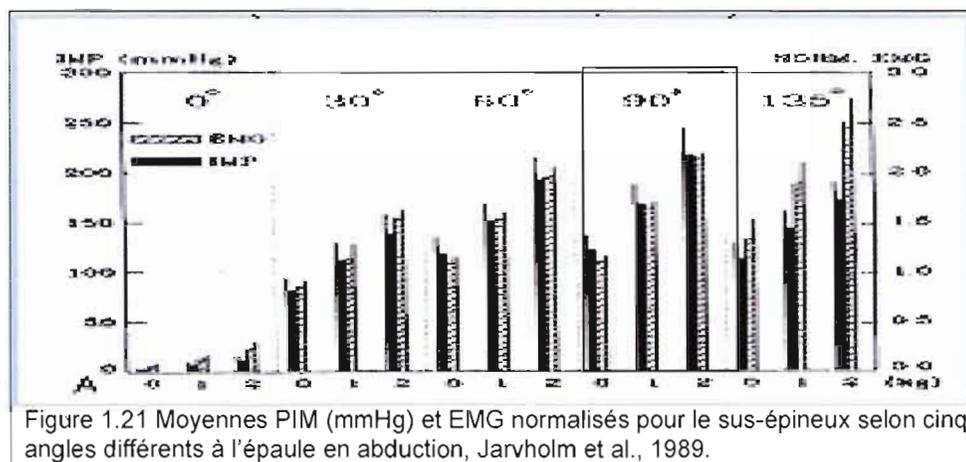
En outre, la charge statique s'explique aussi par l'augmentation de la pression intramusculaire. Pour reprendre l'exemple précédent, les peintres peuvent se retrouver avec le membre supérieur au-dessus de l'horizontale lors d'une condition sur un plan horizontale (toit). En effet, la hauteur des pièces 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 (Marchand et al., 2008). 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 direct avec celui de la pression intramusculaire (Jarvholm et al., 1989). La figure 1.20 présente les résultats de l'étude de Jarvholm (1988) réalisée sur la variation de la pression intramusculaire du sus-épineux en fonction de l'angle relatif d'abduction à l'épaule. Cette figure démontre que la valeur de la pression obtenue, pour la position du bras tendu à 90° , est 6 fois plus grande que celle obtenue lorsque le bras est tendu à 0° . Cette hausse de la pression intramusculaire, pour le bras tendu à 90° , est due à l'augmentation de la charge musculaire.



Lors d'un effort soutenu, les périodes de relâchement musculaire sont souvent insuffisantes, ce qui peut élever les pressions intra tissulaires. Au-dessus du seuil critique de 30 mm Hg (Jarvholm, 1989), 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 cette situation est atteinte, seul l'arrêt de l'effort peut provoquer un retour à la normale progressif des pressions. Le même résultat est envisageable pour les muscles fléchisseurs de l'épaule bien que l'étude ait été réalisée pour l'abduction à l'épaule.

Par conséquent, l'augmentation de la pression intramusculaire est proportionnelle à la hausse des valeurs EMG. En 1989, Jarvholm et al. ont observé la corrélation entre les moyennes de la pression intramusculaire (PIM) et les valeurs normalisées d'EMG pour le sus-épineux selon cinq angles différents à l'épaule. Lors d'une abduction de 90° à l'épaule, la figure 1.21 présente les résultats obtenus de PIM et d'EMG pour trois différentes charges appliquées dans la main. En réalité, le moment de force à l'épaule augmente en fonction de la charge.



Pour un angle de 90° d'abduction à l'épaule, la PIM et les valeurs d'EMG augmentent de manière identique lorsque le moment de force augmente aussi. De ce fait, il est possible de présumer que la hausse des moyennes PIM est proportionnelle à celle des valeurs d'EMG. À cet égard, la charge statique peut créer une hausse de la demande musculaire et ainsi constituer un réel facteur de risque chez les travailleurs.

1.3 L'ÉLECTROMYOGRAPHIE (EMG)

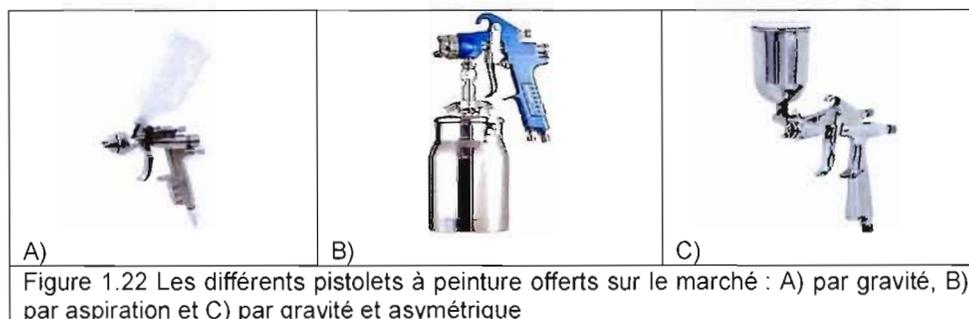
L'un des meilleurs moyens d'évaluer l'amplitude de la charge statique est l'électromyographie (EMG). L'EMG de surface est la seule méthode non-invasive qui offre de l'information directe sur la participation du muscle lors d'un travail (Mathiassen et al., 1994). Le signal enregistré dépend alors de la synchronisation des potentiels d'action, de la forme particulière et de la grosseur d'un muscle et de la fibre musculaire, de la disposition de l'électrode sur les fibres musculaires et de l'impédance de la peau du sujet (Sanger, 2007). À la base, les muscles sont activés par un influx nerveux qui permet l'activation de la production de force mécanique. L'activation des muscles peut être observé avec l'EMG de surface et ainsi refléter le niveau d'activation. Plus le niveau d'EMG est élevé, plus il y a de fibres musculaires qui sont sollicitées (C. Disselhorst-Klug et al., 2009). Toutefois, la plupart des chercheurs sont d'avis que l'EMG de surface peut présenter des limitations importantes (Day et Hulliger; 2001, Farina et al. 2004). En effet, des signaux non désirés, connus sous le nom de diaphonie myoélectrique, représentent le facteur limitatif le plus significatif couramment associé à l'EMG de surface (Lowery et al. 2002). Ce phénomène correspond à l'enregistrement d'un signal myoélectrique qui a été influencé par l'activité d'un autre muscle. La façon la plus directe de vérifier si un tel problème se pose est d'examiner la détection du signal EMG de surface pour les différentes électrodes, en activant chacun des muscles individuellement (Mangun et al. 1986) par son action principale. Or, nous avons procédé à cette vérification pour chacun des participants avant l'expérimentation. De plus, ce phénomène n'est pas toujours présent comme le démontre l'étude de Pettersen et Westgaard (2005) où aucune diaphonie n'a été enregistrée sur les muscles du cou tels le trapèze, le muscle scalène, le sterno-cléido-mastoïdien, etc. L'utilisation de l'EMG a permis d'estimer le travail musculaire (Wells et al., 1997) et de déterminer avec précision les moments et les durées de l'activité musculaire. Lors de contractions dynamiques, les propriétés du signal EMG peuvent changer rapidement à cause de la rapidité du recrutement et du dé-recrutement des unités motrices et des changements de positions (angles) aux articulations (Farina, 2006). Dans cette étude, bien que les mouvements soient dynamiques, le travail de peintre

possède une forte composante statique due au maintien du pistolet et du membre supérieur pour toutes les conditions.

La normalisation de la localisation des électrodes n'étant pas encore statuée. En 1997-1999, un projet européen nommé « Surface EMG for Non Invasive Assessment of Muscles (SENIAM) présente les détails de l'analyse de la littérature. Suite aux méthodologies présentées, il constate que 10 publications sur 21 procèdent à la pose des électrodes sur la partie proéminente du muscle.

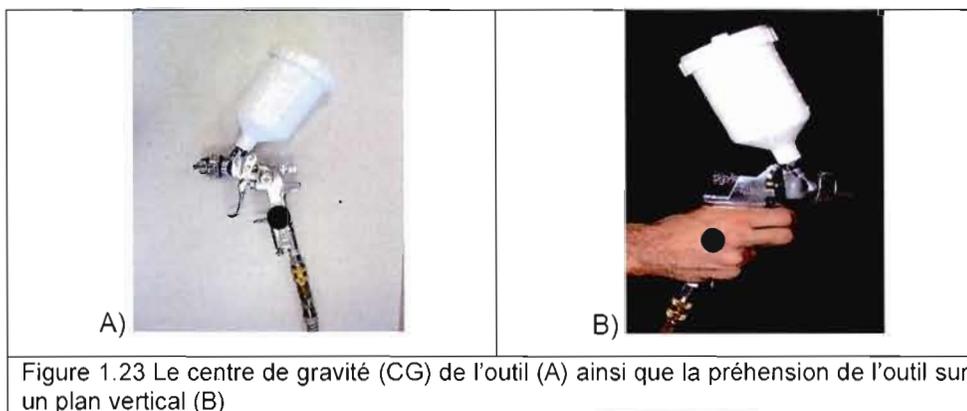
1.4 LES OUTILS

Il existe différents types de modèle de pistolet à peinture sur le marché (figure 1.22). Chacun d'eux possèdent des caractéristiques différentes qui influencent, à différents niveaux, le travail de l'utilisateur. Le poids de l'outil, la manœuvrabilité de l'outil ainsi que la force requise pour activer la détente du pistolet peuvent tous contribuer à faire augmenter l'exposition aux troubles musculo-squelettiques (Lee et al., 1997).



Le poids du pistolet ainsi que la distribution de la charge (centre de gravité) affecte la façon dont le travailleur utilise l'outil. Il est recommandé d'utiliser un outil de 1.4 Kg et moins lors de la manipulation (Fernandez et Marley, 1998 ; East et Sood, 2005). Cependant, pour des opérations de précision, le poids doit être aux alentours de 0.5 Kg. De plus, le centre de masse (centre de gravité) doit être le plus près possible du centre de la main (figure 1.23). Plus le centre de masse de l'outil est loin de la main, plus la force demandée pour maintenir le contrôle de l'outil est grande. La figure 1.23 présente une condition optimale où

la main est directement alignée sur le CG, ce qui réduit le travail de stabilisation de la main sur le pistolet.



Lors de l'utilisation d'un pistolet à peinture, la force de préhension permet le maintien de l'outil ainsi que l'activation de la détente du pistolet. En premier lieu, le moment de force exercé sur la prise dépend de la localisation du centre de gravité (CG). Sur un plan vertical, le pistolet standard ne crée aucun moment de force puisque son CG est directement aligné avec l'appui (centre de la main). Par contre, sur un plan horizontal, le déplacement du pistolet amène le déplacement du réservoir vers l'avant créant ainsi un déplacement du CG. Plus le moment de force créé par l'outil est élevé, pour une condition, plus le travail sera difficile pour les muscles impliqués dans le maintien et l'activation du pistolet (voir section 1.5).

Ensuite, ce sont les fléchisseurs des doigts qui sont responsables de l'activation de la détente du pistolet. Ces muscles doivent donc agir pour maintenir l'outil et appuyer sur la détente. Lorsque l'activation de la détente du pistolet est réalisée à 1 doigt, il est recommandé de ne pas excéder une force de 10 Newtons (Mital et Kilbom, 1992 a, b). Toutefois, la plupart des pistolets à peinture sur le marché sont activés par l'index et le majeur. Dans un cas où l'activation se fait à 2 doigts, la force exigée ne devrait pas dépasser 20 Newtons (Fransson et Winkel, 1991 ; Hazelton et al., 1975). Finalement, lorsque 4 doigts sont en action sur la détente, la force ne doit pas excéder 30 Newtons. Quelques pistolets, constitués d'une longue détente, offrent la possibilité d'appuyer à l'aide

des quatre doigts lors du travail. Comme les fléchisseurs superficiels des doigts activent tous les doigts de la main à l'exception du pouce, il est plus naturel de les activer simultanément. De plus, la pression distribuée aux doigts est mieux réparties lorsque la surface de contact est plus grande (4 doigts). Cependant, un travail de précision peut être plus facile à réaliser avec 1 ou 2 doigts sur la détente. Une étude réalisée auprès de peintres professionnels en carrosserie, avait pour objectif de comparer six pistolets à peinture. Les résultats ont démontré que la force générée pour activer la détente dépassait la limite de 30 Newtons, mentionné précédemment, favorisant ainsi les lésions aux tendons et le développement du syndrome du tunnel carpien à l'articulation du poignet (Hagberg et al., 1995). Il est à noter que la mesure de cette force peut être difficilement comparable entre les travailleurs. Effectivement, les mesures de la force d'activation sur la détente ne peuvent être comparées si les ajustements des différents pistolets ne sont pas identiques. Le niveau de serrage pour l'entrée du liquide et l'entrée d'air, modifiable sur certains pistolets, peuvent avoir une incidence sur les mesures de la force d'activation de la détente (Bjoring et Hagg, 2000).

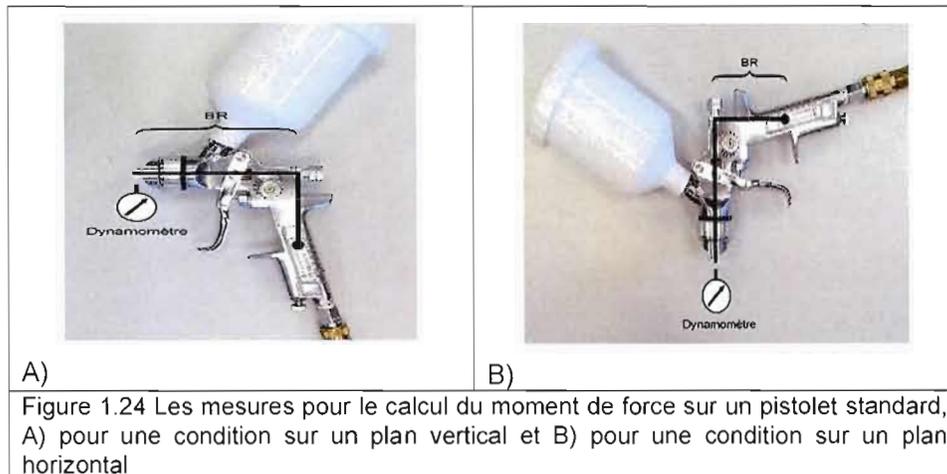
Les autres facteurs qui peuvent influencer la force de préhension sur l'outil sont : La longueur, la forme et le diamètre de la poignée, le coefficient de friction ainsi que la position de la main et des doigts sur l'outil. Une poignée trop courte peut provoquer une compression des tissus au niveau de la paume de main lors de la préhension de l'outil. Les études s'accordent pour dire que la longueur idéale varie entre 10 et 14 cm (Bjoring et Hagg, 2000 ; East et Sood, 2005 ; Fernandez, 2005). Quant à la largeur, le diamètre recommandé se situe entre 0,8 et 1,3 cm (East et Sood, 2005 ; Fernandez, 2005). Pour ce qui est de la forme de la poignée, elle doit permettre de conserver la position naturelle (neutre) du poignet. La poignée d'un pistolet à peinture doit permettre d'exercer une force en ligne droite (par exemple, l'activation de la détente avec l'index) dans la même direction que l'avant-bras et le poignet.

De plus, afin de maximiser la force de préhension sur l'outil, l'adhérence du pistolet sur la main doit être contrôlée. Un coefficient de friction élevé est alors favorable de manière à faciliter le maintien de l'outil. Cette réalité est encore plus

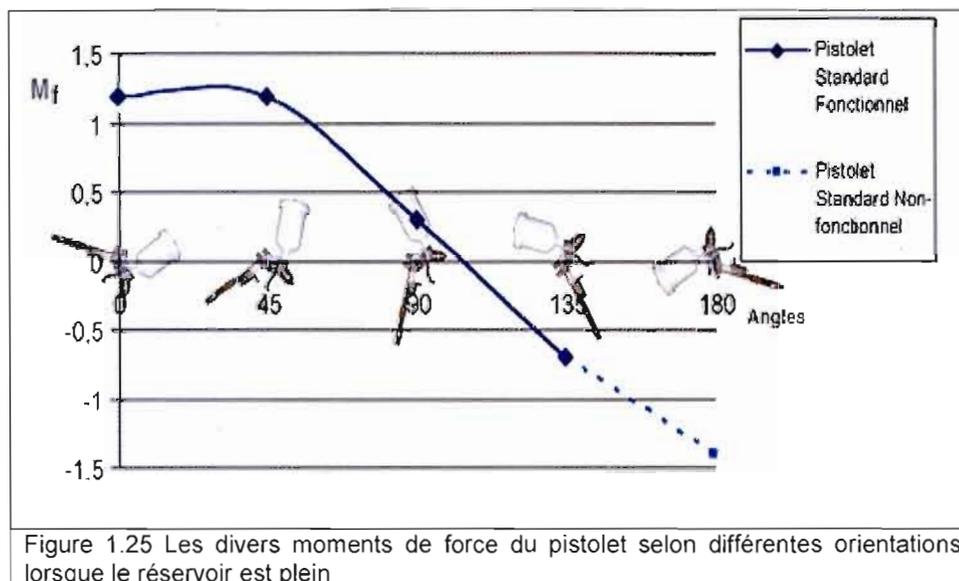
importante lorsque le pistolet est mal balancé ou lorsque celui-ci est incliné en raison de la déviation au poignet, par exemple, lors d'une condition de toit sur le plan horizontal (figure 1.2 B). Les positions adoptées par l'articulation du poignet peuvent influencer la force de préhension sur l'outil (Lamoureux et Hoffer, 1995; Terrel et Purswell, 1976). Les muscles, affectés par l'amplitude extrême de l'articulation, auront plus de difficultés à déployer la force nécessaire lors de l'effort. Pour optimiser la friction entre la main et le pistolet, il est préférable que la surface soit dure plutôt que ramolli. De cette façon, la surface permet une meilleure distribution des forces et procure un plus grand coefficient de friction (Bobjer et al. 1993). De plus, la poignée peut être constituée de vallées creuses sur le manche pour éviter que l'humidité de la main réduise la friction.

1.5 LES MOMENTS DE FORCE DE L'OUTIL

Un moment de force se définit comme étant une force de rotation exercée sur un segment qui tourne autour d'un axe (articulation). Cette contrainte créée par une résistance varie selon la distance d'application de la force. Il permet de quantifier l'effort associé au travail d'une articulation, dans une posture spécifique. Également, un moment de force peut être appliqué sur des outils, comme le démontre la figure 1.24. Cette mesure donne alors la force de rotation appliquée par l'outil au niveau de la main. Le moment de force est calculé à partir de la valeur enregistrée en Newtons (N) par le dynamomètre, multiplié par la distance en mètre (BR) entre le point d'appui du dynamomètre et l'axe de rotation au niveau de la poignée de l'outil. L'axe de rotation est déterminé lors de la prise en main du pistolet. Celui-ci équivaut à l'emplacement du centre de masse de la main sur la poignée.



L'orientation du pistolet influence le moment de force du pistolet à peinture, tel que montré à la figure 1.25. La moment de force de l'outil influence la force de préhension exercée par l'utilisateur et s'additionne au moment de force calculé pour les articulations impliquées lors de son maintien.

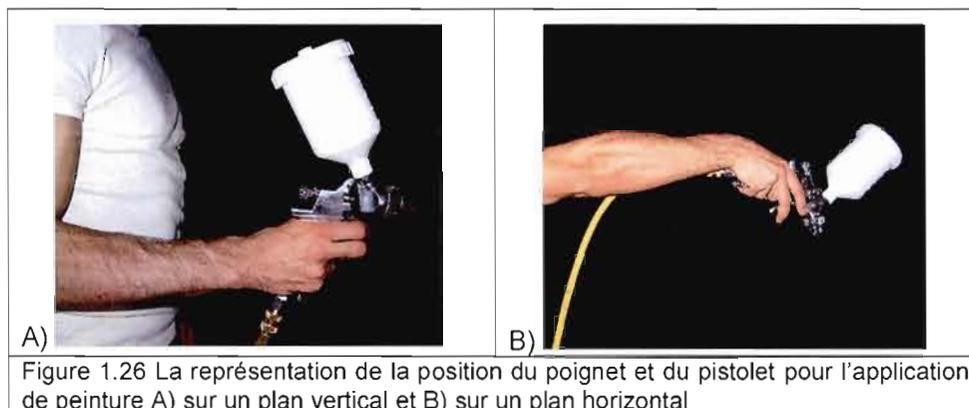


Le pistolet standard a été conçu dans le but d'offrir le moins de contrainte possible à l'articulation du poignet lors d'un travail sur le plan vertical (représente 90° sur la figure 1.25). La disposition et l'inclinaison du réservoir permettent

d'obtenir un moment de force presque nulle, et ce, peu importe la quantité de liquide contenu dans le réservoir (0 à 500 ml).

Lorsque le pistolet pivote pour réaliser le travail sur un plan horizontal, le calcul du moment de force s'effectue différemment (figure 1.24 B). Le tuyau jaune, attaché à la sortie du pistolet, est le câble d'alimentation à air pour permettre la pulvérisation de la peinture sur la surface. La méthode correspondante (représente 180° sur la figure 1.25) est utilisée lorsque le réservoir offre plus de résistance que le câble d'alimentation en air. Le pistolet pivote alors dans le sens anti-horaire par rapport à son axe de rotation. L'effet du niveau de peinture, contenu dans le réservoir, doit être pris en considération lors du calcul de moment de force. Ce dernier doit être calculé pour chacune des inclinaisons du pistolet (degré d'orientation du bec) puisque le liquide, contenu dans le réservoir, se déplace (figure 1.24 B). Ainsi, le centre de masse du pistolet varie selon son inclinaison.

La figure 1.26 présente les deux postures associées à la prise de l'outil selon l'orientation de la surface. Le pistolet standard, qui est bien balancée, ne nuit pas à l'articulation puisqu'il permet de conserver une position neutre du poignet (figure 1.26 A). En plus, lorsque le pistolet est à la verticale, l'effet du tuyau (air) est négligeable. Pour une surface horizontale, la déviation ulnaire au poignet est accentuée par le moment de force de l'outil (figure 1.26 B).



1.6 LES OBJECTIFS

Les observations réalisées par Marchand et Giguère (2010) ont permis d'exposer l'effet postural du travail des peintres de carrosserie automobile. Dans le but d'optimiser la posture de travail et ainsi réduire les contraintes aux articulations du membre supérieur, des objectifs ont été élaborés pour les différentes sections d'une automobile. Inspirés de nos hypothèses de recherche, ces objectifs généraux touchent la posture du travail, l'environnement de travail ainsi que les équipements utilisés.

1) Permettre l'élévation du travailleur afin de modifier sa posture.

Dans les conditions de toit, il semble possible de réduire le moment de force exercé à l'épaule et l'activité musculaire en plaçant le participant sur un banc pour réaliser les conditions. L'angle à l'épaule était alors réduit et la visibilité du travailleur était augmentée. De plus, le même objectif a été pensé pour la condition de portière haute où le travailleur était en position debout.

2) Permettre l'inclinaison de la surface afin de modifier la posture du travailleur.

Pour les quatre sections, l'inclinaison a permis au peintre de se rapprocher de sa zone de travail dans le but de diminuer l'angle de flexion à l'épaule et l'activité musculaire du membre supérieur.

3) Modifier le pistolet afin de réduire l'activité des muscles du poignet.

Cet objectif visait la condition du toit (surface horizontale) où le moment de force au poignet était maximal. La modification du centre de gravité du pistolet modifié devait permettre de réduire le moment de force exercé au poignet et l'activation des muscles du poignet.

CHAPITRE II MÉTHODOLOGIE

2.1 SUJETS

Dix participants ont réalisé cette étude. Ce nombre fût déterminé en fonction du plus grand nombre de conditions présentent par section, soit huit conditions pour la section du toit. Deux sujets supplémentaires ont participé à l'étude de manière à s'assurer qu'un mauvais fonctionnement des appareils ne réduise le nombre de sujet minimal. Les participants ont été sélectionnés de façon aléatoire. Le tableau 2.1 présente les caractéristiques des sujets ainsi que l'écart type et les moyennes du groupe. La moyenne d'âge des participants était de 27 ans. Tandis que les valeurs moyennes du poids et de la taille des sujets étaient de 77,9 Kg (172,2 lb) et de 1,79 m (5 pi 10 po). Les participants devaient être exempts de tout problème musculo-squelettique après avoir complété un questionnaire sur la condition physique.

Tableau 2.1 Les caractéristiques des dix sujets.

Sujets	Âge (an)	Poids (Kg)	Taille (m)
1	22	81,0	1,80
2	24	79,2	1,78
3	23	70,1	1,70
4	31	76,9	1,76
5	27	113,1	1,85
6	50	65,6	1,75
7	27	61,0	1,74
8	22	83,7	1,87
9	20	81,9	1,82
10	25	66,0	1,80
Écart-type	8,7	14,7	0,05
Moyenne	27	77,9	1,79

Enfin, ces participants ont été recrutés sur une base volontaire à l'UQAM et rémunérés selon le taux horaire en vigueur dans l'institution. Ils ont également signé un formulaire de consentement pour les besoins de la recherche. Le certificat d'éthique de cette étude est inséré à l'annexe B. Chaque participant a

reçu une formation sur le fonctionnement et le maniement du pistolet à peinture et a bénéficié d'une période de pratique avec l'outil avant l'expérimentation. Les postures adoptées pour chacune des conditions étaient imposées en fonction des observations réalisées préalablement chez les concessionnaires automobiles (Rouleau et al., 2008 ; Marchand et Giguère, 2010).

2.2 CONDITIONS EXPÉRIMENTALES

La tâche des participants 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 ont été disposés afin de reproduire quatre sections différentes de la carrosserie d'une voiture intermédiaire (toit, capot, section haute et basse d'une portière). La petite surface (45cm X 60cm) fût utilisée pour les conditions de portières basses et hautes, la moyenne surface (60cm X 120cm) pour les conditions de toit tandis que la grande surface (90cm X 110cm) a été utilisée pour les conditions de capot. Il est important de mentionner que, pour la condition de toit uniquement, la grande surface correspondait à la moitié de la dimension réelle de la pièce.

Pour cette pièce, les peintres ne peuvent couvrir la surface en totalité lorsqu'ils sont d'un côté du véhicule. La procédure habituelle d'application de la peinture indique de débiter par le bord pour se diriger vers le milieu du toit. Ensuite, de manière à ne pas abîmer la peinture fraîche, ils passent de l'autre côté du véhicule afin de peindre du milieu jusqu'au rebord. Or, la largeur de la pièce (120 cm) fût préservée tandis que la profondeur fût divisée de moitié (60 cm). La deuxième partie de la tâche (peindre du milieu jusqu'au bord) a été retenue pour les conditions en laboratoire puisqu'elle est la plus susceptible de causer des contraintes plus grandes à l'épaule (amplitude de mouvement importante pour atteindre le centre du toit). Il est à noter que le terme « toit » sera utilisé pour définir la condition et ce, même s'il s'agit en réalité d'un demi-toit.

Les surfaces étaient montées sur un support à hauteur ajustable et inclinable 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) ont été utilisés pour la condition du toit. De même que deux surfaces (sur et sous) et deux inclinaisons (droit et incliné) étaient utilisés pour les conditions du capot. Étant donné la grande superficie de ces deux pièces (toit et capot), chacune des conditions réalisées a tenu compte de la distance (éloignée et rapprochée). Finalement, il y avait deux hauteurs (avec cric pneumatique ou sans) et deux postures (accroupi et debout) pour les conditions de portière haute, tandis que pour la portière basse, il n'y avait qu'une seule position (accroupie). Préalablement à l'expérimentation, les conditions ont été attribuées de façon aléatoire de manière à éviter un effet de fatigue pour une section. Le temps d'exécution pour les sections de toit et de capot était de 40 secondes tandis qu'il était de 20 secondes pour les sections de portières. Afin de prévenir l'accumulation de fatigue au membre supérieur, un repos de 3 minutes fût accordé entre chaque condition. L'expérimentation a duré en moyenne trois heures, en comptant la préparation du sujet, les tests maximaux et les impondérables. La combinaison de ces différents paramètres produisait 18 conditions expérimentales qui sont repartis dans les quatre sections suivantes :

Toit

- Section horizontale du toit, (H) standard, (I) droit, (Pi) standard
- Section horizontale du toit, (H) standard, (I) droit, (Pi) modifié
- Section horizontale du toit, (H) standard, (I) incliné, (Pi) standard
- Section horizontale du toit, (H) standard, (I) incliné, (Pi) modifié
- Section horizontale du toit, (H) modifiée, (I) droit, (Pi) standard
- Section horizontale du toit, (H) modifiée, (I) droit, (Pi) modifié
- Section horizontale du toit, (H) modifiée, (I) incliné, (Pi) standard
- Section horizontale du toit, (H) modifiée, (I) incliné, (Pi) modifié

Capot

- Section horizontale du capot, (S) sur, (I) droit,
- Section horizontale du capot, (S) sur, (I) incliné,
- Section horizontale du capot, (S) sous, (I) droit,
- Section horizontale du capot, (S) sous, (I) incliné,

Avec le pistolet standard

Portière haute

- Section verticale haute du côté, (H) standard, (Po) accroupie,
- Section verticale haute du côté, (H) standard, (Po) debout,
- Section verticale haute du côté, (H) modifiée, (Po) accroupie,
- Section verticale haute du côté, (H) modifiée, (Po) debout,

Avec le pistolet standard

Portière basse

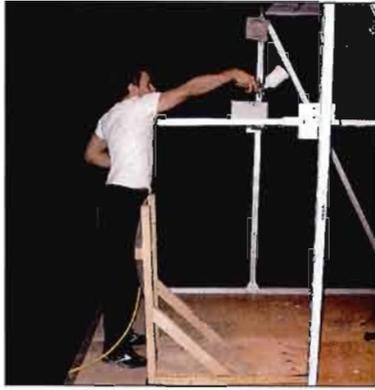
- Section verticale basse du côté, (H) standard,
- Section verticale basse du côté, (H) modifiée,

Avec une position accroupie et le pistolet standard

Légende : (H) hauteur (I) inclinaison (Pi) Pistolet (S) surface (Po) Posture

Pour chacun des sujets, l'ordre des quatre tâches fût déterminé de façon aléatoire. Ainsi, un participant pouvait commencer avec les conditions sur le toit, tandis qu'un autre, avec les conditions de portière haute. De plus, les conditions furent également sélectionnées aléatoirement. La figure 2.1 à 2.4 présentent les positions selon les différentes sections d'un véhicule automobile intermédiaire.

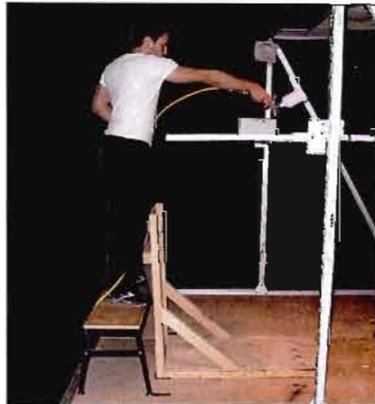
A) Toit, (H) standard, (I) droit.



B) Toit, (H) standard, (I) incliné.



C) Toit, (H) modifiée, (I) droit.



D) Toit, (H) modifiée, (I) incliné.



Figure 2.1 Les conditions de la section horizontale du toit, avec et sans banc, sur un plan droit et incliné

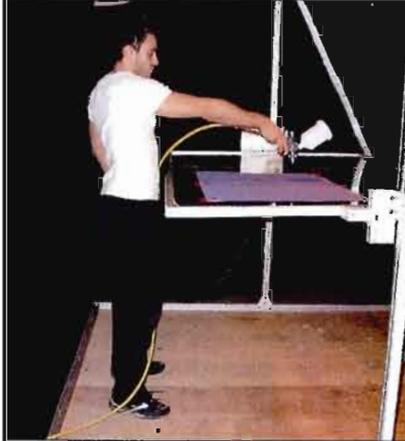
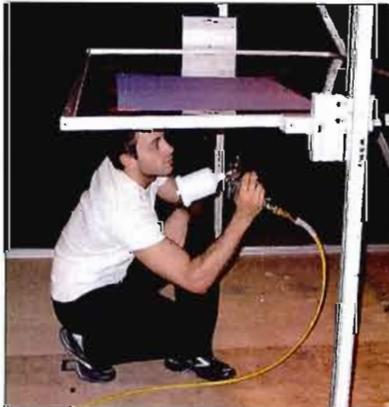
A) Capot, (S) sur, (I) droit.**B) Capot, (S) sur, (I) incliné.****C) Capot, (S) sous, (I) droit.****D) Capot, (S) sous, (I) incliné.**

Figure 2.2 Les conditions de la section horizontale du capot, sur et sous la surface, avec un plan droit et incliné

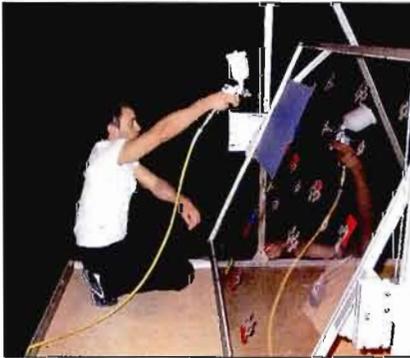
A) Porte haute, (H) standard, (Po) accroupie.



B) Porte haute, (H) standard, (Po) debout.



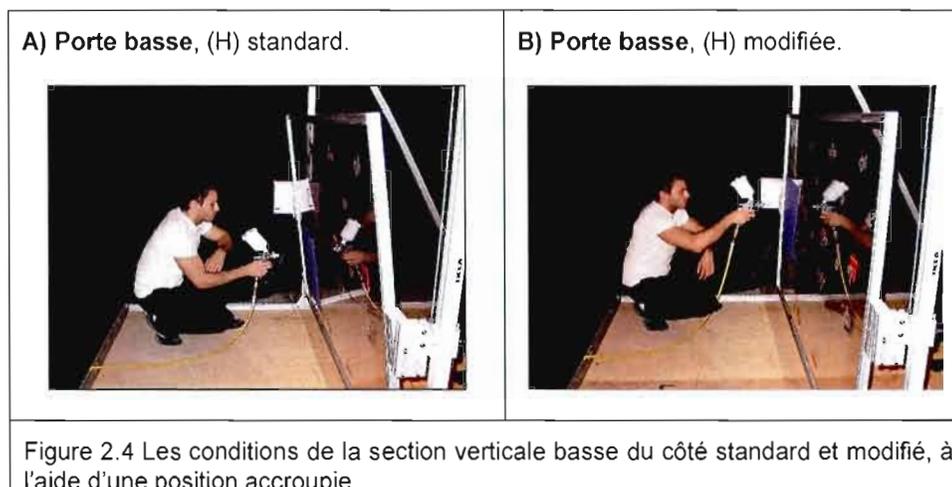
C) Porte haute, (H) modifiée, (Po) accroupie.



D) Porte haute, (H) modifiée, (Po) debout.

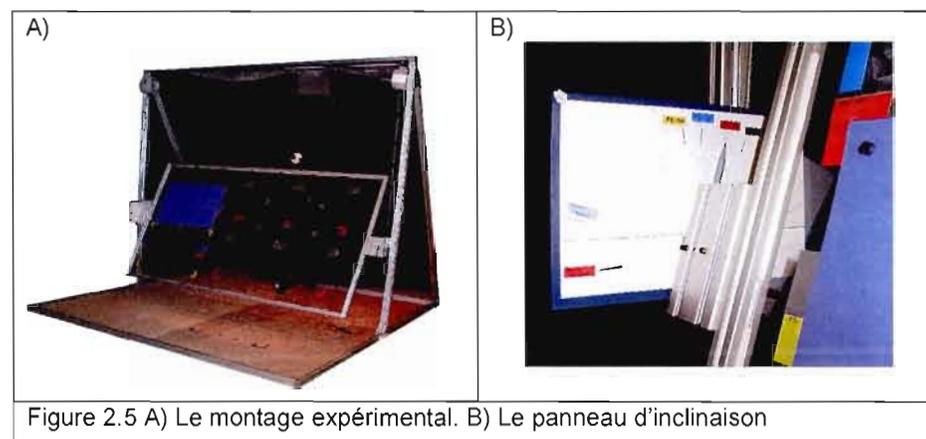


Figure 2.3 Les conditions de la section verticale haute du côté standard et modifié, à l'aide d'une position accroupie et debout



2.3 MONTAGES EXPÉRIMENTAUX

Le montage expérimental a été fabriqué avec des extrudés d'aluminium rigides, du bois et du plexiglas (voir la figure 2.5 A). La base en bois possède une dimension de 2,45m X 2,45m, tout comme la structure métallique centrale.



Sur cette structure est fixé un panneau central amovible de plexiglas qui peut se déplacer verticalement sur deux rails. Une poulie a été installée de chaque côté des colonnes de support afin d'offrir un mécanisme de freinage supplémentaire aux manivelles de serrage. Ce mécanisme a été conçu pour faciliter les déplacements verticaux du grand et lourd panneau central. De plus,

une deuxième manivelle de serrage contrôle l'inclinaison du panneau central qui n'a aucune limitation (rotation de 360°).

2.3.1 MESURES DU MONTAGE

La hauteur, l'inclinaison et les dimensions des surfaces représentant les quatre sections de la carrosserie d'une voiture intermédiaire ont toutes été déterminées à partir d'une Toyota Camry (voir les tableaux 2.2 à 2.4). La taille intermédiaire du véhicule ainsi que sa grande popularité sur la route sont à l'origine du choix de cette référence automobile.

Tableau 2.2 Les mesures des sections horizontales du toit

SECTION HORIZONTALE	CONDITION	HAUTEUR (cm)	INCLINAISON (degrés)	SURFACE (cm)
Toit	droit	146	0,0°	60 x 120
Toit	incliné	146	8,0°	60 x 120

Tableau 2.3 Les mesures des sections horizontales du capot

SECTION HORIZONTALE	CONDITION	HAUTEUR (cm)	INCLINAISON (degrés)	SURFACE (cm)
Capot	droit	110	0,0°	90 x 110
Capot	incliné	110	45,0°	90 x 110

Tableau 2.4 Les mesures des sections verticales basses et hautes du côté

SECTION VERTICALE	CONDITION	HAUTEUR (cm)	INCLINAISON (degrés)	SURFACE (cm)
Basse	Non-modifié	30	-6,6°	45 x 60
Basse	modifié	58	2,2°	45 x 60
Haute	Non-modifié	50	15,0°	45 x 60
Haute	modifié	78	23,8°	45 x 60

* La hauteur correspond au bas de la pièce de carrosserie (surface).

Les conditions modifiées ont eu pour rôle d'optimiser la posture de travail en changeant soit la hauteur ou l'inclinaison de la pièce. Suite à l'observation des postures de travail sur les sections verticales basses et hautes du côté (Rouleau et al., 2008), une solution a été soulevée pour éviter aux peintres de travailler dans une position accroupie. En effet, un cric pneumatique permettrait d'élever la hauteur des pièces (figure 2.6) afin d'avantager le travailleur. Deux de ces

instruments devraient être placés sous la partie rigide du véhicule de manière à élever un seul côté. Ce changement de hauteur provoque, du même coup, une variation de l'inclinaison. Il est important de mentionner que l'utilisation de chandelles est obligatoire puisque le cric pneumatique n'est pas muni d'un système de freinage (sécurité légale).

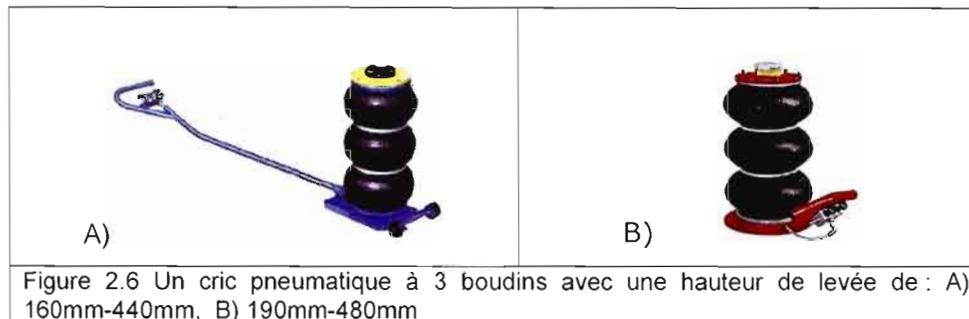


Figure 2.6 Un cric pneumatique à 3 boudins avec une hauteur de levée de : A) 160mm-440mm, B) 190mm-480mm

Le calcul de la hauteur et de l'inclinaison modifiée ont été réalisés à partir de la valeur moyenne du gain (cm) lors de l'extension du cric pneumatique. La valeur utilisée était donc de 28 cm lors de l'optimisation des sections.

De plus, les conditions de toit (avec banc) étaient réalisées à l'aide d'une marche de 42 cm de hauteur (voir la figure 2.7). L'objectif était de surélever le travailleur de manière à réduire l'angle relatif à l'épaule pour les conditions de toit. La hauteur du banc fût déterminée en fonction d'une hauteur moyenne obtenue sur les différents produits offerts sur le marché.

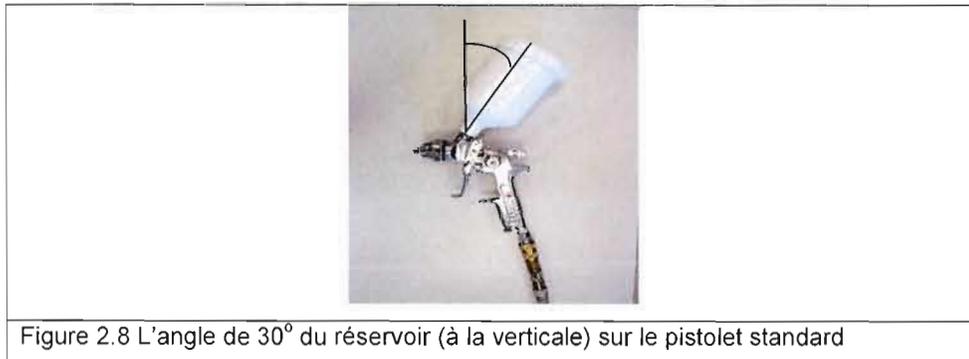


Figure 2.7 Le banc utilisé lors des conditions modifiées du toit (42 cm)

Finalement, pour les conditions du capot, la hauteur a été adaptée comme si la pièce était sur un trépied (110 cm). Compte tenu du travail effectué sous le capot, la hauteur devait être suffisamment grande pour que le travailleur passe en dessous. De plus, l'inclinaison de $45,0^\circ$ pour la condition du capot-incliné, avait été déterminée lors de précédentes observations (Giguère et al., 2007), voir la figure 28B et 28D.

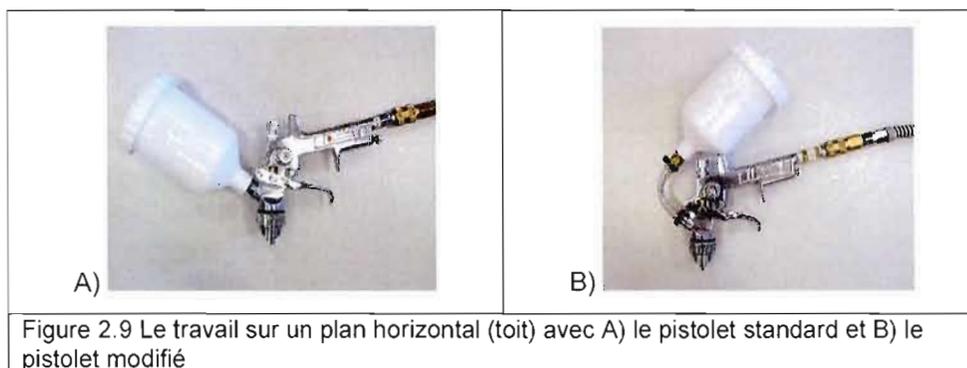
2.4 PISTOLETS À PEINTURE ET COMPRESSEUR À AIR

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 (figure 2.8) fût utilisé pour toutes les conditions expérimentales. À la base, ce pistolet a 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, passe sur le centre de la prise de l'outil.



Cependant, lors d'un travail sur une surface horizontale (toit), le pivot vers l'avant du pistolet standard crée un moment de force. Comme la résistance est déplacée vers l'avant (position du réservoir), le levier augmente pour ainsi produire un moment de force à l'outil de 1,3 Nm (contrairement à 0,3 Nm en

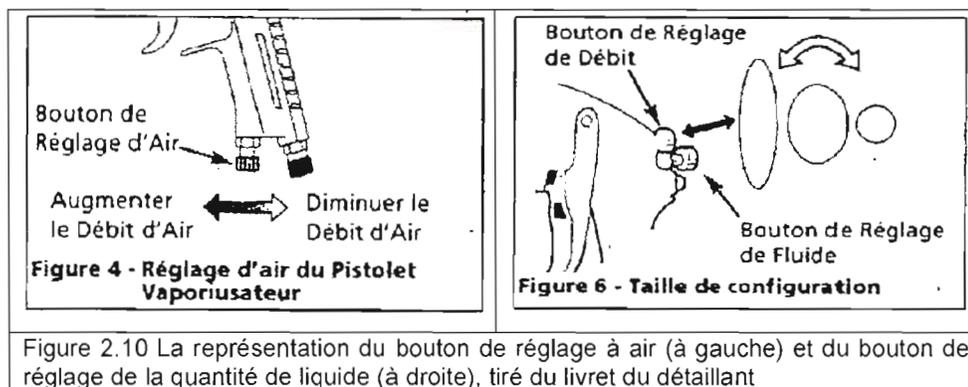
position verticale). Il est à noter que bien que cette valeur paraisse négligeable, le maintien de la charge sur une longue période ainsi que la position de la charge peuvent faire augmenter la contrainte (M_r) à l'articulation. De plus, celui-ci est proportionnel à l'amplitude de la force exercée. Suite à cette constatation, un deuxième pistolet fût modifié dans le but de réduire le moment de force de l'outil pour cette condition particulière. La figure 2.9 présente l'orientation dans laquelle est effectuée la condition horizontale du toit pour les deux pistolets. Compte tenu que l'alimentation du liquide se fait par la gravité, il est avantageux que le réservoir soit le plus à la verticale possible lors de la condition du toit. Or, l'angle à la verticale du réservoir du pistolet standard est de 60° tandis qu'il est seulement de 40° pour le pistolet modifié.



De plus, la disposition du réservoir est plus centralisée sur le pistolet modifié (figure 2.9 B). Le centre de gravité du réservoir est près du centre de la prise de l'outil tandis que ce n'est pas le cas pour le pistolet standard. Également, un outil mieux balancé favorise la diminution de l'activité musculaire des muscles du poignet et des doigts. La conception du pistolet modifié devait servir en grande partie à diminuer le moment de force généré par l'outil, dans cette position, ainsi qu'à diminuer l'activation des muscles responsables du maintien et de la préhension de l'outil.

Les pistolets à peinture étaient alimentés en air par un compresseur (Chicago Pneumatic, QRS 7.5 HP de 60 gallons – 227,2 litres) muni d'un régulateur de pression d'air installé à sa sortie. De cette façon, un débit d'air constant était fourni pour ne pas qu'il y ait de chutes de pression durant les

essais. La pression a été réglée à 40 PSI (lb/in² - livre par pouce carré) sur le compresseur, ce qui est conforme aux recommandations décrites par le détaillant. Également, le bouton de réglage d'air et le bouton de réglage du débit pouvaient modifier la pression à la sortie du pistolet (voir figure 2.10). Afin de conserver la pression désirée, le bouton du réglage de l'air était complètement fermé et celui pour le débit a été légèrement ouvert sur les deux pistolets.



2.5 MESURES

Les mesures qui ont été effectuées durant ce projet ont permis de qualifier et de quantifier les différentes variables sélectionnées.

2.5.1 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 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 et extensions 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 d'une caméra a permis d'enregistrer, en

temps réel, les variations de postures des sujets afin de représenter une période de travail (David, 2005) et ainsi associer les valeurs EMG recueillis aux activités correspondantes. Afin de conserver le même repère anatomique durant toute l'expérimentation, des marqueurs ont été fixés sur le participant. Il s'agit de diodes électroluminescentes (DEL). Afin d'obtenir des angles relatifs aux membres supérieurs, les marqueurs étaient localisées à la hanche (Tubercule majeur), à l'épaule (Trochiter), au coude (épicondyle latéral), au poignet (à la base de l'os semi-lunaire) et sur la jointure du majeur (à la jonction du métacarpe et de la phalange proximale). L'analyse des données cinématiques a été réalisée à l'aide du logiciel MaxTraq. Les résultats ont ainsi été traités afin de permettre une mesure de l'amplitude articulaire à l'épaule et au coude pour une posture.

2.5.2 ANALYSES MUSCULAIRES

Les résultats recueillis à partir de l'EMG permettaient de faire une comparaison des contraintes musculaires pour chacun des muscles. Par la suite, il a été possible d'évaluer le travail des muscles responsables de la préhension et du maintien du pistolet pour les différentes conditions. Les muscles étudiés sont identifiés aux figures 2.11 et 2.12 et définis ci-dessous :

1. **Deltoïde antérieur**, principalement impliqué lors de la flexion et de la flexion horizontale de l'épaule.
2. **Deltoïde médian**, principalement impliqué lors de l'abduction de l'épaule.
3. **Deltoïde postérieur**, principalement impliqué lors de l'extension et de l'extension horizontale de l'épaule.
4. **Trapèze supérieur**, principalement impliqué lors de la flexion de l'épaule par l'élévation de la scapula et de l'abduction de l'épaule par la sonnette externe de la scapula.
5. **Pectoral claviculaire**, principalement impliqué lors de l'adduction et de la rotation interne de l'épaule ainsi que partiellement lors de la flexion de l'épaule.
6. **Grand dorsal**, principalement impliqué lors de l'extension, de l'adduction et de la rotation interne de l'épaule.
7. **Biceps brachial**, principalement impliqué lors de la flexion, l'adduction et l'abduction de l'épaule et la flexion du coude.

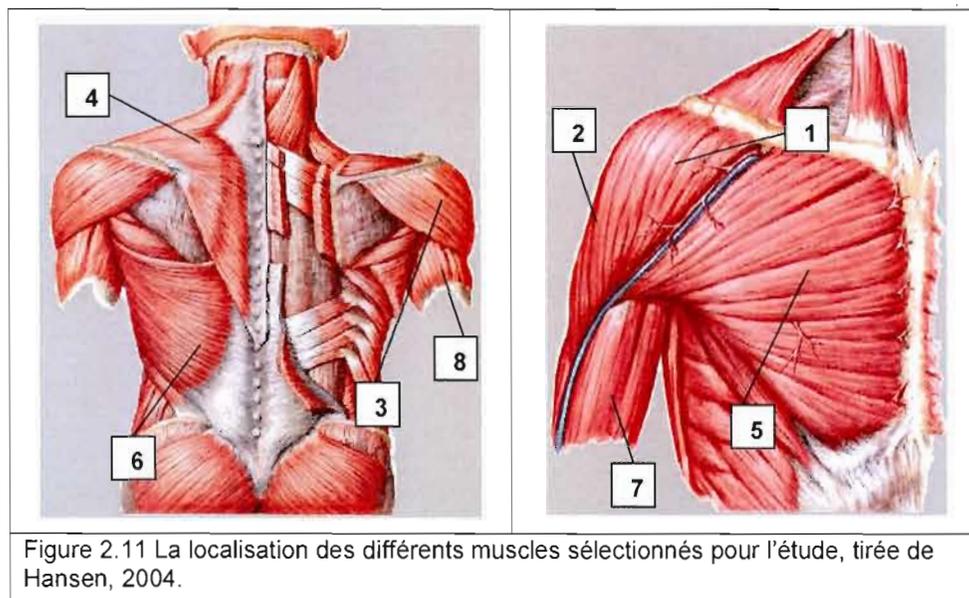
8. Triceps brachial (long chef), principalement impliqué lors de l'extension et l'adduction de l'épaule et l'extension du coude.

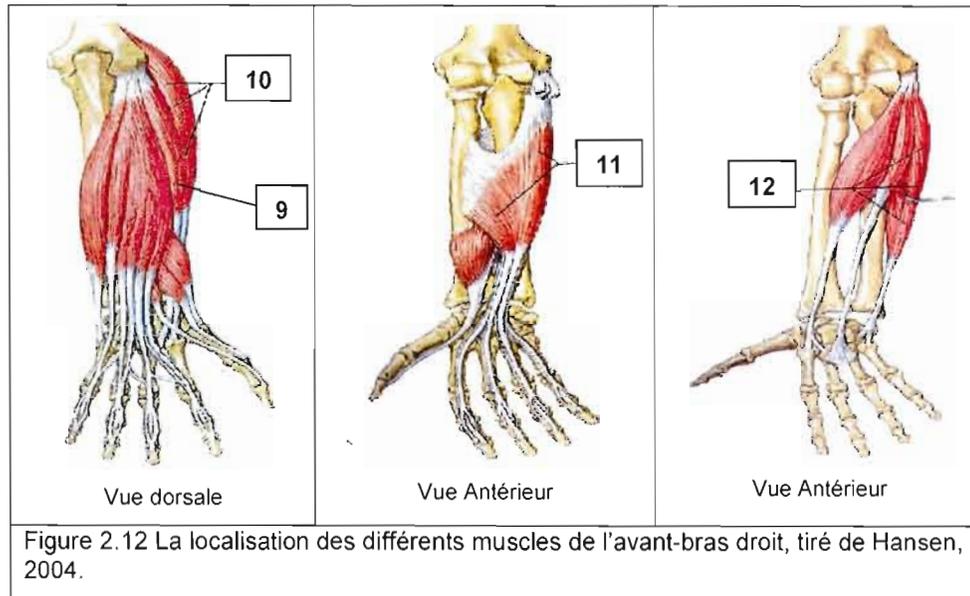
9. Extenseur commun des doigts, principalement impliqué lors l'extension du poignet et des doigts.

10. Premier radial / Long extenseur radial du carpe, principalement impliqué lors de l'extension et de l'abduction du poignet ainsi que de la supination de l'avant-bras.

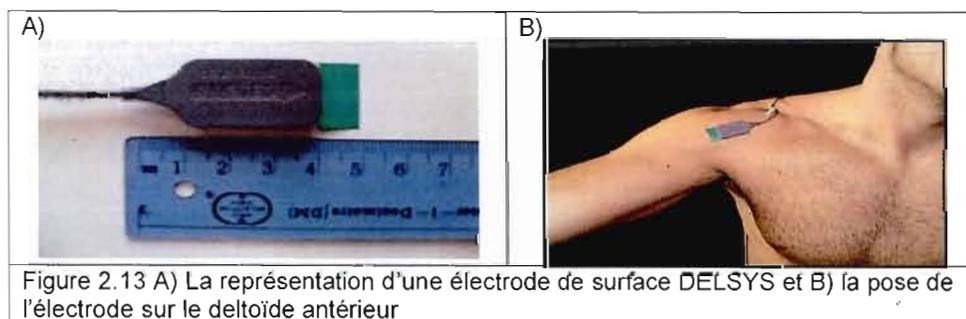
11. Fléchisseurs superficiels des doigts, principalement impliqué lors la flexion du poignet.

12. Cubital antérieur / Fléchisseur ulnaire du carpe, principalement impliqué lors la flexion et de l'adduction du poignet.



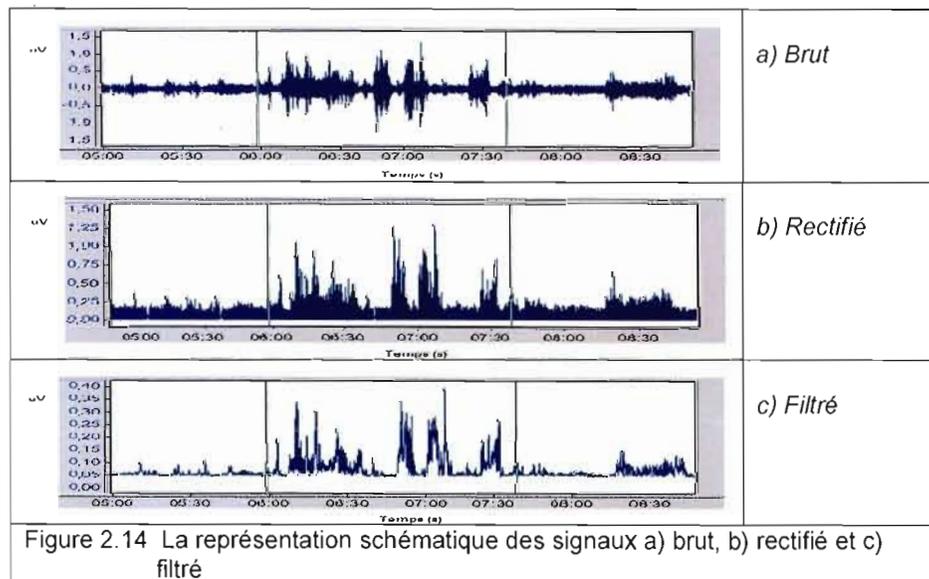


Lors de la préparation du sujet, douze électrodes ont été placés sur le sujet pour recueillir le niveau d'activité électrique produit par les muscles évalués. Au préalable, un gel abrasif a été appliqué sur la peau afin d'enlever les particules pouvant nuire à la transmission des signaux. La peau était ensuite nettoyée à l'aide d'un tampon alcoolisé. Si la pilosité était importante à l'endroit où l'électrode devait être appliquée, celle-ci était enlevée à l'aide d'un rasoir afin d'assurer une meilleure adhérence aux électrodes. Des électrodes de surface préamplifiées Delsys (X 1000) furent placées sur la partie charnue des muscles choisis (figure 2.13).



Les signaux analogiques recueillis par les électrodes ont été acheminés vers un convertisseur analogique/numérique. La fréquence d'échantillonnage a été fixée à 1000 Hz. Selon Bouisset et Maton (1995), la fréquence d'échantillonnage, définie à partir du théorème de Shannon-Nyquist, doit être au minimum égale à deux fois la fréquence maximale choisie pour la définition du spectre. Dans le mode de traitement analogique, le signal devait traverser une bande passante de 20 à 350 Hz (Fabricant Delsys, 2010) de manière à laisser passer que les fréquences comprises entre ces deux valeurs provenant du signal brut. Cette bande passante, recommandée par le fabricant représente la fréquence à l'EMG de surface chez l'humain (Basmajian et DeLuca, 1985).

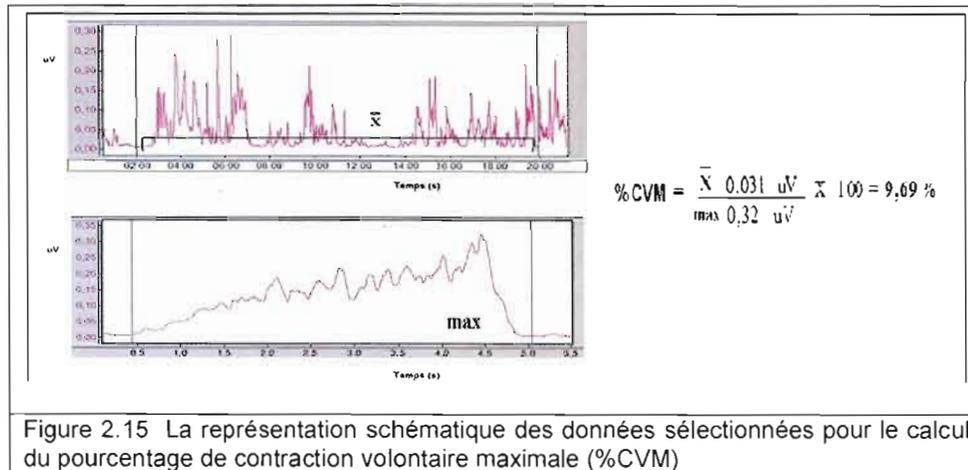
Au début de chaque séance d'enregistrement, l'état brut des différents signaux était recueilli dans le but de calibrer l'amplitude des signaux. Les signaux ont été traités avec le logiciel « DasyLab ». À l'aide de ce logiciel, les signaux EMG ont été rectifiés et filtrés après qu'ils aient été enregistrés, tel que présenté à la figure 2.14.



Le deuxième filtre utilisé (low pass – Butterworth) fût réglée à une fréquence de 4 Hz. Le filtre à 4 Hz est celui qui a permis de tracer le mieux l'enveloppe linéaire du signal. Les valeurs EMG furent ensuite transformées en pourcentage de la contraction volontaire maximale (%CVM).

L'équation suivante présente la formule qui a été utilisé (et la figure 2.15) :

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



À la fin de chaque expérimentation, chaque sujet devait effectuer des contractions musculaires isométriques maximales (CVM) de chaque muscle évalué pour être en mesure de transformer les valeurs d'EMG (volt) en %CVM (tel que vu à la figure 2.15). Le test d'effort maximal consistait en un effort statique d'environ 3 à 5 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. La réalisation des tests CVM n'avaient pas comme objectif de prédire la tension musculaire, mais bien d'exprimer le niveau d'activation myoélectrique maximal du muscle évalué. Le tableau 2.5 présente les positions statiques adoptées lors du test maximal pour chacun des muscles.

Les tests de CVM ont été effectués à la fin de l'expérimentation afin de diminuer les risques d'accumulation de fatigue pour le début de l'expérimentation. L'effet de la fatigue musculaire n'est pas considéré dans cette

étude due à la passation aléatoire des conditions pour chaque sujet. Cette variable est donc négligeable puisque l'effet de la fatigue est dissipé parmi la variation de l'ordre des conditions.

Tableau 2.5 Les postures adoptées lors de la contraction isométrique volontaire maximale pour les douze muscles

Muscles	Postures lors de CVM isométrique
<i>Deltoïde antérieur</i>	Flexion de l'épaule à 45 degrés
<i>Deltoïde médian</i>	Abduction de l'épaule à 45 degrés
<i>Deltoïde postérieur</i>	Extension horizontal de l'épaule avec le coude fléchi à 90 degrés
<i>Trapèze supérieur</i>	Abduction de l'épaule à 45 degrés
<i>Pectoral claviculaire</i>	Adduction et rotation interne de l'épaule contre une porte fixe
<i>Grand dorsal</i>	Extension et adduction de l'épaule avec le coude parallèle à l'épaule et fléchi à 90 degrés
<i>Biceps brachial</i>	Flexion du coude à 90 degrés
<i>Triceps brachial</i>	Extension du coude à 90 degrés
<i>Extenseurs communs des doigts</i>	Extension du poignet avec l'avant-bras et le coude en appui
<i>Premier radial</i>	
<i>Fléchisseurs superficiels des doigts</i>	
<i>Cubital antérieur</i>	Flexion du poignet avec l'avant-bras et le coude en appui

2.6 PERCEPTION DE L'EFFORT

Immédiatement après chaque essai, les sujets devaient évaluer le niveau d'effort ressenti sur une échelle de Borg modifiée de 1 à 10 (voir le tableau 2.6). Cette échelle était placée à la vue du participant de manière à mentionner à l'expérimentateur le résultat retenu. Précédemment, une échelle de perception de la douleur pour les membres supérieurs avait également été utilisée lors d'une autre étude sur l'utilisation de pistolets de peinture (Lee et al., 1997). Or, comme le mentionne Stuart-Buttle (1994), la douleur et l'inconfort sont les indicateurs naturels du corps. Les sujets expérimentaux étaient donc en mesure de bien évaluer la condition à partir de leur perception subjective de l'effort. Donc, dans les 5 secondes qui suivait la réalisation d'une condition expérimentale, les sujets devaient identifier leur niveau d'effort en répondant à la consigne : « Sur une échelle de 1 à 10, un niveau de 1 correspond à un repos total et un niveau de 10 à une situation où vous êtes incapable de terminer l'application du liquide sur la

surface, quel est votre perception de l'effort de l'épaule droite pour cette condition ? »

Tableau 2.6 Panonceau de l'échelle de Borg modifiée pour la quantification de l'effort physique

Pour moi, l'effort physique à l'épaule droite lors de cette condition expérimentale est :	
COTE	QUALITATIF
1	EXTRÊMEMENT FACILE
2	TRÈS TRÈS FACILE
3	TRÈS FACILE
4	FACILE
5	MODÉRÉ
6	UN PEU DIFFICILE
7	DIFFICILE
8	TRÈS DIFFICILE
9	TRÈS TRÈS DIFFICILE
10	EXTRÊMEMENT DIFFICILE

2.7 ANALYSE STATISTIQUE

Une analyse statistique fût effectuée afin de traiter les données expérimentales. Les analyses statistiques ont été effectuées suivant un schéma de mesures répétées où chaque sujet était son propre contrôle. Les effets simples et leurs interactions étaient évalués avec un test « t » bilatéral de Student, avec le progiciel statistique SAS (9.2). Chaque section fût analysée indépendamment des autres. Pour toutes ces analyses statistiques, un niveau de confiance de 95% ($p < 0,05$) a été retenu afin d'identifier les effets significatifs. Les figures des résultats ont été réalisées à l'aide du logiciel Statgraphic (version 4).

2.8 LES LIMITES

Cette étude considère uniquement les conséquences biomécaniques pour les membres supérieurs. Or, les problèmes au dos sont les plus communs rapportés parmi les travailleurs en mécanique automobile et considérés comme les symptômes les plus problématiques au travail (Torp et al., 1996).

L'ajustement postural du travailleur est souvent réalisé par un mouvement du tronc afin de faciliter l'atteinte à une pièce ou une surface. Toutefois, de mauvaises postures peuvent être utilisées au même titre que pour les membres supérieurs. Riihimäki (1991) démontre une association entre les blessures au bas du dos et le travail en rotation du tronc, en flexion du tronc ou toute autre posture non-neutre du tronc. De plus, pour les peintres de carrosserie automobile, le travail statique en position debout représente un grand pourcentage du travail effectué dans une journée (Marchand et al., 2010). Or, des études mentionnent que les travailleurs qui travaillent debout sur des périodes prolongées ont un plus grand risque de développer des symptômes au dos que les travailleurs qui peuvent varier d'une position assise à debout (Magora, 1972. Couture, 1986. Ryan, 1989). Bien que le dos soit grandement impliqué dans le travail de peintre, lorsque la zone d'atteinte est éloignée, nous n'avons pas inclut cette composante dans l'étude.

À priori, les angles à l'articulation du poignet devaient être considérés lors de l'analyse cinématique. Toutefois, les mouvements variés du poignet ont causé une difficulté supplémentaire au niveau de l'analyse cinématique, avec le logiciel MaxTraq, puisque les marqueurs ne restaient pas dans un seul plan (plan sagittal). Donc, l'angle au poignet n'a pu être déterminé pour les diverses conditions compte tenu du manque de précision des marqueurs sur la bande vidéo.

Pour terminer, la fatigue musculaire n'a pas été considérée dans ce projet, bien qu'elle puisse apparaître lors d'une journée de travail standard d'un peintre. En faite, la fatigue musculaire se définit comme étant une diminution des capacités à performer lors d'actions physiques (Friedman et al. 2007; Hacker & Ferrans, 2007). Également, elle peut être décrite comme une diminution graduelle de la capacité musculaire lors d'une activité maintenue. Elle est mesurée par la réduction de la force d'un muscle, un changement dans l'activité EMG ou lors d'un épuisement d'une fonction contractile (Enoka et Duchateau, 2008). Nous avons donc éliminé l'effet de la fatigue musculaire possible en présentant aléatoirement les différentes conditions expérimentales d'un sujet à l'autre.

CHAPITRE III

PRÉSENTATION ET INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

La section suivante présente les résultats obtenus pour les trois variables dépendantes évaluées dans cette étude. Le pourcentage de la contraction volontaire maximale, les mesures angulaires et les cotes psychophysiques seront présentés selon quatre sections distinctes, soit : la section basse de la portière, la section haute de la portière, la section du capot et la section du toit. L'analyse de ces sections fût indépendante les unes des autres due à l'orientation divergente des plans de travail (plan vertical ou horizontal) ainsi que par la différence des variables indépendantes. Il est à noter que tous les résultats traités dans cette section proviennent des muscles du côté droit (dominant) de chacun des sujets.

Le % CVM permet de quantifier le niveau de sollicitation des muscles pour chacune des conditions évaluées. La valeur obtenue permet alors d'évaluer la contrainte associée à la charge de travail déployée. Or, lorsqu'il y a présence de charge statique, Bjöksten et Jonsson (1977) ont déterminé que les niveaux sécuritaires étaient de 10% (CVM). Dans le même sens, Sjogaard et al. (1988) reprennent cette affirmation en indiquant qu'un % CVM plus grand que 10% est problématique. À ce moment, il est primordial de modifier le travail afin d'éviter les risques de blessures.

Un code de couleur est utilisé dans les tableaux qui suivent afin de faciliter la classification des valeurs de % CVM. Une contraction inférieure à 5% correspond à une zone optimale, de 5% à 10% à une zone acceptable et supérieure à 10% à une zone problématique. Ces trois zones sont représentées respectivement par les couleurs vert, jaune et rouge. De plus, les effets simples et leurs interactions sont identifiés dans ces tableaux. Afin d'identifier les effets significatifs, un astérisque (*) a été utilisé pour exprimer un niveau de confiance de 95% ($p < 0,05$).

De plus, la section présente les résultats des angles à l'épaule et au coude obtenus à partir de l'amplitude de mouvement de ces deux articulations pour les quatre sections mentionnées précédemment : la section basse de la portière, la

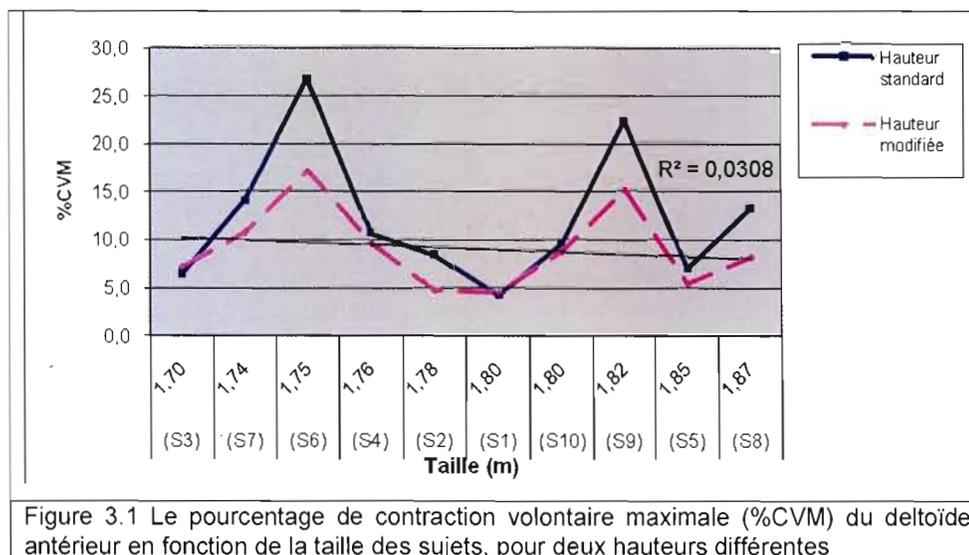
section haute de la portière, la section du capot et la section du toit. Pour les sections basses et hautes de la portière, les valeurs moyennes des angles à l'articulation représente l'amplitude articulaire maximale moyenne calculée chez tous les participants. Tandis que les valeurs moyennes sont divisées en deux catégories pour la section du capot et du toit, soit l'amplitude articulaire maximale pour la zone rapprochée et éloignée. Or, ces valeurs moyennes représentent uniquement de l'angle de flexion et d'extension de l'articulation. L'analyse de ces sections fût indépendante les unes des autres due à la variation des positions de travail et à l'orientation divergente des plans de travail (plan vertical ou horizontal). Il est à noter que tous les résultats traités dans cette section proviennent de la position du membre supérieur droit, de chacun des sujets. De plus, les angles à l'articulation du poignet n'ont pas été comptabilisés à cause de la grande mobilité de cette articulation durant les conditions. En effet, lors de l'analyse, nous avons constaté que les marqueurs lumineux ne respectaient pas le plan de la caméra. Or, le calcul des angles auraient été erronés puisque la position du poignet variait dans plusieurs plans au cours du mouvement. L'analyse des angles au poignet a donc été exclue des résultats.

Dans cette section, les angles absolus et les angles relatifs sont présentés pour une même condition. L'angle absolu, qui représente l'angle entre le segment et une référence externe, a été calculé en fonction de la droite verticale vers le bas. Il sera utilisé pour représenter le moment de force à l'articulation. Pour ce qui est de l'angle relatif, qui représente l'angle pour une articulation entre deux segments, il correspond à l'angle interne.

3.1 La taille des sujets

Les participants choisis pour l'étude présentaient tous une taille différente. Or, la grandeur des sujets n'a pas été prise en considération lors de la modification de la hauteur, pour les conditions de toit. En effet, la marche ajoutée représentait un gain de même hauteur, soit de 42 cm. Les résultats obtenus du %CVM du deltoïde antérieur droit ont été utilisés afin de démontrer s'il y avait une relation entre la taille des sujets et le %CVM, pour un changement de hauteur fixé. Lors de l'abaissement d'un plan de travail (lorsque le travailleur monte sur la

marche, figure 2.1 C), l'amplitude articulaire de l'épaule diminue. Le deltoïde antérieur, qui est un fléchisseur de l'épaule, voit alors son activation baisser. Le muscle est donc le mieux placé pour exprimer s'il y a présence d'une corrélation entre le niveau de sollicitation musculaire et la taille des sujets pour une même hauteur. La figure 3.1 présente la sollicitation musculaire du deltoïde antérieur pour une hauteur déterminée selon la distribution croissante de la taille des sujets.



Dans les deux cas, les droites de régression équivalent presque à zéro et ne constituent pas une corrélation fiable. Le choix diversifié de la taille des sujets est alors justifié puisque le %CVM est unique à chacun selon la capacité musculaire du sujet.

3.2 La section basse de la portière (plan vertical)

3.2.1 Le pourcentage de la contraction volontaire maximale

Les conditions sur la section basse de la portière étaient toutes réalisées avec une posture accroupie. La hauteur fût modifiée afin d'éliminer la pente négative (inclinaison de la surface) que présentait la section basse de la portière pour une hauteur standard. En élevant la voiture d'un seul côté, l'inclinaison de la

section basse changeait en fonction de la hauteur. La hauteur modifiée (58 cm du sol) présentait une pente positive de $2,2^\circ$ tandis que la hauteur standard (30 cm du sol) avait une pente négative de $-6,7^\circ$. Le tableau 3.1 présente les valeurs moyennes de % CVM obtenues pour chacun des muscles ainsi que l'effet significatif principal. Cinq muscles présentent un effet significatif soit, le deltoïde antérieur, le deltoïde médian, le deltoïde postérieur, le grand dorsal et le triceps. Dans ce cas, la probabilité indique donc que la variable hauteur produit une différence sur le niveau de sollicitation pour un même muscle.

Tableau 3.1 Les valeurs moyennes du pourcentage de la contraction volontaire maximale (% CVM) des conditions de la section basse de la portière selon la hauteur standard et la hauteur modifiée, pour chacun des muscles, ainsi que l'effet significatif principal

Muscles	Hauteurs		Probabilité (p)
	standard	modifiée	
Deltoïde antérieur	7,06	10,29	*
Deltoïde median	3,87	6,99	*
Deltoïde postérieur	1,31	2,21	*
Trapèze supérieur	8,40	13,48	
Grand pectoral	2,52	2,58	
Grand dorsal	1,86	2,37	*
Biceps brachial	4,25	4,39	
Triceps brachial	1,70	2,48	*
Extenseurs communs des doigts	9,93	10,60	
Premier radial	8,94	9,87	
Fléchisseurs superficiels des doigts	4,44	4,07	
Cubital antérieur	5,32	5,15	

Légende : * si $p < 0,05$

Pour les trois portions du deltoïde (antérieur, médian et postérieur), l'implication de ces muscles à l'épaule sont directement influencés par le changement de la hauteur d'une surface. La hauteur modifiée a pour conséquence d'augmenter l'angle relatif à l'épaule lorsque le bras est maintenu plus haut (voir tableau 3.2). Le muscle principalement responsable de la flexion de l'épaule, le deltoïde antérieur, obtient une valeur élevée de 10,29 % pour la

condition de hauteur modifiée (tableau 3.1). Quant à eux, pour la même condition, le deltoïde médian et le deltoïde postérieur obtiennent des valeurs plus basses puisqu'ils interviennent majoritairement en support pour stabiliser le bras en suspension. Toutefois, les résultats obtenus pour ces trois muscles sont plus élevés lors d'un travail effectué sur une hauteur modifiée que pour celui à la hauteur standard. Les muscles de l'épaule ne sont donc pas avantagés pour une hauteur modifiée.

Le grand dorsal présente, lui aussi, un effet significatif lors d'un travail sur la section basse d'une portière. Puisqu'il participe à la phase d'extension de l'épaule et à la stabilisation du bras, ce muscle favorise le contrôle du mouvement lors de l'application de la peinture.

De plus, le triceps est également activé lors de la phase d'extension à l'épaule et au coude. La position du membre supérieur adoptée par le travailleur, pour une hauteur modifiée, oblige une extension presque complète du coude afin d'atteindre la surface étant donné la position accroupie du bas du corps (voir tableau 3.2). L'implication de ce muscle devient alors plus grande et présente ainsi un effet significatif pour cette condition.

Finalement, la condition de hauteur modifiée présente des valeurs de % CVM plus grandes que pour la hauteur standard pour tous les muscles, à l'exception des fléchisseurs superficiels des doigts et du cubital antérieur. Le tableau 3.1 démontre que la hauteur modifiée est nuisible au trapèze supérieur puisqu'elle favorise l'augmentation musculaire, passant ainsi à une zone problématique (13,48%). En outre, les muscles extenseurs et fléchisseurs du poignet n'ont présenté aucun effet significatif lors de l'analyse. Ils ne seraient donc pas influencés par la modification de la hauteur de la section. Cette invariabilité des résultats pourraient être expliquée par le changement de l'inclinaison du poignet lors des deux conditions. Il ne faut cependant pas négliger le travail des extenseurs du poignet qui participent activement au maintien du pistolet.

3.2.2 Les angles absolus et relatifs

Pour les conditions de portière basse, la modification de la hauteur n'est pas avantageuse selon les résultats de l'angle absolu à l'épaule. En effet, l'amplitude à l'épaule est augmentée lorsque la section subie une élévation, tel que l'indique le tableau 3.2. De plus, l'angle relatif au coude est plus grand pour une hauteur modifiée (104.2°) comparativement à la hauteur standard (90.5°).

Tableau 3.2 Les valeurs moyennes des angles à l'épaule et au coude et les effets significatifs pour les conditions de la section basse de la portière

Angles	Hauteurs		
	standard	modifiée	p
Absolu Épaule	14,3	48,3	*
Absolu Coude	103,6	124,6	*
Relatif Épaule	37,6	58,8	*
Relatif Coude	90,5	104,2	*
Légende : * si $p < 0,05$			

Cela revient à dire que l'élévation de la section occasionne une extension au coude. Le muscle responsable de ce mouvement, le triceps, est étiré et doit fournir un effort plus grand pour générer autant de force afin de maintenir la posture. La condition de hauteur modifiée avait pour objectif de réduire les contraintes au poignet. Toutefois, elle occasionne des désavantages aux articulations de l'épaule et du coude. En plus, les valeurs du %CVM au poignet n'ont démontrés aucun effet significatif concernant la variation de la hauteur.

3.2.3 Les cotes psychophysiques

Les valeurs moyennes des cotes psychophysiques de la section basse de la portière ne présentent aucun effet significatif principal. Les valeurs varient entre 2,9 et 3,9 sur un total de 10, pour les trois régions anatomiques (épaule, avant-bras et poignet). Ces résultats représentent un travail « très facile » selon l'échelle de Borg modifié.

3.3 La section haute de la portière (plan vertical)

3.3.1 Le pourcentage de la contraction volontaire maximale (%CVM)

Les conditions sur la section haute de la portière ont été réalisées selon des conditions de hauteurs (standard et modifiée) et de postures (accroupie et debout). La hauteur fût modifiée afin d'optimiser les conditions de postures debout puisqu'elles sont davantage utilisées par les travailleurs pour cette section haute. Tout comme la section basse, l'élévation de la hauteur par un système de levage provoque, du même coup, une variation au niveau de l'inclinaison de la section. La hauteur modifiée (103 cm du sol) présentait une pente positive de 23,8° tandis que la hauteur standard (75 cm du sol) avait une pente positive de 15,0°. Quant à elles, les postures accroupies (sans genou au sol) et debout représentent les options adoptés au travail par les peintres de carrosserie automobile. Les résultats analysés ont été regroupés dans le tableau 3.3 qui présente les valeurs moyennes de % CVM obtenues pour les différentes conditions de hauteurs et de postures de chacun des muscles ainsi que l'effet significatif principal.

Pour les conditions de hauteurs, sept muscles présentent un effet significatif soit, le deltoïde antérieur, le deltoïde médian, le deltoïde postérieur, le trapèze supérieur, le grand dorsal, le triceps et le cubital antérieur. Tandis que pour les conditions de postures, huit muscles présentent un effet significatif soit, le deltoïde antérieur, le deltoïde médian, le deltoïde postérieur, le trapèze supérieur, le triceps, les extenseurs communs des doigts, le premier radial et le cubital antérieur.

Tableau 3.3 Les valeurs moyennes du pourcentage de la contraction volontaire maximale (% CVM) des conditions de la section haute de la portière selon la hauteur (standard - modifiée) et la posture (accroupie – debout), pour chacun des muscles, ainsi que l'effet significatif principal.

Muscles	Hauteurs			Postures		
	standard	modifiée	p	accroupie	debout	p
Deltoïde antérieur	7,27	9,20	*	10,93	5,55	*
Deltoïde median	4,67	8,33	*	9,91	3,08	*
Deltoïde postérieur	1,74	2,77	*	3,44	1,06	*
Trapèze supérieur	10,12	13,86	*	17,24	6,73	*
Grand pectoral	2,16	2,34		2,25	2,25	
Grand dorsal	1,98	2,20	*	2,72	1,46	
Biceps brachial	3,80	4,63		4,32	4,11	
Triceps	2,12	3,69	*	4,22	1,58	*
Extenseurs communs des doigts	10,59	10,42		11,74	9,27	*
Premier radial	9,46	10,43		10,87	9,03	*
Fléchisseurs superficiels des doigts	4,04	4,05		4,14	3,95	
Cubital antérieur	4,62	5,16	*	5,29	4,49	*

Légende : * si $p < 0,05$

Les trois muscles à l'épaule (deltoïde antérieur, médian et postérieur) sont encore une fois influencés par la variation de l'angle relatif à l'épaule (voir le tableau 3.6). La hauteur modifiée augmente cet angle relatif, ce qui provoque l'élévation du niveau de sollicitation musculaire. De plus, la posture accroupie augmente également l'amplitude à l'épaule, favorisant ainsi une surcharge de ces muscles pour une telle posture.

Le trapèze supérieur présente des résultats supérieurs à une charge de 10% (zone inacceptable de travail) pour chacune des hauteurs. La condition de hauteurs provoque une grande implication du trapèze supérieur tandis que la condition de postures favorise une diminution de son utilisation musculaire. Effectivement, la posture debout permet de réduire du tiers l'utilisation du trapèze

supérieur qui est impliqué lors de l'élévation de la scapula, tel que vu pour une position accroupie (figure 2.3 C).

Pour ce qui est du grand dorsal et du triceps, ils agissent de la même façon que décrite pour la section basse de la portière. Leurs résultats de %CVM se situent dans une zone optimale recherchée afin d'éviter que les travailleurs soient exposés à des risques de blessures.

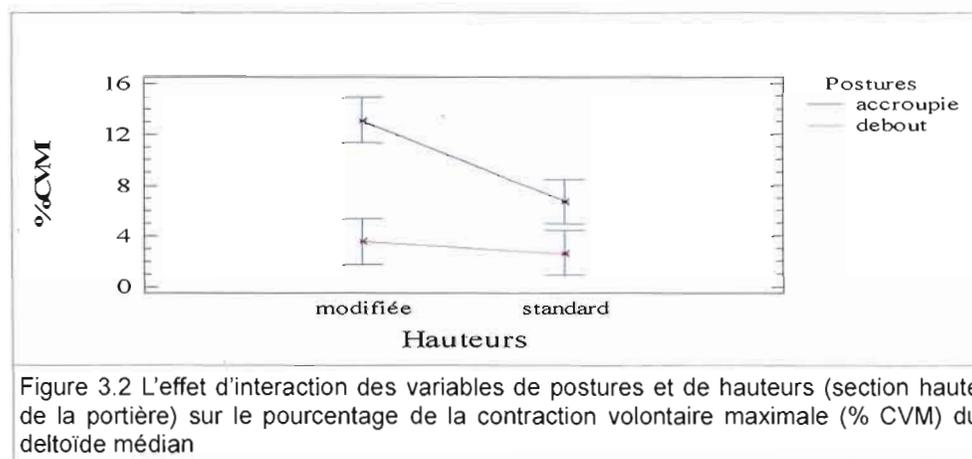
De plus, même si les extenseurs du poignet et des doigts ne présentent aucun effet significatif pour les conditions de hauteurs, les valeurs de %CVM sont très élevées. Ces résultats indiquent que la charge statique provoque une surcharge sur les muscles responsables du maintien du pistolet. Cependant, l'effet est significatif pour les conditions de postures, où les valeurs sont plus grandes pour la posture accroupie. Dans cette position, le poignet est placé en extension en plus de faire une déviation ulnaire de grande amplitude. Ceci peut donc expliquer un recrutement plus élevé des fibres musculaires.

Le cubital antérieur, qui présente un effet significatif pour les deux conditions, voit ses résultats varier différemment entre les sujets de l'échantillon. Bien que les valeurs se situent dans une zone optimale ou acceptable, le travail de ce muscle responsable de la déviation ulnaire au poignet est relativement élevée lors des diverses conditions.

La condition de hauteur modifiée présente des valeurs de % CVM plus élevées que pour la hauteur standard pour tous les muscles, à l'exception des extenseurs communs des doigts. De son côté, la condition de postures obtient des valeurs de % CVM les plus élevées pour la posture accroupie comparativement à la posture debout, et ce pour tous les muscles, sauf le grand pectoral. Les résultats démontrent donc que la posture debout, pour une hauteur standard de portière haute, est la condition la moins coûteuse pour tous les muscles chez les sujets.

3.3.1.1 Les interactions

Afin d'observer l'effet d'interactions possibles, la condition de hauteurs et la condition de postures 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. La figure 3.2, les %CVM du deltoïde médian, permettent de bien représenter cette interaction.



Il y a une interaction significative lorsque les deux droites présentent un croisement ou une absence de parallélisme. Dans cette figure, il y a un effet de la hauteur sur la posture. Donc, les résultats pour les différentes postures sont influencés par la hauteur modifiée, pour le deltoïde médian.

Le tableau 3.4 présente les effets d'interactions significatifs entre les valeurs moyennes du %CVM pour les conditions de hauteurs et de postures. Cinq muscles obtiennent un effet d'interaction significatif, soit le deltoïde médian, le deltoïde postérieur, le grand pectoral, le grand dorsal et le triceps. Les figures des muscles avec effets d'interactions significatifs sont placées en annexe.

Tableau 3.4 Les effets d'interactions significatifs entre les valeurs moyennes du pourcentage de la contraction volontaire maximale (% CVM) des conditions de la section haute de la portière selon la hauteur et la posture, pour chacun des muscles

Muscles	Hauteur – Posture (p)
Deltoïde antérieur	
Deltoïde médian	*
Deltoïde postérieur	*
Trapèze supérieur	
Grand pectoral	*
Grand dorsal	*
Biceps brachial	
Triceps	*
Extenseurs communs des doigts	
Premier radial	
Fléchisseurs superficiels des doigts	
Cubital antérieur	
Légende : * si $p < 0,05$	

Ces cinq muscles sont donc influencés par l'une des deux variables (hauteur vs posture). Une analyse des effets simples (tests post-hoc) sur chacune des variables a permis de déterminer laquelle est significative. Le tableau 3.5 présente ces effets d'interactions spécifiques.

Tableau 3.5 Les effets d'interactions significatifs spécifiques entre les valeurs moyennes du pourcentage de la contraction volontaire maximale (% CVM) des conditions de la section haute de la portière selon la hauteur et la posture, pour chacun des muscles significatifs

Muscles	Hauteurs	Postures		
		accroupie	debout	(p < 0,05)
Deltoïde médian	standard	6,7	2,6	*
	modifiée	13,1	3,5	*
	(p < 0,05)	*		
Deltoïde postérieur	standard	2,5	1,0	*
	modifiée	4,4	1,1	*
	(p < 0,05)	*		
Grand pectoral	standard	2,5	1,8	
	modifiée	2,0	2,7	
	(p < 0,05)		*	
Grand dorsal	standard	2,4	1,5	*
	modifiée	3,0	1,4	
	(p < 0,05)	*		
Triceps	standard	2,8	1,4	*
	modifiée	5,6	1,8	*
	(p < 0,05)	*		

Pour le deltoïde médian, la posture accroupie jumelée à la hauteur modifiée présentent la condition ayant un coût musculaire le plus élevé. Cette situation est la plus désavantageuse pour le travailleur. Or, la position accroupie influence les valeurs de %CVM pour les différentes hauteurs. De même que chacune des hauteurs fait varier les valeurs associées à la posture. Pour une hauteur standard (30 cm du sol), la position debout est plus avantageuse en termes de coût musculaire du membre supérieur puisque l'angle relatif à l'épaule est plus petit que celui en position accroupie (voir le tableau 3.6). Pour une hauteur modifiée (58 cm du sol), la même logique est respectée par rapport aux postures. Les mêmes effets significatifs sont présents sur le deltoïde postérieur. Ce muscle, qui sert à stabiliser l'épaule lors du maintien du pistolet, voit son coût musculaire augmenter lors des conditions de postures accroupies.

Le grand pectoral, quant à lui, présente seulement un effet d'interaction significative entre la posture debout et les conditions de hauteurs. Les différentes hauteurs font varier l'angle relatif à l'épaule. De ce fait, le grand pectoral, qui est sollicité lors du mouvement de l'épaule, est influencé. Ce muscle montre des valeurs de %CVM plus élevées lors de la position accroupie. Dans cette position, le membre supérieur est tendu vers l'avant, donc le muscle (grand dorsal) est étiré. Le travail de stabilisation augmente aussi le coût musculaire. La position accroupie influence donc les résultats tout dépendant de l'angle relatif à l'épaule (voir le tableau 3.6). Finalement, le triceps brachial présente les mêmes effets d'interactions significatives que le deltoïde médian et postérieur. La position accroupie avec une hauteur modifiée présente la valeur du %CVM la plus élevée puisque le coude est en extension complète lors de cette position. Le muscle extenseur du coude est alors plus sollicité que pour une posture debout, où le coude est en flexion (voir le tableau 3.6).

3.3.2 Les angles absolus et relatifs

Pour la portière haute, la hauteur standard est favorisée avec des résultats d'angles plus faibles que la condition de hauteur modifiée, comme le montre le tableau 3.6. Les quatre catégories d'angles du tableau présentent un effet significatif pour la variable de la hauteur de même que pour la variable de postures.

Tableau 3.6 Les valeurs moyennes des angles à l'épaule et au coude et les effets significatifs pour les conditions de la section haute de la portière

Angles	Hauteurs			Postures		
	standard	modifiée	p	accroupie	debout	p
Absolu Épaule	22,5	59,5	*	73,8	8,2	*
Absolu Coude	93,8	108,6	*	123,7	78,7	*
Relatif Épaule	44,4	65,0	*	86,5	22,9	*
Relatif Coude	108,7	131,0	*	130,1	109,7	*

Légende : * si $p < 0,05$

L'écart le plus important provient de l'angle absolu à l'épaule lors d'une position debout comparativement à celle assise (écart de 65.6°). Le moment de force à l'épaule, dans une position debout, est presque nul. Cette position, où le

membre supérieur est conservé le long du corps, permet d'économiser de l'énergie et de réduire le coût musculaire à l'épaule. De plus, le rapprochement du membre supérieur favorise la flexion du coude comme l'indique l'angle relatif à l'articulation de $109,7^\circ$ comparativement à $130,1^\circ$ pour la position assise.

3.3.2.1 Les interactions

Afin d'observer plus spécifiquement les interactions entre les variables, le tableau 3.7 présente les valeurs moyennes d'angles pour chaque condition et les effets significatifs. Tout d'abord, il faut noter que la condition la plus désavantageuse pour un peintre est celle en position accroupie avec la hauteur modifiée.

Tableau 3.7 Les effets d'interactions significatifs spécifiques entre les valeurs moyennes des angles à l'épaule et au coude des conditions de la section haute de la portière selon les hauteurs et les postures, pour chacun des angles significatifs

Angles	Hauteurs	Postures		
		accroupie	debout	(p < 0,05)
Absolu Épaule	standard	47,1	-2,0	*
	modifiée	100,5	18,5	*
	(p < 0,05)	*	*	
Absolu Coude	standard	117,9	69,8	
	modifiée	129,5	87,6	
	(p < 0,05)			
Relatif Épaule	standard	60,8	28,1	*
	modifiée	112,2	17,7	*
	(p < 0,05)	*		
Relatif Coude	standard	108,8	108,7	
	modifiée	151,3	110,7	*
	(p < 0,05)	*		

En effet, l'angle de flexion (absolu) à l'épaule de $100,5^\circ$ indique que le membre supérieur est positionné au-dessus du niveau des épaules tandis que l'angle (relatif) au coude de $151,3^\circ$ représente une extension presque complète à l'articulation. Le moment de force est alors très grand dû à l'éloignement du membre supérieur. Il faut éviter les situations où le bras est tendu vers l'avant, surtout pour un travail considéré comme statique. Les résultats démontrent que la posture debout est la plus avantageuse aux deux articulations étudiés. En effet, l'angle (absolu) à l'épaule est de $-2,0^\circ$ pour la hauteur standard tandis qu'il est de $18,5^\circ$ pour celle modifiée. Quant à la hauteur modifiée, les angles aux

articulations sont de loin supérieurs à la hauteur standard, et ce, peut importe la position adoptée. La modification de la hauteur n'est donc pas retenue comme solution puisqu'elle augmente les contraintes aux deux articulations.

Il est à noter que la posture debout exige une flexion du tronc pour les conditions de portière haute. Cette flexion du tronc est nécessaire pour réduire l'angle absolu à l'épaule. Toutefois, il ne faut pas perdre de vue que plus la flexion du tronc est importante, plus l'angle relatif à l'épaule augmente. Ainsi, les muscles extenseurs à l'épaule, qui sont étirés, créent une résistance qui amplifie l'effort des fléchisseurs de l'articulation. La valeur de l'angle relatif à l'épaule pour la condition debout – standard est de 28,1°, ce qui est acceptable comme amplitude de mouvement (McAtamney et Corlett, 1993).

3.3.3 Les cotes psychophysiques

Pour la section haute de la portière, la posture montre un effet significatif principal pour la région de l'épaule. Bien que les valeurs soient presque similaires, les sujets ont notés une différence significative entre la position accroupie et debout, comme l'indique le tableau 3.8. Effectivement, la position accroupie exige une flexion à l'épaule de plus de 70° comparativement à moins de 10° pour la position debout (voir à la section suivant : Les angles absolus et relatifs). Le positionnement de l'épaule, dans la position accroupie, est plus difficile selon la perception des sujets.

Tableau 3.8 Les valeurs moyennes des cotes psychophysiques de la section haute de la portière selon la hauteur (standard – modifiée) et la posture (accroupie – debout), pour chacune des régions anatomiques, ainsi que l'effet significatif principal

Régions anatomiques	Hauteur			Posture		
	standard	modifiée	p	accroupie	debout	p
Épaule	3,6	3,5		4,0	3,1	*
Avant-bras	3,3	3,3		3,5	3,1	
Poignet	3,2	3,2		3,5	2,9	
Légende : * si $p < 0,05$						

3.4 La section du capot (plan horizontal)

3.4.1 Le pourcentage de la contraction volontaire maximale (%CVM)

Les conditions sur la section du capot ont été réalisées selon des conditions de surfaces (sur et sous) et d'inclinaisons (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 ainsi augmente la proximité du travailleur de manière à réduire le coût musculaire à l'épaule. Les résultats analysés ont été regroupés dans le tableau 3.9 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 présentent un effet significatif soit, le deltoïde médian, le deltoïde postérieur, le trapèze supérieur, le triceps et les extenseurs communs des doigts.

Tableau 3.9 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, ainsi que l'effet significatif principal

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 absolue à l'épaule est plus prononcée que pour la condition sur le capot (voir les tableaux 3.12 et 3.13). Ceci s'explique par le fait que la posture sous le capot est plus difficile à maintenir compte tenu 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 à l'épaule plus petit (voir le tableau 3.12). Tandis que le triceps brachial a un coût musculaire plus élevée sur le capot puisque la position du coude est en extension complète. Dans une telle position, le muscle agit en co-contraction afin de mobiliser le membre supérieur.

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 (0 degré), où le poignet se retrouve en déviation ulnaire.

3.4.1.1 Les interactions

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. Les figures sont présentées en annexe. Le tableau 3.10 montre les effets d'interactions significatifs pour chacun des muscles.

Tableau 3.10 Les effets d'interactions significatifs 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

Muscles	Surface – Inclinaison (p)
Deltoïde antérieur	
Deltoïde médian	*
Deltoïde postérieur	*
Trapèze supérieur	
Grand pectoral	*
Grand dorsal	
Biceps brachial	
Triceps	*
Extenseurs communs des doigts	
Premier radial	
Fléchisseurs superficiels des doigts	
Cubital antérieur	
Légende : * si $p < 0,05$	

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 3.11 démontre la différence entre les conditions pour une valeur fixée.

Tableau 3.11 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 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 (voir le tableau 3.12). Alors, il serait possible d'éviter la surcharge des muscles fléchisseurs (deltoïde antérieur) et du trapèze supérieur.

3.4.2 Les angles absolus et relatifs

Pour cette section, les angles présentés correspondent aux zones éloignées et rapprochées de la pièce ainsi qu'aux écarts présents entre les valeurs. Ce choix de présentation des résultats s'explique par le fait que la dimension de profondeur de la pièce est plus grande (90cm) et qu'il était pertinent d'en voir les répercussions sur les différents angles aux articulations sélectionnées. La zone éloignée de la section du capot correspond à la deuxième moitié de la pièce (45 à 90 cm). Pour cette zone, les valeurs des angles sont présentées au tableau 3.12.

Tableau 3.12 Les valeurs des angles à l'épaule et au coude, sur la zone éloignée de la section du capot, et leurs effets significatifs

Angles	Surfaces			Inclinaisons		
	sur	sous	p	droit	incliné	p
Absolu Épaule	68,2	45,1	*	61,7	51,6	*
Absolu Coude	95,1	126,3	*	113,7	107,7	*
Relatif Épaule	80,8	74,5	*	89,9	65,4	
Relatif Coude	153,3	99,1	*	128,4	123,9	
Légende : * si $p < 0,05$						

Selon les résultats, les amplitudes articulaires sont très variables selon l'articulation. Il faut noter que la méthode de travail est très différente pour les deux conditions de surface. Le travail sur la surface exige de tendre le membre supérieur tandis que sous la surface, le travailleur se déplace de manière à conserver le pistolet près de lui (figure 2.2 A-C). Pour la méthode sous le capot, les angles absolus sont plus faibles aux deux articulations que ceux pour les conditions sur la section. Les moments de force sont moins élevés puisque le membre supérieur est plus rapproché du travailleur. Quant aux résultats des angles relatifs pour les conditions sur la surface, l'épaule (80,8°) et le coude (153,3°) sont considérés comme des amplitudes importantes.

Les valeurs des angles pour l'inclinaison, quant à elles, sont inférieures aux deux articulations pour la surface inclinée. Il y a une réduction de 10,1° à l'épaule pour une condition inclinée, ce qui permet d'influencer le rendement.

La zone rapprochée de la section du capot correspond à la première moitié de la pièce (0 à 45 cm). Pour cette zone, les valeurs des angles sont présentées au tableau 3.13. Les résultats démontrent que l'amplitude à l'épaule augmente lorsque le travail est réalisé près de soi, sous le capot dans la zone rapprochée.

Tableau 3.13 Les valeurs des angles à l'épaule et au coude, sur la zone rapprochée de la section du capot, et leurs effets significatifs

Angles	Surfaces			Inclinaisons		
	sur	sous	p	droit	incliné	p
Absolu Épaule	30,2	51,5	*	44,8	36,9	
Absolu Coude	79,6	149,1	*	117,2	111,5	
Relatif Épaule	30,9	61,5	*	51,8	40,7	
Relatif Coude	130,4	82,7	*	107,7	105,4	

Légende : * si $p < 0,05$

En effet, même si le travailleur est à proximité, il doit soulever le membre supérieur pour maintenir le pistolet à six pouces de distance de la surface. Dans une tel condition, l'angle relatif est de $61,5^\circ$ comparativement à $30,9^\circ$ pour un travail sous et sur le capot respectivement. Pour la section rapprochée, la variable d'inclinaison présente encore un avantage pour les conditions inclinées: l'amplitude de mouvement est réduite.

Il est probable que la surface inclinée influence le rendement grâce à la diminution de l'amplitude articulaire. Cependant, les résultats des conditions de surfaces sont divergeant selon la zone et la méthode de travail (posture). C'est pourquoi l'écart entre les valeurs aux deux zones (éloignée et rapprochée) peut prédire la surface qui est la plus avantageuse à tous les points de vue. Le tableau 3.14 présente les valeurs des écarts des angles pour les deux articulations sélectionnées.

Tableau 3.14 Les valeurs des écarts des angles à l'épaule et au coude et leurs effets significatifs pour les conditions du capot

Angles	Surfaces			Inclinaisons		
	sur	sous	p	droit	incliné	p
Absolu Épaule	38,0	-6,4	*	16,9	14,7	
Absolu Coude	15,5	-22,9	*	-3,5	-3,8	
Relatif Épaule	49,8	13,0	*	38,1	24,7	
Relatif Coude	22,8	16,4		20,7	18,5	

Légende : * si $p < 0,05$

Les angles absolu ($38,0^\circ$) et relatif ($49,8^\circ$) à l'épaule varie beaucoup plus lors d'un travail sur la surface que ceux d'un travail sous le capot, soit de $-6,4^\circ$ et $13,0^\circ$ respectivement. Cette variation est bénéfique puisque l'amplitude la plus faible à l'épaule est obtenue durant un travail sur la surface en zone rapprochée. Toutefois, la zone éloignée constitue une situation désavantageuse pour l'épaule et le coude comparativement au travail sous la section qui procure un effort raisonnable pour les deux situations.

3.4.2.1 Les interactions

Afin d'observer les effets spécifiques significatifs de l'interaction entre les deux variables, nous avons mis en relation toutes les conditions entre elles. Pour la zone éloignée de la section du capot, seuls les angles au coude présentent des effets significatifs (tableau 3.15).

Tableau 3.15 Les effets d'interactions significatifs spécifiques entre les valeurs des angles au coude, sur la zone éloignée de la section du capot, selon les surfaces et les inclinaisons

Angles	Surfaces	Inclinaisons		
		droit	incliné	($p < 0,05$)
Absolu Coude	sur	91,6	98,7	*
	sous	135,7	116,8	*
	($p < 0,05$)	*	*	
Relatif Coude	sur	161,7	144,9	*
	sous	95,1	103,0	
	($p < 0,05$)	*	*	

Le travail le plus avantageux est sous la surface droite. Toutefois, même si le coude est en flexion à 90° , l'angle à l'épaule est supérieur pour les conditions sous le capot et droites. De plus, les résultats du %CVM des muscles de l'avant-bras responsables du maintien du pistolet sont très sollicités lors de l'utilisation du pistolet pour les conditions droites et sous la surface.

Pour la zone rapprochée, les résultats à l'épaule présentent une grande différence entre l'orientation des surfaces (sous et sur). Le travail sur la surface inclinée montre des angles de $11,7^\circ$ (absolu) et de $14,4^\circ$ (relatif) à l'épaule tandis qu'elles sont triplées pour le travail sous la surface (tableau 3.16). De plus, la

posture lors d'un travail sous le capot peut être difficile pour les membres inférieurs, à long terme, puisque le travailleur doit être accroupi au sol.

Tableau 3.16 Les effets d'interactions significatifs spécifiques entre les valeurs des angles à l'épaule et au coude, sur la zone rapprochée de la section du capot, selon les surfaces et les inclinaisons

Angles	Surfaces	Inclinaisons		
		droit	incliné	(p < 0,05)
Absolu Épaule	sur	48,7	11,7	*
	sous	40,9	62,2	
	(p < 0,05)		*	
Relatif Épaule	sur	47,5	14,4	*
	sous	56,1	66,9	
	(p < 0,05)		*	
Relatif Coude	sur	142,4	118,5	
	sous	73,0	92,4	
	(p < 0,05)	*	*	

Il est donc clair que le travail sur le capot est beaucoup plus avantageux pour la zone rapprochée seulement. Encore une fois, les écarts viennent mettre en évidence la grande variabilité des résultats pour les conditions sur la surface (tableau 3.17). Il faut prendre en considération que l'angle à l'épaule, sur la zone éloignée, est plus élevé pour la surface inclinée parce que l'inclinaison provoque une élévation du rebord de la surface. Au contraire, l'inclinaison de la surface provoque une baisse de la hauteur du rebord en zone rapprochée, ce qui est favorable.

Tableau 3.17 Les effets d'interactions significatifs spécifiques entre les valeurs des écarts des angles à l'épaule et au coude, sur la section du capot, selon les surfaces et les inclinaisons.

Angles	Surfaces	Inclinaisons		
		droit	incliné	(p < 0,05)
Absolu Épaule	sur	24,1	51,9	*
	sous	9,7	-22,5	*
	(p < 0,05)		*	
Absolu Coude	sur	5,7	25,4	*
	sous	-12,7	-33,0	*
	(p < 0,05)	*	*	
Relatif Épaule	sur	46,9	52,7	
	sous	29,2	-3,2	*
	(p < 0,05)	*	*	

Afin de rentabiliser les effets bénéfiques de l'inclinaison de la surface, le travailleur aurait avantage à faire pivoter sa pièce de 180° sur le trépied de manière à toujours faire le travail sur la surface en zone rapprochée. Les résultats à l'épaule démontrent de faibles amplitudes, pour une condition sur la surface inclinée, qui se traduit par une diminution du coût musculaire à cette articulation.

3.4.3 Les cotes psychophysiques

Pour les conditions du capot, l'inclinaison de la surface est favorable pour la région de l'avant-bras et du poignet. En effet, le tableau 3.18 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 plus confortable, donc moins exigeante selon les sujets.

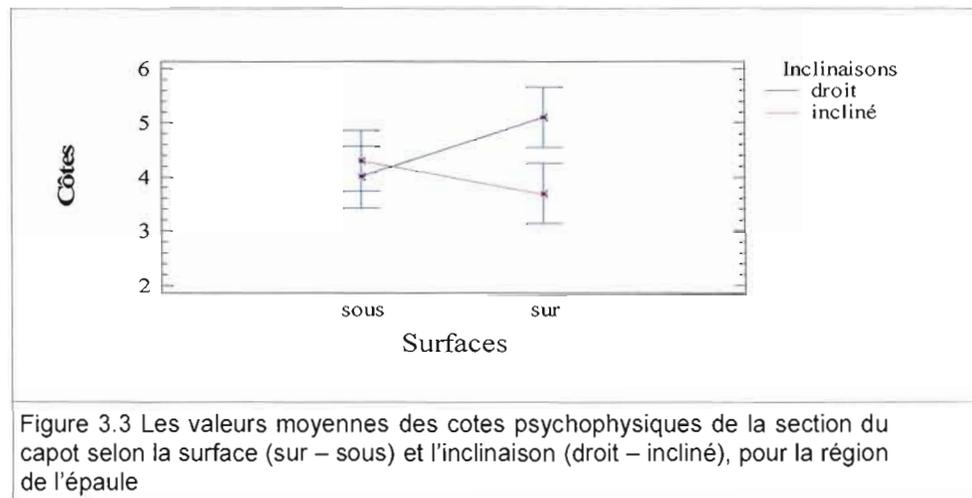
Tableau 3.18 Les valeurs moyennes des cotes psychophysiques de la section du capot selon la surface (sur – sous) et l'inclinaison (droit – incliné), pour chacune des régions anatomiques, ainsi que l'effet significatif principal.

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 $p < 0,05$						

De manière plus spécifique, une analyse des effets d'interactions significatifs possibles pour chacune des régions anatomiques a été réalisée. Bien que l'épaule ne montre pas d'effet significatif principal, l'interaction entre la surface et l'inclinaison est significative.

Afin de mieux comprendre ce que représente cet effet significatif, la figure 3.3 démontre l'interaction entre les variables pour l'épaule. L'écart entre les deux intervalles de confiance, à droite de la figure, devient significatif entre les deux inclinaisons seulement pour les conditions sur le capot. Les résultats, associés à

la perception des participants, indiquent que l'effort est plus exigeant (5 = modéré) pour un travail sur une surface droite.



3.5 La section du toit (plan horizontal)

3.5.1 Le pourcentage de la contraction volontaire maximale (%CVM)

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). La modification des hauteurs, pour les conditions de toit, diffèrent de celles présentées pour la section basse et haute de la portière. 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 elle, la variation de l'inclinaison du toit provient 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 3.19 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.

Tableau 3.19 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, ainsi que l'effet significatif principal.

Muscles	Hauteur		p	Inclinaison		p	Pistolet		p
	standard	modifiée		droit	incliné		standard	modifié	
Deltoïde antérieur	12,31	9,19	*	11,05	10,46		10,86	10,64	
Deltoïde median	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	
Trapeze 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 $p < 0,05$

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 (voir le tableau 3.21), 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 la scapula 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 due aux larges dimensions de la pièce qui créent une abduction de grande amplitude 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.

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 brachial (long chef) agit plutôt comme stabilisateur de l'épaule et du coude avec les autres muscles. 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 radial du poignet, est alors étiré. Les muscles extenseurs du poignet et des doigts sont également sollicités lors de la préhension du pistolet et des mouvements d'extension au poignet suite au balayage de la surface. 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. Bien que le cubital antérieur n'est pas principalement impliqué lors de la préhension de l'outil à 180°, la condition du pistolet modifié demande une légère hausse de la sollicitation musculaire afin de retenir la charge. Toutefois, cette augmentation de la sollicitation des fléchisseurs est mineur comparativement à la diminution du %CVM des extenseurs pour le pistolet modifié.

3.5.1.1 Les interactions

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 3.20 ci-dessous, montre les interactions significatives spécifiques des deux variables ainsi que les valeurs moyennes du %CVM du deltoïde antérieur.

Tableau 3.20 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 selon l'inclinaison et le pistolet, pour chacun des muscles significatifs

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 un le seul effet d'interaction significatif spécifique pour ce muscle. En effet, la première rangée de valeurs du tableau 3.20 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 est plus près rapproché 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 une diminution du coût musculaire du muscle responsable de la flexion de l'épaule.

3.5.2 Les angles absolus et relatifs

Pour cette section, les angles présentés correspondent également aux zones éloignées et rapprochées de la pièce ainsi qu'aux écarts présents entre les valeurs. Bien que la profondeur de la pièce soit de moyenne grandeur (60cm), l'accessibilité à cette surface est difficile due à la disposition de la pièce (146cm du sol). La zone éloignée de la section du toit correspond à la deuxième moitié

de la pièce (30 à 60 cm). Pour cette zone, les valeurs des angles sont présentées au tableau 3.21.

Tableau 3.21 Les valeurs des angles à l'épaule et au coude, sur la zone éloignée de la section du toit, et leurs effets significatifs

Angles	Hauteurs			Inclinaisons			Pistolet		
	standard	modifiée	p	droit	incliné	p	standard	modifié	p
Absolu Épaule	98,7	67,2	*	84,3	81,6		84,0	82,0	
Absolu Coude	115,2	88,6	*	102,1	101,7		102,9	100,9	
Relatif Épaule	112,2	90,9	*	104,2	98,9	*	102,8	100,3	
Relatif Coude	163,2	158,7	*	162,0	159,9		160,5	161,4	

Légende : * si $p < 0,05$

La variable hauteurs présente, pour chacun des angles, un effet significatif. À tout égard, les valeurs d'angles pour la hauteur modifiée sont inférieures à celle de la hauteur standard. Cela revient à dire que l'élévation d'une hauteur fixe a été bénéfique aux articulations de l'épaule et du coude puisque leurs amplitudes ont diminués. Ce constat est plus en évidence au niveau de l'épaule qui présente un angle relatif de $90,9^\circ$ pour une hauteur modifiée, comparativement à $112,2^\circ$ pour une hauteur standard, lorsque l'effort est le plus contraignant en zone éloignée. Il en va de même pour les résultats de la hauteur modifiée, en zone rapprochée (tableau 3.22).

Tableau 3.22 Les valeurs des angles à l'épaule et au coude, sur la zone rapprochée de la section du toit, et leurs effets significatifs

Angles	Hauteurs			Inclinaisons			Pistolet		
	standard	modifiée	p	droit	incliné	p	standard	modifié	p
Absolu Épaule	95,7	41,3	*	73,4	63,6	*	69,0	68,0	
Absolu Coude	111,4	83,1	*	98,0	96,5		98,3	96,1	
Relatif Épaule	93,6	43,6	*	73,4	63,8	*	68,8	68,4	
Relatif Coude	163,7	138,9	*	155,1	147,6	*	151,3	151,4	

Légende : * si $p < 0,05$

L'écart entre les conditions de hauteurs standards et modifiées est plus important pour les angles au coude. En effet, la zone rapprochée permet la

flexion du coude ce qui réduit l'angle relatif à cette articulation.

Pour ce qui est de la variable d'inclinaison, la zone rapprochée présente trois effets significatifs contrairement à un seul pour la zone éloignée (tableau 3.22). Bien que l'inclinaison modifiée soit peu importante (8°), elle a permis au travailleur d'adopter une posture selon laquelle l'amplitude de mouvement à l'épaule et au coude est réduite. Ensuite, la variable de pistolets n'influence pas significativement les angles à l'épaule et au coude. De telle sorte que les résultats obtenus sont semblables d'une condition de pistolet à l'autre (standard ou modifié).

Selon les résultats obtenus, l'élévation de la hauteur du travailleur permet de diminuer l'amplitude articulaire à l'épaule. L'écart de $25,9^\circ$ (absolu épaule) et de $47,3^\circ$ (relatif épaule) montre que l'effet de cette hauteur modifiée varie selon la zone d'application (tableau 3.23) de même que la variable d'inclinaison.

Tableau 3.23 Les valeurs des écarts des angles à l'épaule et au coude et leurs effets significatifs pour les conditions du toit

Angles	Hauteurs			Inclinaisons			Pistolet		
	standard	modifiée	P	droit	incliné	p	standard	modifié	p
Absolu Épaule	3,0	25,9	*	11,0	18,0	*	15,0	14,0	
Absolu Coude	3,8	5,5		4,1	5,2		4,6	4,7	
Relatif Épaule	18,6	47,3	*	30,8	35,1	*	34,0	31,9	
Relatif Coude	-0,5	19,7	*	6,9	12,3	*	9,3	10,0	

Légende : * si $p < 0,05$

3.5.2.1 Les interactions

Chacune des variables fût mise en relation afin de soustraire les effets d'interactions significatifs spécifiques pour les deux types d'angles aux deux articulations sélectionnées. Pour la zone éloignée de la section du toit, l'interaction entre des conditions d'inclinaison et de pistolets ont ressortis (tableau 3.24).

Tableau 3.24 Les effets d'interactions significatifs spécifiques entre les valeurs des angles à l'épaule et au coude, sur la zone éloignée de la section du toit, selon les hauteurs, les inclinaisons et les pistolets

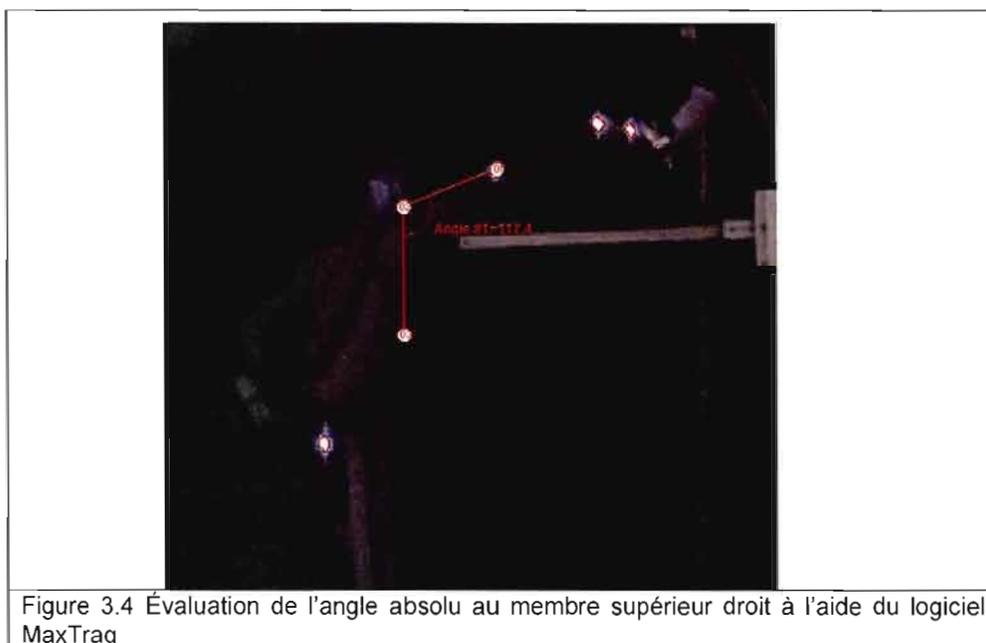
Angles	Inclinaisons	Pistolets		
		standard	modifié	(p < 0,05)
Relatif Coude	droit	160,9	163,1	*
	incliné	160,2	159,6	
	(p < 0,05)		*	
Absolu Épaule	droit	84,0	84,6	
	incliné	84,0	79,3	
	(p < 0,05)		*	

Lors de l'expérimentation, la position du poignet était très difficile à réaliser sur la zone éloignée. Bien que nous n'ayons pas les angles au poignet, les %CVM ont démontrés que le travail des muscles extenseurs du poignet, qui sont étirés lors d'une prise sur un plan horizontal, était très important. Or, le tableau 3.24 démontre un effet significatif au coude, dû au changement de pistolet, pour une condition d'inclinaison droite. L'effet significatif laisse présager que le pistolet modifié, qui a été conçu pour réduire l'effort de la préhension, permet un meilleur positionnement du coude grâce à la réduction du moment de force au poignet.

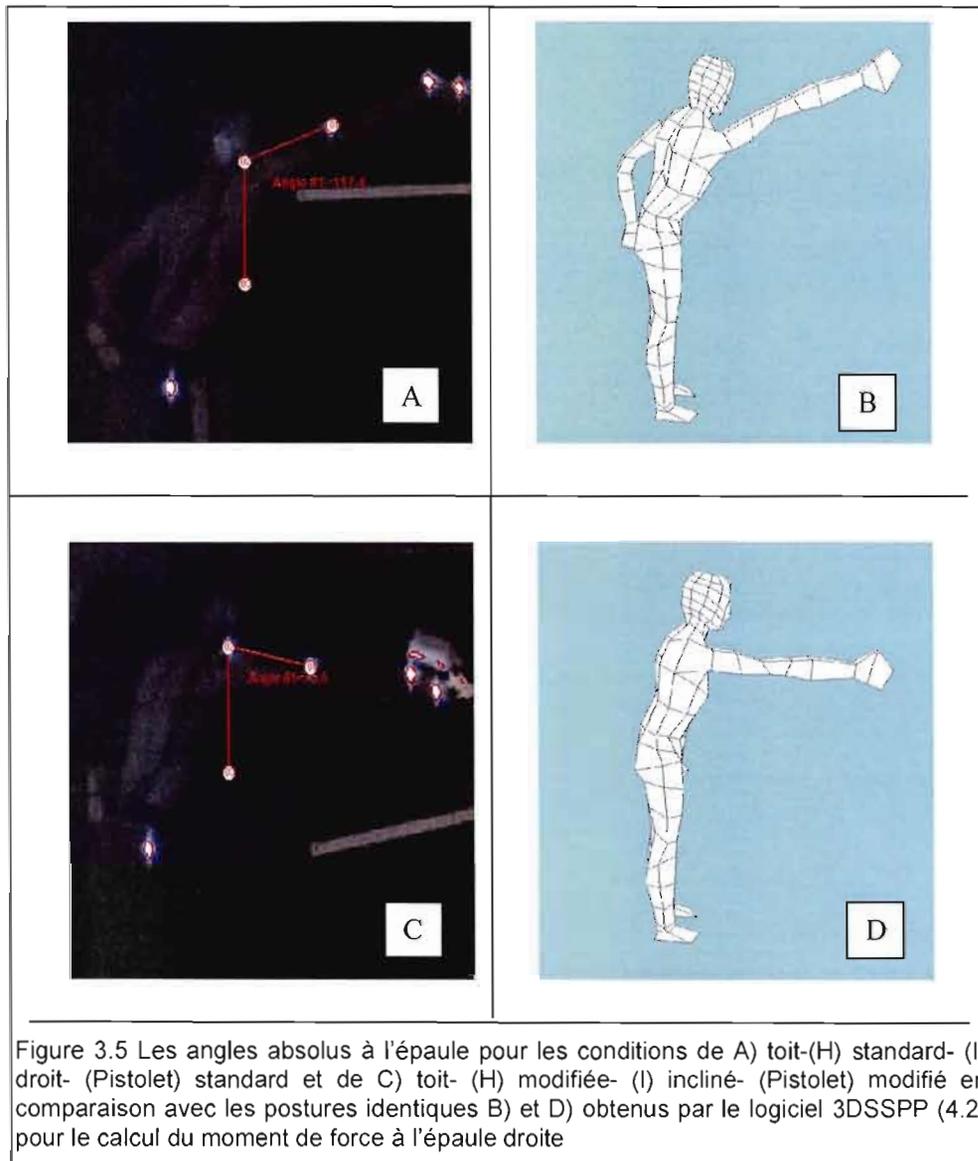
3.5.3 Les moments de force

Tel que mentionné précédemment (section 1.5 : Les moments de force de l'outil), un moment de force se définit comme étant une force de rotation appliquée à une articulation. Ce calcul permet de quantifier la force de rotation exercée à une articulation, dans une posture spécifique. Pour un travail statique, la contrainte liée au moment de l'outil et au poids du segment est importante à identifier pour quantifier l'effort. La détermination du moment de force permet alors d'établir une comparaison entre les conditions afin d'identifier la posture la moins contraignante pour l'articulation. Pour trouver le moment de force, il nous faut connaître l'angle absolu à l'articulation.

Les conditions sur la section du toit sont susceptibles de présenter les plus hauts résultats de moment de force puisque la distance d'application de la force est grande. En effet, plus le levier est grand entre la charge (pistolet) et l'articulation, plus le moment de force sera important. La figure 3.4 présente un des différents angles obtenus à partir des marqueurs lumineux, pour une condition de toit. Les valeurs d'angles à l'épaule et au coude ont été obtenues lors de l'analyse avec le logiciel MaxTraq.



Afin de déterminer le moment de force pour chacune des postures, les angles ont été insérés dans le logiciel « University of Michigan's 3DSSPP (4.2) ». Pour les mesures anthropométriques, nous avons entrés les valeurs moyennes du poids et de la taille des participants soit de 77,9 Kg et de 1,79m. La figure 46 montre la représentation du membre supérieur droit de deux conditions réalisées sur la section du toit. Notons que la charge maintenue dans la main pour les deux conditions est identique puisque les deux pistolets ont le même poids.



Les moments de force obtenus à l'épaule droite par le logiciel sont presque identiques avec des résultats de 20.4 Nm pour la condition B (toit, hauteur standard) et de 22.8 Nm pour la condition D (toit, hauteurs modifiée et inclinée) lorsqu'une charge de 1.5 Kg est appliquée au membre supérieur droit. Si l'on en croit les moments de force seulement, la condition de hauteur modifiée (figure 3.5 B) ne permet pas de réduire la contrainte à l'épaule. Au contraire, son

moment de force est supérieur à celui pour la condition non modifié. Un moment de force plus élevé indique une contrainte plus grande au niveau de l'articulation, ce qui s'expliquerait par une hausse de la sollicitation musculaire pour cette région. Or, les résultats moyens du %CVM pour ces conditions présentent le contraire. Pour les muscles tels que le deltoïde antérieur, le deltoïde médian et le trapèze supérieur, qui sont grandement impliqués lors du maintien du membre supérieur, les valeurs du %CVM sont respectivement de 13.1%, 22.1% et 23.5% pour la condition de toit – (H) standard – (I) droit – (Pistolet) standard. Tandis qu'elles sont de 8.9%, 11.3% et 15.8% respectivement pour la condition de toit – (H) modifiée – (I) incliné – (Pistolet) modifié. Ces résultats démontrent que la sollicitation musculaire est plus faible pour la condition de toit modifié comparativement à ce que les moments de force prédisent à partir d'un modèle (3DSSPP).

À la lumière de ces résultats, les moments de force sont limités et ne peuvent, à eux seuls, présenter l'effort musculaire d'une articulation. Lorsque l'amplitude de mouvement à l'épaule dépasse 90°, le moment de force n'augmente plus et ce même si les valeurs du %CVM continuent à augmenter. Cette hausse du coût musculaire s'explique par le phénomène de tension-longueur lorsque les amplitudes de mouvements sont grandes (Rouleau et al., 2009). L'angle entre deux segments (angle relatif) détermine la position d'un muscle de même que sa longueur. Tout dépendant s'il est raccourci ou étiré, le muscle génère de la tension qui influence la difficulté du mouvement dépendamment de son action.

L'analyse des angles de la position du membre supérieur droit permet de valider le coût musculaire obtenu pour chaque condition. Les angles (absolus et relatifs) à l'articulation sont des points de repère facile à observer afin d'estimer une contrainte à l'articulation.

3.5.4 Les cotes psychophysiques

Pour ce qui est de la section du toit, plusieurs effets significatifs sont présents pour les différentes régions anatomiques. Selon les résultats des cotes psychophysiques, la hauteur modifiée a un effet bénéfique sur les trois régions anatomiques (tableau 3.25). La hauteur modifiée permet au travailleur de se rapprocher du plan de travail et ainsi lui procure un meilleur confort. Suivant la même logique, les résultats des participants 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 3.25 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, ainsi que l'effet significatif principal.

Régions anatomiques	Hauteur			Inclinaison			Pistolet		
	standard	modifiée	p	droit	incliné	p	standard	modifiée	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 cette section, une interaction significative à l'épaule est présente entre les trois variables (hauteur, inclinaison et pistolet).

CHAPITRE IV

DISCUSSION

Les troubles musculo-squelettiques aux membres supérieurs reliés au travail sont les plus rapportés parmi les maladies professionnelles (Sanders. 1997, Harrington et al. 1998). Le milieu des Services à l'automobile n'en fait pas exception puisque plusieurs facteurs de risques sont présents. La description des travailleurs sur leurs postures de travail, leurs opinions sur les causes des symptômes musculaires et les références en littérature concernant les causes des blessures au dos et aux épaules reliées au travail supportent l'hypothèse que l'environnement de travail dans les garages est une cause importante parmi celles qui contribuent aux symptômes des travailleurs en mécanique automobile (Torp et al. 1996). Selon ces mêmes auteurs, les études d'interventions sont nécessaires afin de donner de l'information sur les moyens de réduire les troubles musculo-squelettiques reliés au travail. Suite à la présentation des résultats de la section précédente, il est possible d'exposer notre opinion en fonction de la validation des conditions modifiées réalisées pour les tâches de peinture, pour chaque section.

4.1 Section basse de la portière

Les résultats du pourcentage de contraction volontaire maximale démontrent que la hauteur modifiée n'est pas avantageuse pour les travailleurs, sur la section basse de la portière, puisqu'ils ont des valeurs de %CVM plus élevées que pour la hauteur standard. En effet, pour la condition modifiée, les angles ont augmentés à l'articulation de l'épaule et du coude, ce qui se traduit également par une hausse du moment de force déterminé par l'angle absolu. Également, une augmentation de la sollicitation musculaire se traduit par l'étirement des fibres musculaires, soit lors d'une variation de l'angle relatif. Lors de la condition modifiée en hauteur, la tâche devient plus exigeante pour le deltoïde antérieur et le trapèze supérieur avec des gains de 2 à 3 % aux coûts musculaires. Toutefois, la condition standard présente des valeurs du %CVM relativement élevées (7 à 11%) aux muscles de l'épaule. Afin de réduire cette sollicitation, les travailleurs auraient avantage à se rapprocher de la surface à peindre en conservant le

coude le long du corps. De cette façon, l'angle relatif à l'épaule serait nul et réduirait ainsi la sollicitation des muscles qui sont attachés à cette articulation.

Ensuite, la préhension de l'outil pour une hauteur standard exige une extension du poignet afin de procéder à l'application de peinture. Lors des observations préliminaires, des mouvements de supination et d'extension étaient observables, chez les peintres professionnels de carrosserie automobile, due à la pente négative de la pièce. Afin de réduire ces mouvements, l'élévation de la surface avait pour but d'améliorer la posture du poignet en redressant la surface à la verticale. Or, les angles à l'épaule et au coude que nous avons analysés ne peuvent traduire ce qui se passe au poignet. Il faut donc nous rabattre sur les valeurs du %CVM pour conclure si les muscles de l'avant-bras et du poignet sont moins sollicités pour une condition de hauteur modifiée. Or, même le %CVM n'avantage pas la condition modifiée puisque le coût musculaire des muscles de l'avant-bras et du poignet est toujours à des niveaux élevés et aucun effet significatif n'est présent pour ces muscles. Ces valeurs s'expliquent par la grande diversité des résultats, due aux diverses techniques de préhension chez les sujets. Également, la perception de l'effort n'est pas changée pour les trois régions anatomiques : l'épaule, le coude et le poignet. Étant donné que le plan de travail est accessible du à l'élément de proximité, les sujets percevaient le travail comme étant « très facile » (côte de 2 à 3 sur l'échelle de Borg modifié). Bien qu'a priori, la posture du poignet ne semble pas problématique lors de l'utilisation du pistolet sur un plan vertical, les valeurs du %CVM des muscles extenseurs du poignet (8,94 à 10,60%) sont très près de la limite sécuritaire déterminée (Bjöksten et Jonsson, 1977; Sjogaard et al., 1988). La variation de l'inclinaison de la surface n'est pas suffisante à faire diminuer l'activation de ces muscles lors du travail sur une section basse de la portière. Les pistolets standards permettent d'optimiser la position du poignet lors de l'application perpendiculaire de peinture sur une surface verticale, quand le travail est à la hauteur du coude (Björing et Hägg, 2000). Toutefois, les caractéristiques de la poignée (Mital et Kilbom, 1992a, b; Bobjer et al., 1993) ainsi que la force exigée pour l'activation de la détente du pistolet (Hazelton et al., 1975; Fransson et Winkel, 1991; Mital et Kilbom, 1992a, b; Hagberg et al., 1995; Aldien et al., 2005) peuvent contribuer à faire augmenter l'exposition aux troubles musculo-

squelettiques (Lee et al., 1997). Une modification de la poignée du pistolet pourrait être une solution envisageable afin de réduire la sollicitation des muscles de l'avant-bras. La préhension du pistolet peut être problématique pour ce type de section puisque même en posture accroupie, la hauteur de la surface est trop basse par rapport à la position optimale de l'avant-bras (coude à 90°) du travailleur. Une autre option pourrait être d'élever davantage la section avec un système de levage plus performant et adopter une position debout.

4.2 Section haute de la portière

Les résultats confirment que le travail en position accroupie est plus coûteux pour la plupart des muscles étudiés. Une telle posture, lors de la condition de hauteur modifiée, oblige de tendre le membre supérieur plus haut que la hauteur de l'épaule afin d'atteindre la section. En effet, les valeurs des angles absolus et relatifs moyens sont supérieures à 100° pour l'articulation de l'épaule. En considérant que ce travail est effectué sur une période prolongée, le positionnement des membres supérieurs au-dessus du niveau des épaules est associé à une augmentation des risques de troubles musculo-squelettiques aux épaules et au cou (Kuorinka et al., 1987; Winkel et Westgaard, 1992; Punnett et al., 2000; Saxton, 2000). En plus, cette condition occasionne une augmentation du %CVM du deltoïde antérieur. De plus, le trapèze supérieur est très sollicité (17,24%) pour maintenir l'élévation de la scapula qui travaille à maintenir la position. L'articulation du coude présente elle aussi des angles relatifs élevés, de plus de 150°, pour la condition de hauteur modifiée en position accroupie. Cette articulation est alors en extension quasi complète lors du travail. Or, les indicateurs du développement d'une épicondylite latéral sont associés aux facteurs de risques suivants, soit l'élévation du membre supérieur devant le corps et les mouvements de précision durant un travail journalier (Haahr et Andersen, 2003; Rogier et al. 2009). Donc, pour cette section, la condition de hauteur modifiée n'a pas été favorable à la diminution du coût musculaire, au contraire. Pourtant, la variation de hauteur (30cm) n'a pas été perçue par les participants tandis que le changement de posture s'est fait ressentir au niveau de l'épaule. En effet, seule la variable de la posture (accroupi et debout) présente un effet significatif à l'épaule. Il a été mentionné que la position accroupie provoque une

augmentation de l'amplitude articulaire à l'épaule, surtout lors de la condition de hauteur modifiée. Cette posture provoque alors, par la même occasion, un étirement des muscles extenseurs de l'épaule (Marchand et al., 2008). Cette résistance offerte par l'étirement, qui fait augmenter l'effort musculaire, a probablement été ressentie par les sujets.

De plus, les muscles responsables de la préhension du pistolet présentent tous un effet significatif pour la posture, à l'exception des fléchisseurs superficiels des doigts. La posture accroupie influence la position du membre supérieur et, par le fait même, provoque l'augmentation de la sollicitation musculaire des extenseurs communs des doigts, du premier radial et du cubital antérieur. Le fait que la main se retrouve plus haute que le niveau des épaules est désavantageux pour le travailleur. En plus d'avoir le poignet en déviation radiale, il effectue un travail statique avec une grande extension à l'articulation. Pour un cycle de travail maintenu, ces facteurs de risques reliés à la prise d'un outil peuvent causer le développement d'un syndrome du tunnel carpien (Dababneh et Waters, 1999; Rogier et al. 2009). Encore aujourd'hui, plusieurs travailleurs restent en position accroupie lors du travail sur la section haute d'une portière. Les résultats le démontrent, cette position est très coûteuse et présente plusieurs facteurs de risques due à la position du corps par rapport à la section.

Suite aux résultats recueillis, la posture debout sur une hauteur standard est la condition idéale au membre supérieur pour cette section. La posture debout permet de maintenir une position neutre du poignet puisque la hauteur standard de la pièce est plus ou moins égale à la hauteur du coude de la moyenne des sujets. Dans cette situation, le corps est plus fort puisque l'articulation du coude est dans une position favorable (Dababneh et Waters, 1999), soit en flexion le long du corps. La sollicitation des muscles à l'épaule est réduite, de même que les angles relatifs. Également, la position debout permet de réduire la déviation ulnaire du poignet, tel que l'indique la figure 2.3. En effet, le peintre maintient une légère déviation ulnaire au poignet lorsqu'il travaille sur une surface verticale, à une hauteur égale ou inférieure au niveau du coude (Björing et Hägg, 2000). Les résultats du %CVM des muscles extenseurs communs des doigts et du premier radial connaissent une réduction de leur activité musculaire pour cette position.

Ces résultats sont influencés par la position neutre du poignet lors du travail. En outre, la position debout nécessite la flexion du tronc ou la flexion des genoux pour atteindre la surface avec précision. Cependant, la flexion du tronc n'a pas été analysée dans cette étude. Il serait intéressant de connaître les répercussions à long terme, de la flexion du tronc pendant un travail statique.

4.3 La section du capot

Pour cette section, la problématique majeure de 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. Le travail sous le capot permet de conserver 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 participants 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.

Au contraire, les résultats ont démontrés que l'application de peinture sur la surface 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 mouvements. 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 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, une diminution de la sollicitation (%CVM) 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 de l'effort perçu par les participants au niveau de l'avant-bras et du poignet présente des effets significatifs. 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. Or, les participants perçoivent un travail plus exigeant lors du travail sur le capot avec la surface étant droite.

Afin de maximiser les avantages d'un travail sur une surface inclinée et de réduire les contraintes associées à la zone éloignée, le trépied pourrait être pivotant 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 faible amplitude de mouvement puisque le peintre travaillerait toujours sur la partie inférieure devant lui.

4.4 La section du toit

Pour cette section, 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 modifiés. 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'élevateurs automatiques aux quatre roues. L'inclinaison à la section du toit, engendrée par les crics pneumatiques disponibles dans cette étude, pourrait obtenir un meilleur gain avec le nouveau dispositif. Un deuxième choix serait d'élever le travailleur comme il a été question dans cette étude. Toutefois, nous avons constaté que les marche-pieds et échelles ne sont pas utilisés par les peintres professionnels prétextant que les manipulations génèrent une perte de temps. 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, avec charge, augmentent la sollicitation musculaire des extenseurs du poignet qui sont actifs lors de la prise du pistolet. Effectivement, ces muscles travaillent de pair 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 un court laps de temps. 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. Seules la cinétique et l'activité musculaire démontrent que la condition de hauteur modifiée sur un plan incliné favorise une meilleure posture du poignet et réduit la sollicitation musculaire respectivement (Werner et al., 1997). Il ne faut pas oublier que la quantité de peinture comprise dans le réservoir modifie la charge du pistolet et rend son maintien plus exigeant pour les muscles à l'avant-bras et au poignet.

Telle que mentionné dans la section précédente, une inclinaison de 45° favorise la réduction du coût musculaire des extenseurs du poignet. Une telle inclinaison permettrait au poignet de retrouver une position neutre. Pour réaliser une telle condition, il faudrait un système de levage automatisé et sécuritaire afin de faire pivoter le véhicule dans un tel angle. Par ailleurs, le pistolet modifié aura besoin de quelques ajustements pour l'approvisionnement de peinture puisque lors de tests préliminaires, son efficacité était déficiente sur des surfaces à 45° d'inclinaisons.

Les résultats psychophysiques ont démontrés que la hauteur modifiée a permis de réduire l'effort aux trois régions anatomiques évalués. Également, le changement de l'inclinaison a aussi eu un effet positif sur la perception des

sujets. Bien que les valeurs des côtes psychophysiques n'étaient pas élevées (facile à modéré), l'effet significatif aux trois régions anatomiques était présent. Pour ce qui est du changement du pistolet, seule la région du poignet a connu une variation de l'effort selon les sujets. En effet, la modification du pistolet était davantage perceptible à la région du poignet qu'aux autres articulations.

Les côtes psychophysiques, en général, n'ont pas permis d'apporter des conclusions justifiables. Bien qu'il y ait des effets significatifs chez certaines variables des différentes sections, les valeurs des côtes obtenues entre les conditions n'avaient jamais plus de un d'écart. Pour un travail statique, il est très difficile de se baser sur la perception d'un sujet pour en quantifier l'effort. Il est ardue d'estimer la capacité du muscle lorsque la force déployée ne dépasse pas 30% du CVM puisque ce sont les fibres lentes, ayant une grande résistance à la fatigue, qui interviennent en premier dans le recrutement en dessous de ce pourcentage (Henneman et al., 1974). Les conditions de capot et de toit ont obtenus des cotes psychophysiques plus hautes probablement dû au fait que les conditions étaient plus longues (40 secondes) comparativement aux conditions de portières (20 secondes). Il est alors plus facile pour un sujet d'évaluer un travail selon la durée d'exposition. Plus le travail est long, plus la perception de l'effort augmentera.

CONCLUSION

Résumé

- *L'inclinaison de la surface du capot permet de réduire l'angle de flexion ainsi que les valeurs de %CVM pour l'épaule.*
- *L'élévation du travailleur, pour les conditions de toit, permet de réduire l'angle de flexion ainsi que les valeurs de %CVM pour l'épaule.*
- *L'inclinaison de la surface du toit permet de réduire le moment de force à l'épaule.*
- *Le pistolet modifié permet une faible réduction des valeurs de %CVM aux muscles de l'avant-bras. Toutefois, l'outil ne permet pas de conserver le poignet en position neutre.*

Quelque soit la section de travail (section basse de la portière, section haute de la portière, section du capot ou section du toit), l'utilisation du membre supérieur devrait toujours être dans la zone de confort du travail, soit entre 0° et 30° de flexion ou d'abduction à l'épaule. De plus, les épicondylites sont souvent développées chez les peintres à cause des mouvements d'extension du poignet et des moments de force exercés sur les muscles déviateurs radiaux (Haahr et Andersen, 2003). Il est donc important de favoriser le travail près de soi en réduisant l'amplitude articulaire du coude (angle relatif). Les mauvaises postures (méthodes de travail) combinés à une charge statique prolongée peuvent constituer un facteur de risque qui favorisera le développement d'une maladie professionnelle, à long terme (Järvholm et al., 1991; Sommerich, 1993; Dababneh et Waters, 1999; Fernandez, 2005).

Les résultats de ce projet de maîtrise permettront de proposer des recommandations qui seront remis aux conseillers en prévention de ce secteur d'activité et pourront être utilisées comme moyen d'intervention et comme éléments de formation pour les nouveaux travailleurs du secteur. L'application des modifications suggérées dans cette étude contribuera à réduire les situations présentant un risque de blessure, et à long terme, à diminuer le taux d'absentéisme chez les travailleurs. À l'aide de ces résultats, les fabricants

d'outils auront avantage à travailler sur la conception de pistolets qui pourraient réduire la demande musculaire au poignet sur les surfaces horizontales. De plus, l'ajout d'un système automatique de levage, dans les cabines de peinture, pourrait permettre l'inclinaison de la voiture et ainsi rapprocher le travailleur de sa surface de travail. À moindre coût, une marche pliante pourrait être fixée à la cabine de manière à permettre l'élévation du travailleur. Pour un travail sur le toit, le peintre n'aurait qu'à abaisser la marche, tel un lit mural, afin de recréer la condition surélevée pour réduire les angles de flexions à l'épaule. En plus, cette marche serait dotée d'une extension intégrée pouvant s'allonger au besoin. Cette rallonge permettrait au travailleur de rester à proximité du véhicule, et ce, malgré le type de voitures (largeur différente).

ANNEXE A

Section haute de la portière

Deltoïde postérieur

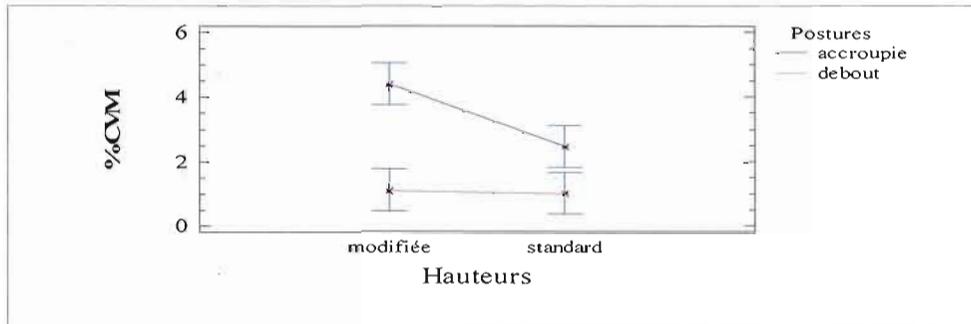


Figure A.1 L'effet d'interaction des variables de hauteurs et de postures sur le pourcentage de la contraction volontaire maximale (% CVM) du deltoïde postérieur

Grand pectoral

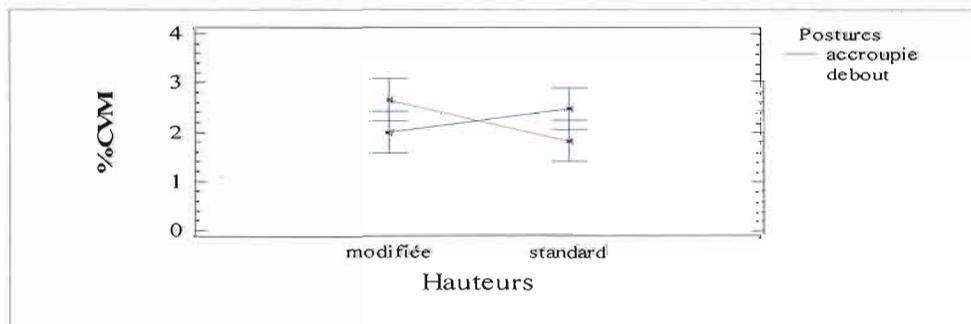


Figure A.2 L'effet d'interaction des variables de hauteurs et de postures sur le pourcentage de la contraction volontaire maximale (% CVM) du grand pectoral.

Grand dorsal

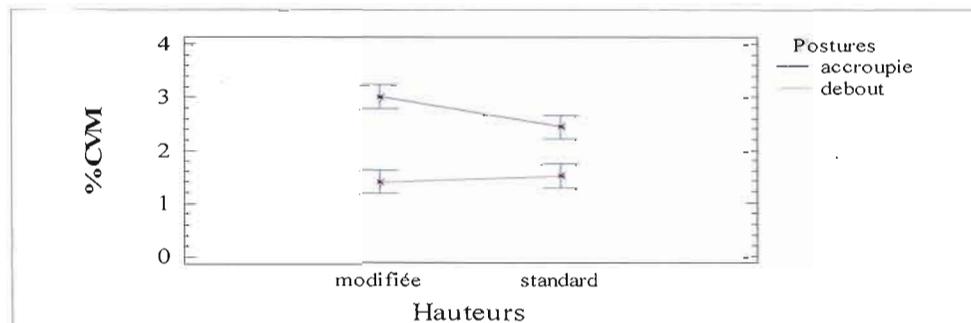


Figure A.3 L'effet d'interaction des variables de hauteurs et de postures sur le pourcentage de la contraction volontaire maximale (% CVM) du grand dorsal.

Triceps

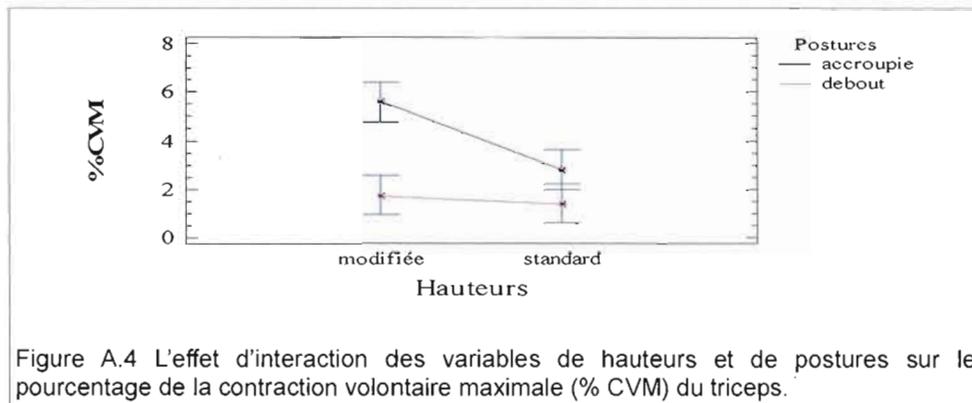


Figure A.4 L'effet d'interaction des variables de hauteurs et de postures sur le pourcentage de la contraction volontaire maximale (% CVM) du triceps.

Section du capot

Deltoïde médian

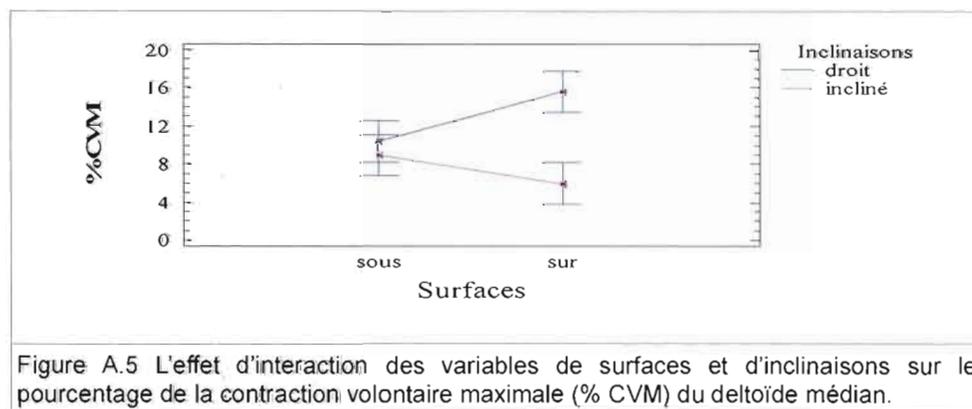


Figure A.5 L'effet d'interaction des variables de surfaces et d'inclinaisons sur le pourcentage de la contraction volontaire maximale (% CVM) du deltoïde médian.

Deltoïde postérieur

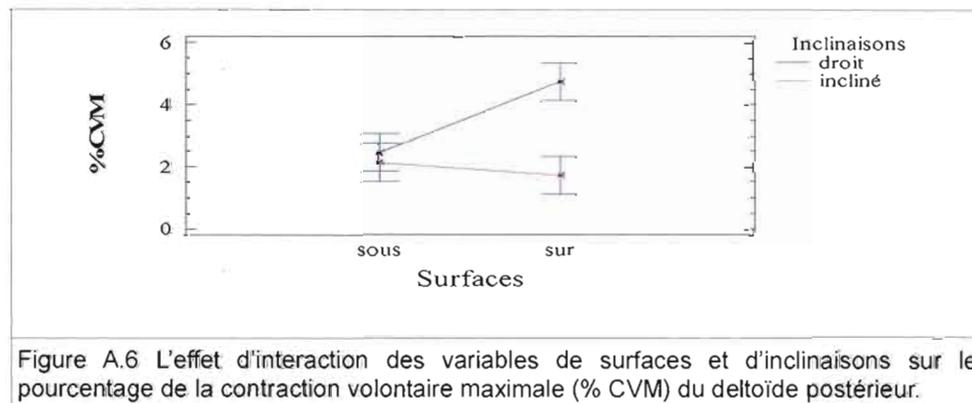


Figure A.6 L'effet d'interaction des variables de surfaces et d'inclinaisons sur le pourcentage de la contraction volontaire maximale (% CVM) du deltoïde postérieur.

Grand pectoral

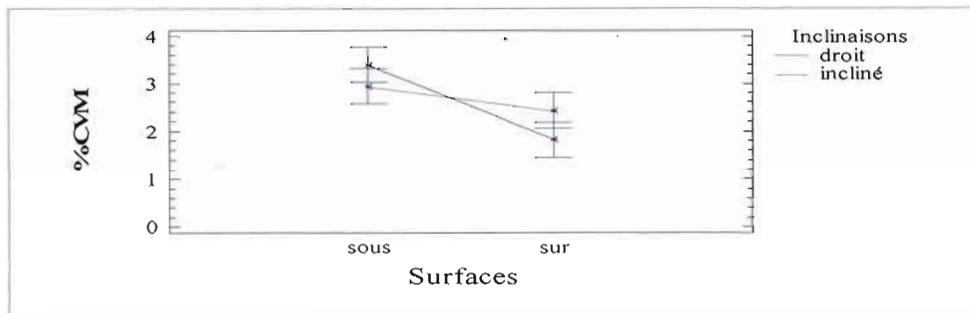


Figure A.7 L'effet d'interaction des variables de surfaces et d'inclinaisons sur le pourcentage de la contraction volontaire maximale (% CVM) du grand pectoral.

Triceps

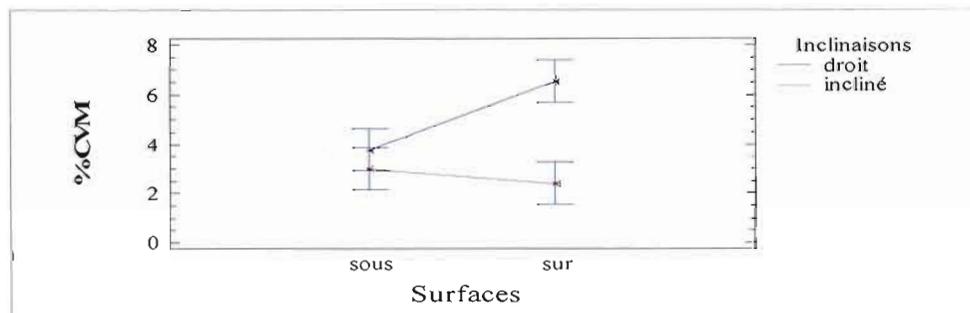


Figure A.8 L'effet d'interaction des variables de surfaces et d'inclinaisons sur le pourcentage de la contraction volontaire maximale (% CVM) du triceps.

Section du toit

Deltoïde antérieur

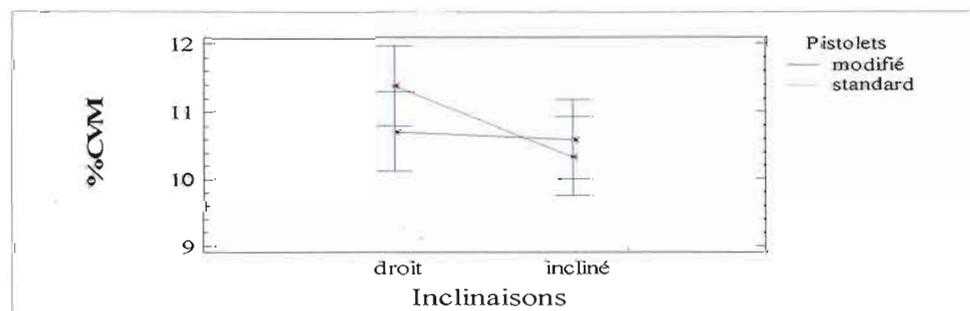


Figure A.9 L'effet d'interaction des variables d'inclinaisons et de pistolets sur le pourcentage de la contraction volontaire maximale (% CVM) du deltoïde antérieur.

ANNEXE B

BIBLIOGRAPHIE

- Aldien, Y. Welcome, D. Rakheja, S. Dong, R. Boileau, P.E. 2005. Contact pressure distribution at hand-handle interface: role of hand forces and handle size. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 35 (3) : 267-286.
- ASSTSAS. Bleau, J. 2005. Objectif prevention. Vol.28, No.3, 16-17.
- Armstrong, T.J. and Chaffin, D.B. 1979. Some biomechanical aspects of the carpal tunnel. *Journal of Biomechanics*, 12, 567-570.
- Armstrong, T.J. Silverstein, B. A. 1987. Upper-extremity pain in the workplace: role of usage in causality, *Clinical concepts in regional musculoskeletal illness* (Grune & Stratton, New York), 333-354.
- Barr, AE. Barbe, M. Clark, B. 2004. Work-related musculoskeletal disorders of the hand and wrist : Epidemiology, pathophysiology and sensorimotor changes. *J Orthop Sports Phys Ther.* 34 (10) : 610-627.
- Barry, BK. Enoka, RM. 2007. The neurobiology of muscle fatigue : 15 years later. *Integrative and Comparative Biology.* Vol.47, No.4, 465-473.
- Basmajian, JV. De Luca, CJ. 1985. *Muscles Alive* (5th edition), Williams and Wilkins, Baltimore, MD.
- Bobjer, O. Johansson, S.E. Piguët, S. 1993. Friction between hand and handle. Effects of oil and lard on textured and non-textured surfaces; perception of discomfort. *Applied Ergonomics*, 24 (3), 190-202
- Bjöksten, M. Jonsson, B. 1977. Endurance limit of force in long-term intermittent static contractions. *Scandinavian Journal of Work Environment and Health* 3. 23-27.
- Björing, G. Hägg, G. M. 2000. The ergonomics of spray guns – Users opinions and technical measurements on spray guns compared with previous recommendations for hand tools. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 25, 405-414.
- Cailliet, R. 1981. *Shoulder pain*. 2, ed. (F.A Davis Company, Philadelphia).
- CCHST. 1999. *Épicondylite (Tennis Elbow)*. Centre Canadien d'hygiène et de sécurité au travail.
- Chaffin, Don B. Andersson, Gunnar B.J. Martin, Bernard J. *OCCUPATIONAL BIOMECHANICS*, Fourth Edition, Wiley interscience publication, 2006.
- Chaffin, D.B. 1973. Localized muscle fatigue – definition and measurement. *Journal of Occupational Medecine*, 15 (4), 346-354.

Couture, L. 1986. Health problems related to standing. Commission de la santé et de la sécurité du travail du Québec (CSST), CREE. Report #86082901.

David, GC. 2005. Ergonomics methods for assessing exposure to risk factors for work-related musculoskeletal disorders. *Occupational Medicine*. 55 : 190-199.

Day, SJ. Hulliger, M. 2001. Experimental simulation of cat electromyogram: evidence for algebraic summation of motor-unit action potential trains. *J.Neurophysiol*. 86: 2144-2158.

Debabneh, A. Waters, T. 1999. The ergonomic use of hand tools: Guidelines for the practitioner. *Apply Occupational Environmental Hygiene*, 14 (4) : 208-215.

Degens, H. Erskine, RM. Morse, CI. 2009. Disproportionate changes in skeletal muscle strength and size with resistance training and ageing. *Musculoskeletal Neuronal Interact*. 9 (3) : 123-129.

Disselhorst, C. Schmitz-Rode, T. Rau, G. Surface electromyography and muscle force : Limits in sEMG-force relationship and new approaches for applications. 2009. *Clinical Biomechanics*, 24, 225-235.

East, J. Sood, D. 2005. Ergonomic guidelines for selecting hand and power tools. *Occupational Hazards*, 67 (12), 39-41.

Enoka, RM. Duchateau, J. 2008. Muscle fatigue : what, why and how it influences muscle function. *J Physiol*. 586 (1). 11-23.

Farina, D. Interpretation of the surface Electromyogram in dynamic contractions. 2006. *Exerc. Sport Sci. Rev.*, Vol.34, No.3, pp. 121-127.

Farina, D. Merletti, R. Enoka, RM. 2004. The extraction of neural strategies from the surface EMG. *J.Appl.Physiol*. 96: 1486-1495.

Fernandez, J.E. and Marley, R.J. 1998, *Applied Occupational Ergonomics: A text Book*. Kendall/Hunt, Dubuque, Iowa.

Fransson, C. Winkel, J. 1991. Hand strength: The influences of grip span and grip type. *Ergonomics*, 34 (7), 881-892.

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. « Risks of musculoskeletal injuries to the upper limbs of automotive repair workers in cars and truck garages – an exploratory study ». 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. Calgary (Al).

Godon, B. Crielaard, J.M. 2005. Syndrome des loges en traumatologie du sport. *Rev Med Liege*. 60 (2), 109-116.

Goldstein, M. 1994. EMG activity in muscles of pronation and ulnar deviation. *Journal Occupational Health Safety*, 10 (5), 458-460.

Grandjean, E. 1988. *Fitting the task to the man: A textbook of occupational ergonomics*. Philadelphia : Taylor and Francis.

Haahr, JP. Andersen, JH. 2003. Physical and psychosocial risk factors for lateral epicondylitis: a population based case-referent study. *Occupational Environ Med.* 60 : 322-329.

Hagberg, M. Silverstein, B. Wells, R. Smith, M. J. Hendrick, H. W. Carayon, P. Pérusse, M. 1995. *Work related musculoskeletal disorders (WMSDs): A reference book for prevention*, London, 421 p.

Harrington, JM. Carter, JT. Birrel, L. Gomptertz, D. 1998. Surveillance case definitions for work related upper limb pain syndromes. *Occup Environ Med.* 55 : 264-271.

Hazelton, F.T. Smidt, G.L. Flatt, A. E. Stephens, R. I. 1975. The influence of wrist position on the force produced by the finer flexors. *Journal of Biomechanics*, 8, 301-306.

Henneman, E., Clamann, H. P., Gillies, J. D. and Skinner, R. D. 1974. Rank order of motoneurons within a pool: law of combination. *J. Neurophysiol.* 37, 1338-1349.

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.

Kuorinka, I. Jonsson, B. Kilbom, A, et al. 1987. Standardized Nordic questionnaires for the analyses of musculoskeletal symptoms. *Appl Ergon.* 18 : 233-237.

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 comparison of industrial spray paint guns. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 19, 425-435.

- Lowery, MM. Stoykov, NS. Kuiken, Todd A. 2002. A simulation study to examine the use of cross-correlation as an estimate of surface EMG cross talk. *J.Appl.Physiol.* 94 : 1324-1334.
- Magora, A. 1972. Investigation of the relation between low back pain and occupation. *Ind Med.* 41 : 5-9.
- Mangun, GR. Mulkey, RM. Young, BL. Goslow, GE. 1986. « Cross-talk » in electromyograms contamination of EMGs recorded with bipolar fine-wire electrodes by volume conducted myoelectric activity from distant sources. *Electromyogr.Clin.Neurophysiol.* 26 : 113-161.
- 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.
- Mathiassen, S. E. Winkel, J. Hagg, G. M. 1994. Normalization of surface EMG amplitude from the upper trapezius muscle in ergonomis studies - A review. *J. Electromyogr. Kinesiol.* Vol.5, No.4, pp. 197-226.
- McARDLE, W. Katch, F. Katch, V. *PHYSIOLOGIE DE L'ACTIVITÉ PHYSIQUE : ÉNERGIE, NUTRITION ET PERFORMANCE.* 4^{ième} édition, Éditions Maloine, 2001.
- McAtamney, L. And Corlett, E.N. 1993. RULA : A survey method for investigation of work-related upper limb disorders. *Applied Ergonomics*, 24 (2), 91-99.
- 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 Occupationnal 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.
- Mital, A. Kilbom, A. 1992a. Design selection and use of hand tools to alleviate trauma of the upper extremities. Part I – Guidelines for the practitioner. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 10, 1-5.

- Mital, A. Kilbom, A. 1992b. Design selection and use of hand tools to alleviate trauma of the upper extremities. Part II – The scientific basis (knowledge base) for the guide. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 10, 7-21.
- 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.
- Otis, JC. Jiang, CC. Wickiewicz, TL. Petersen, MG. Warren, RF. Santner, TJ. 1994. Changes in the moment arms of the rotator cuff and deltoide muscles with abduction and rotation. *J Bone Joint Surg Am.* 76 : 667-676.
- Park, GY. Lee, SM. Lee, MY. 2008. Diagnostic value of ultrasonography for clinical medial epicondylitis. *Arch Phys Med Rehabil.* 89 : 738-742.
- Pettersen, V. Westgaard, RH. 2005. The activity patterns of neck muscles in professional classical singing. *J Voice.* 19 : 238-251.
- Pohren C. 1992. Enquête sur la fréquence du syndrome du canal carpien aux postes de piquage. Rapport Préliminaire. *Arch Mal Prof.* 55 : 519-20.
- Punnett, L. Fine, LJ. 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.
- Reeves, N. D., Maganaris, C. N., Ferretti, G. and Narici, M. V. 2005. Influence of 90-day simulated microgravity on human tendon mechanical properties and the effect of resistive countermeasures. *J. Appl. Physiol.* **98**, 2278-2286.
- Riihimäki, H. Low-back pain, its origin and risks factors. 1991. *Scand F Work Environ Health.* 17 : 81-90.
- Rogier, M. Bionka, MA. Huisstede, BW. Burdorf, A. 2009. Associations between work-related factors and specific disorders at the elbow : a systemic literature review. *Rheumatology* ; 48, 528-536.
- Rohmert, W. 1968. Die Beziehung Zwischen Kraft und Ausdauer bei Statischer Muskelarbeit : Schriftenreihe Arbeitsmedizin, Sozialmedizin. *Arbeitshygiene*, 22 : 118. Stuttgart : A. W. Gentner Verlag.
- Rosager, S., Aagaard, P., Dyhre-Poulsen, P., Neergaard, K., Kjaer, M. and Magnusson, S. P. 2002. Load-displacement properties of the human triceps surae aponeurosis and tendon in runners and non-runners. *Scand. J. Med. Sci. Sports* 12, 90-98.
- Rouleau, A. Marchand, D. Giguère, D. Étude des contraintes physiques à l'épaule lors de l'application de peinture, dans le secteur des services à l'automobile. Étude exploratoire, Affiche Giguère-2, Montréal, IRSST, 2008, 1 page.

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.

Ryan, GA. 1989. The prevalence of musculoskeletal symptoms in supermarket workers. *Ergonomics.* 32 : 359-371.

Sanders, MJ. 1997. ed. *Management of Cumulative Trauma Disorders.* Boston, MA : Butterworth-Heinemann.

Sanger, Terrence.D. 2007. Bayesian filtering of myoelectric signals. *J.Neurophysiol.* 97 : 1839-1845.

Saxton, JM. 2000. A review of current literature on physiological tests and soft tissue biomarkers applicable to work-related upper limb disorders. *Health and Safety laboratory. Occup Med.* Vol.50, no.2, 121-130.

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.

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.

SENIAM, www.seniam.org.

Sjogaard, G. Kiens, B. Jorgensen, K. Saltin, B. 1988. Intramuscular pressure, EMG and blood flow during low-level prolonged static contraction in man. *Acta Physiol. Scand.,* 128, 475-484.

Sporrong, H. Palmerud, G. Herberts, P. 1995. Influences of handgrip on shoulder muscle activity. *Eur J Appl Physiol,* vol.71, 485-492.

Tanaka, MD. et al. 1988. Use of Workers compensation claims data for surveillance of cumulative trauma disorders. *Journal of Occupational Medicine,* 30 (6), 488-492.

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 mechanics : a descriptive study. *Occupational Medicine.* Vol.6, No.6, 407-413.

Wells, R. Norman, R. Neuman, P. Andrews, D. Frank, J. Shannon, H. Et al. 1997. Assessment of physical work load in epidemiologic studies: Common measurement metrics for exposure assessment. *Ergonomics*. 40 : 51-61.

Welsh, D.G. Segal, S. S. 1996. Muscle length directs sympathetic nerve activity and vasomotor tone in resistance vessels of hamster retractor. *Circulation research*, 79, 551-559.

Winkel, J. Westgaard, R. 1992. Occupational and individual risk factors for shoulder-neck complaints. Part II – The scientific basis (literature review) for the guide. *International Journal Ind Ergon*. 10 : 85-104.

Wirhed, R. *Anatomie et science du geste sportif*. Éditions Vigot, 1985.

Wren, T. A., Beaupre, G. S. and Carter, D. R. 1998. A model for loading-dependent growth, development, and adaptation of tendons and ligaments. *J. Biomech*. 31, 107-114.