

1997

Impact de l'utilisation des pistolets de soudage pourvus d'une buse d'aspiration sur l'activation musculaire des membres supérieurs, la perception psychophysique et la qualité des assemblages soudés

Yves Beauchamp
ÉTS

Denis Marchand
Université du Québec à Montréal

Michel Galopin
ÉTS

Marc Thomas
ÉTS

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

Citation recommandée

Beauchamp, Y., Marchand, D., Galopin, M. et Thomas, M. (1997). *Impact de l'utilisation des pistolets de soudage pourvus d'une buse d'aspiration sur l'activation musculaire des membres supérieurs, la perception psychophysique et la qualité des assemblages soudés* (Rapport n° R-152). IRSST.

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

**Impact de l'utilisation
des pistolets de soudage
pourvus d'une buse d'aspiration
sur l'activation musculaire
des membres supérieurs,
la perception psychophysique
et la qualité
des assemblages soudés**

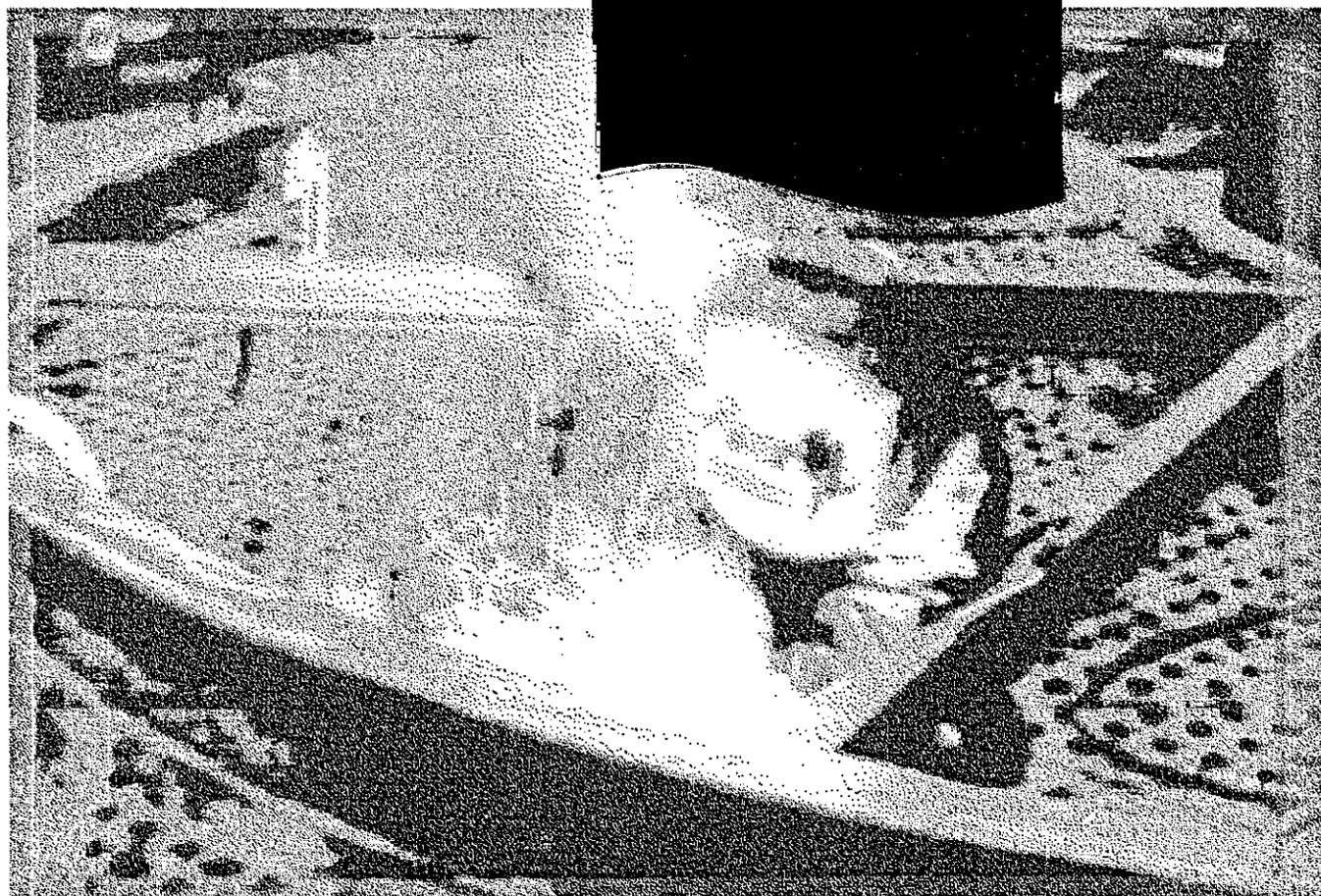
Yves Beauchamp
Denis Marchand
Michel Galopin
Marc Thomas

**ÉTUDES ET
RECHERCHES**

Février 1997

R-152

RAPPORT



IRSST
Institut de recherche
en santé et en sécurité
du travail du Québec

La recherche, pour mieux comprendre

L'Institut de recherche en santé et en sécurité du travail du Québec (IRSST) est un organisme de recherche scientifique voué à l'identification et à l'élimination à la source des dangers professionnels, et à la réadaptation des travailleurs qui en sont victimes. Financé par la CSST, l'Institut réalise et finance, par subvention ou contrats, des recherches qui visent à réduire les coûts humains et financiers occasionnés par les accidents de travail et les maladies professionnelles.

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

Les résultats des travaux de l'Institut sont présentés dans une série de publications, disponibles sur demande à la Direction des communications.

Il est possible de se procurer le catalogue des publications de l'Institut et de s'abonner à *Prévention au travail* en écrivant à l'adresse au bas de cette page.

ATTENTION

Cette version numérique vous est offerte à titre d'information seulement. Bien que tout ait été mis en œuvre pour préserver la qualité des documents lors du transfert numérique, il se peut que certains caractères aient été omis, altérés ou effacés. Les données contenues dans les tableaux et graphiques doivent être vérifiées à l'aide de la version papier avant utilisation.

Dépôt légal
Bibliothèque nationale du Québec

IRSST - Direction des communications
505, boul. de Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : (514) 288-1 551
Télécopieur: (514) 288-7636
Site internet : www.irsst.qc.ca
© Institut de recherche en santé
et en sécurité du travail du Québec,

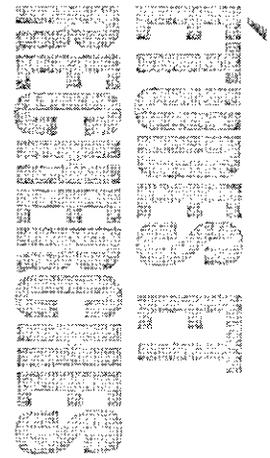
Impact de l'utilisation des pistolets de soudage pourvus d'une buse d'aspiration sur l'activation musculaire des membres supérieurs, la perception psychophysique et la qualité des assemblages soudés

Yves Beauchamp¹, Denis Marchand²,
Michel Galopin¹ et Marc Thomas¹

avec la collaboration de Nicole Goyer
Programme soutien analytique, IRSST

¹ École de Technologie supérieure

² Université du Québec à Montréal



RAPPORT

TABLE DES MATIÈRES

1.0	Introduction	1
2.0	Méthodologie.....	1
3.0	Sujets.....	2
4.0	Procédure générale.....	2
4.1	Généralité	2
4.2	Mesure du pourcentage d'utilisation musculaire (PUM)	2
4.3	Procédure expérimentale.....	3
4.4	Conditions de soudage et réglage de l'extraction des fumées	5
5.0	Analyse statistique des données	5
6.0	Résultats de l'étude.....	6
6.1	Évaluation psychophysique.....	6
6.1.1	Maniabilité du pistolet	6
6.1.2	Inconfort relié à l'utilisation du pistolet.....	7
6.1.3	Influence du pistolet sur la soudure.....	8
6.1.4	Appréciation globale du pistolet de soudage	10
6.1.5	Évaluation de la qualité de la soudure.....	11
6.2	Mesure du pourcentage d'utilisation musculaire.....	13
6.2.1	Biceps brachial de la main dominante	13
6.2.2	Biceps brachial de la main non dominante	15
6.2.3	Fléchisseur commun des doigts de la main dominante	17
6.2.4	Fléchisseur commun des doigts de la main non dominante	19
6.2.5	Long supinateur de la main dominante.....	21
6.2.6	Cubiteur antérieur de la main dominante	24
6.2.7	Deltoïde antérieur de la main dominante	26
7.0	Conclusions	29
	Limitation de l'étude en ce qui a trait aux valeurs PUM obtenues lors des essais	32
	Remerciements	32
	Annexe 1 Formulaire de consentement	
	Annexe 2 Grille d'évaluation psychophysique	
	Annexe 3 Grille d'évaluation de la qualité des joints de soudure	
	Annexe 4 Caractéristiques des pistolets de soudure évalués	
	Annexe 5 Évaluation acoustique des pistolets de soudage	

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Tableau ANOVA de l'appréciation subjective de la maniabilité du pistolet de soudage	6
Tableau 2	Tableau ANOVA de l'appréciation subjective de l'inconfort lors de l'utilisation du pistolet de soudage	8
Tableau 3	Tableau ANOVA de l'appréciation subjective de l'influence du pistolet sur la qualité de la soudure	9
Tableau 4	Tableau ANOVA de l'appréciation globale du pistolet de soudage.....	11
Tableau 5	Tableau ANOVA de l'évaluation de la qualité de la soudure	12
Tableau 6	Tableau ANOVA du pourcentage d'utilisation musculaire (PMU) du biceps brachial de la main dominante	13
Tableau 7	Tableau ANOVA du pourcentage d'utilisation musculaire du biceps brachial de la main non dominante.....	15
Tableau 8	Tableau ANOVA du pourcentage d'utilisation musculaire du fléchisseur communs doigts de la main dominante.....	17
Tableau 9	Tableau ANOVA du pourcentage d'utilisation musculaire du fléchisseur commun des doigts de la main non dominante.....	19
Tableau 10	Tableau ANOVA du pourcentage d'utilisation musculaire du long supinateur de la main dominante.....	22
Tableau 11	Tableau ANOVA du pourcentage d'utilisation musculaire du cubiteur antérieur de la main dominante.....	24
Tableau 12	Tableau ANOVA du pourcentage d'utilisation musculaire du deltoïde antérieur de la main dominante.....	27
Tableau 13	Sommaire des résultats de l'évaluation psychophysique.....	29
Tableau 14	Sommaire de l'évaluation électromyographique (EMG).....	30

LISTE DES FIGURES

Figure 1	Système de traitement des signaux EMG et d'acquisition des données.....	3
Figure 2	Soudeur réalisant une soudure dans la position 3G	4
Figure 3	Graphique de l'appréciation subjective de la maniabilité en fonction du type de pistolet et de la position de soudage (interaction P x O).....	7
Figure 4	Graphique de l'appréciation subjective de l'inconfort en fonction du type de pistolet et de la position de soudage (interaction P x O).....	8
Figure 5	Graphique de l'appréciation subjective de l'influence du pistolet sur la qualité de la soudure en fonction du type de pistolet utilisé.....	9
Figure 6	Graphique de l'appréciation subjective de l'influence du pistolet sur la soudure en fonction de la position de soudage.....	10
Figure 7	Graphique de l'appréciation subjective globale en fonction du type de pistolet utilisé.....	11
Figure 8	Graphique de l'évaluation de la qualité de la soudure en fonction de la position de soudage.....	12
Figure 9	Graphique du pourcentage d'utilisation musculaire du biceps brachial de la main dominante en fonction du type de pistolet utilisé.....	14
Figure 10	Graphique du pourcentage d'utilisation musculaire du biceps brachial de la main dominante en fonction de la position de soudage.....	14
Figure 11	Graphique du pourcentage d'utilisation musculaire du biceps brachial de la main dominante en fonction du type de pistolet et de la position de soudage (interaction P x O).....	15
Figure 12	Graphique du pourcentage d'utilisation musculaire du biceps brachial de la main non dominante en fonction de la position de soudage.....	16
Figure 13	Graphique du pourcentage d'utilisation musculaire du biceps brachial de la main non dominante en fonction du type de pistolet et de l'orientation du joint de soudage (interaction PxO).....	16
Figure 14	Graphique du pourcentage d'utilisation musculaire du fléchisseur commun des doigts de la main dominante en fonction du type de pistolet utilisé.....	18
Figure 15	Graphique du pourcentage d'utilisation musculaire du fléchisseur commun des doigts de la main dominante en fonction de la position de soudage.....	18
Figure 16	Graphique du pourcentage d'utilisation musculaire du fléchisseur commun des doigts de la main dominante en fonction du type de pistolet et de la position de soudage (interaction PxO).....	19
Figure 17	Graphique du pourcentage d'utilisation musculaire du fléchisseur commun des doigts de la main non dominante en fonction du type de pistolet utilisé.....	20
Figure 18	Graphique du pourcentage d'utilisation musculaire du fléchisseur commun des doigts de la main non dominante en fonction de la position de soudage.....	20
Figure 19	Graphique du pourcentage d'utilisation musculaire du fléchisseur commun des doigts de la main non dominante en fonction du type de pistolet et de la position de soudage (interaction P x O).....	21
Figure 20	Graphique du pourcentage d'utilisation musculaire du long supinateur de la main dominante en fonction du type de pistolet utilisé.....	22
Figure 21	Graphique du pourcentage d'utilisation musculaire du long supinateur de la main dominante en fonction de la position de soudage.....	23
Figure 22	Graphique du pourcentage d'utilisation musculaire du long supinateur de la main dominante en fonction du type de pistolet et de la position de soudage (interaction P x O).....	23
Figure 23	Graphique du pourcentage d'utilisation musculaire du cubiteur antérieur de la main dominante en fonction du type de pistolet utilisé.....	25
Figure 24	Graphique du pourcentage d'utilisation musculaire du cubiteur antérieur de la main dominante en fonction de la position de soudage.....	25
Figure 25	Graphique du pourcentage d'utilisation musculaire du cubiteur antérieur de la main dominante en fonction du type de pistolet et de la position de soudage (interaction P x O).....	26
Figure 26	Graphique du pourcentage d'utilisation musculaire du deltoïde antérieur de la main dominante en fonction du type de pistolet utilisé.....	27

Figure 27	Graphique du pourcentage d'utilisation musculaire du deltoïde antérieur de la main dominante en fonction de la position de soudage.....	28
Figure 28	Graphique du pourcentage d'utilisation musculaire du deltoïde antérieur de la main dominante en fonction du type de pistolet et de la position de soudage (interaction P x O).	28

1.0 Introduction

Des pistolets de soudage de type MIG équipés de buses d'aspiration des fumées sont disponibles sur le marché mais sont peu utilisés. Les raisons majeures invoquées par les soudeurs sont la pénibilité du travail (inconfort, poids élevé, manipulation difficile pour certains angles) et la piètre qualité des soudures. Une étude a donc été entreprise afin d'évaluer l'influence des buses d'aspiration de pistolets de soudage GMAW¹ (MIG/MAG) sur l'activité musculaire des principaux muscles impliqués dans la tâche, la perception psychophysique chez les soudeurs et la qualité des assemblages réalisés dans des positions variées.

2.0 Méthodologie

Des évaluations expérimentales portant sur l'utilisation de cinq (5) différents pistolets de soudage au GMAW (voir l'annexe 4 pour les caractéristiques) ont été réalisées dans des conditions réelles de travail (soudage d'un assemblage en T) dans le laboratoire de soudage de l'ÉTS. Les variables explicatives retenues étaient les suivantes:

- Pistolet de soudage (5) :
 - BERNARD_{air} (avec buse d'aspiration)
 - BERNARD
 - BINZEL_{air} (avec buse d'aspiration)
 - BINZEL
 - AIR MIG (avec buse d'aspiration)
- Position de soudage (3) :
 - horizontale (2G)
 - verticale (3G)
 - au plafond (4G)

Pour la planification des essais expérimentaux, nous avons utilisé un plan factoriel complet de la forme 5 x 3 x 2; c'est-à-dire, cinq (5) pistolets de soudage, trois (3) positions de soudage et deux (2) répétitions par sujet. Au total, 300 essais ont été réalisés par l'ensemble des dix soudeurs participants, soit 30 essais par soudeur.

Les variables expliquées retenues étaient les suivantes :

- le pourcentage d'utilisation musculaire (PUM) de cinq muscles des membres supérieurs qui sont principalement sollicités lors de l'activité de soudage ;
- l'appréciation subjective de la maniabilité du pistolet, de l'inconfort perçu et de l'influence du pistolet sur le soudage ;
- la qualité des joints de soudure réalisés au cours des essais.

Des soudeurs d'expérience ont réalisé une soudure d'angle sur un assemblage en T (ce type de soudure représente près des deux tiers des soudures réalisées dans l'industrie) dans trois positions de soudage différentes : horizontale (2G), verticale (3G) et au au plafond (4G). Un banc d'essai a été spécialement conçu de façon à pouvoir changer rapidement la position de soudage d'une condition expérimentale à l'autre.

¹ GMAW : Gas Metal Arc Welding; MIG : Metal Inert Gas; MAG : Metal Active Gas.

3.0 Sujets

Dix (10) soudeurs d'expérience ont participé aux essais qui ont été réalisés dans le laboratoire de soudage de l'ÉTS. Mentionnons que huit d'entre eux étaient à l'emploi d'une compagnie de fabrication d'équipements de transport. L'âge des dix sujets variait entre 30 à 53 ans ($\bar{x} = 38.1$ ans; $s = 7.7$ ans) et leur expérience comme soudeur variait entre 3 à 35 ans ($\bar{x} = 14.6$ ans; $s = 10.4$ ans). Les sujets, tous volontaires, étaient rémunérés pour leur participation à l'étude.

4.0 Procédure générale

4.1 Généralité

Dès leur arrivée au laboratoire, chaque sujet devait signer un formulaire de consentement tel qu'approuvé par un comité de déontologie de l'ÉTS (annexe 1). La procédure générale prescrite était expliquée à chaque sujet. Par la suite, les électrodes de surface et les goniomètres étaient disposés sur la peau du sujet. Des essais préliminaires étaient réalisés avec chacun des pistolets afin de fixer les paramètres de soudage (e.g. vitesse de dévidage du fil et la tension de soudage) et de familiariser le sujet avec les divers pistolets, la nature des assemblages à souder et l'utilisation de la grille d'évaluation psychophysique (annexe 2).

4.2 Mesure du pourcentage d'utilisation musculaire (PUM)

L'activité musculaire de cinq (5) muscles était mesurée à l'aide d'électrodes de surface. Ces muscles sont : le **biceps brachial** de la main dominante et non dominante qui est responsable de la flexion du coude et de l'épaule; le **fléchisseur commun des doigts** de la main dominante et non dominante qui est responsable de la flexion des doigts et du poignet; le **long supinateur** qui est responsable de la flexion du poignet, de l'abduction du poignet et de l'extension du coude lorsque la main est en position neutre; le **cubiteur antérieur** qui est responsable de l'adduction et de la flexion du poignet ainsi que de la flexion du coude; le **deltoïde antérieur** qui est responsable de la flexion de l'épaule. Avant la pose des électrodes, la peau était lavée à l'aide d'un tampon imbibé d'alcool. Les électrodes de surface étaient disposées sur la partie médiane du muscle de façon à suivre l'orientation des fibres. Les signaux captés par les électrodes étaient pré-amplifiés à la peau (35 fois) et acheminés vers un amplificateur biologique (Therapeutic Instrument) (figure 1). Par la suite, les signaux étaient acheminés vers un convertisseur analogue 12 bits avant d'être enregistrés par un ordinateur. La fréquence d'échantillonnage des signaux était de 1 000 Hz. L'état brut des différents signaux recueillis était vérifié avant le début de la séance d'enregistrement dans le but de calibrer l'amplitude des signaux. Par la suite, les signaux enregistrés étaient rectifiés et filtrés à une fréquence de 6 Hz afin d'obtenir l'enveloppe linéaire du signal. De plus, les valeurs obtenues par électromyographie (EMG) étaient transformées en pourcentage d'utilisation musculaire (PUM) à partir des amplitudes EMG maximales obtenues suite à des contractions isométriques maximales volontaires effectuées par les soudeurs, pour chacun des muscles étudiés.



Figure 1 Système de traitement des signaux EMG et d'acquisition des données

La cinématique du mouvement du bras était évaluée par l'intermédiaire d'électrogoniomètres bi-axiaux montés sur des tiges flexibles. Ces électrogoniomètres étaient placés de façon à mesurer la flexion-extension du coude ainsi que l'abduction-adduction au niveau du poignet.

4.3 Procédure expérimentale

Pour chacun des cinq pistolets évalués, les sujets devaient effectuer une soudure d'angle sur un assemblage en T dans trois positions de soudage différentes : horizontale (2G), verticale (3G) et au au plafond (4G) (figure 2). Deux essais ont été répétés pour chacune des conditions expérimentales. Au total, chaque sujet a réalisé 30 essais comprenant une répétition de 15 conditions expérimentales différentes. Pour chacune des conditions expérimentales, le sujet devait souder l'assemblage avec l'un des pistolets dans l'une des trois positions pré-établies et ensuite, refaire les mêmes mouvements sans toutefois souder. Cette procédure s'est avérée nécessaire parce que les interférences électromagnétiques produites par le courant de soudage affectaient considérablement la qualité des signaux EMG. De cette façon, nous avons pu, d'une part souder des assemblages pour évaluer la qualité des soudures et, d'autre part, recueillir les signaux EMG nécessaires à l'évaluation de l'activité musculaire.

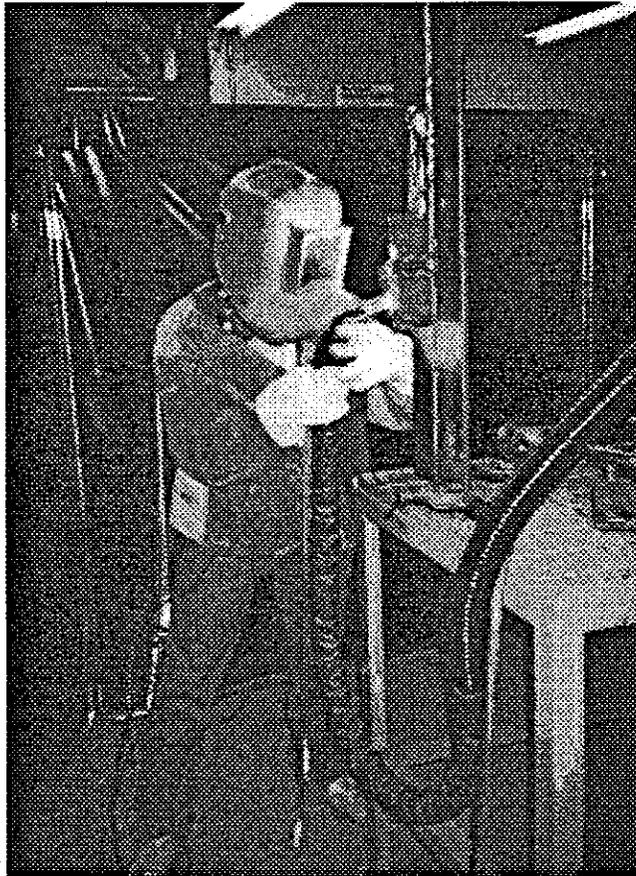


Figure 2 Soudeur réalisant une soudure dans la position 3G.

L'ordre de présentation des pistolets ainsi que l'ordre des essais correspondants ont été aléarisés pour chaque sujet.

Après chaque essai, les sujets devaient compléter une grille d'évaluation psychophysique (annexe 2). Une période de repos était également allouée entre les essais. La durée totale pour la réalisation des 30 essais était d'environ 3 heures par sujet. À la fin de l'expérimentation, chaque sujet devait se soumettre à une séance de travail réalisée sous la forme d'une entrevue semi-dirigée. Les principaux commentaires des sujets ont ainsi été recueillis. Par ailleurs, mentionnons que tous les signaux EMG ont été traités à l'aide d'un logiciel spécialisé.

Enfin, nous avons procédé à une évaluation de la qualité des 300 assemblages soudés au cours de l'étude. La qualité de chaque soudure était jugée principalement d'après son apparence, sa géométrie et son intégrité. Pour ce faire, nous avons demandé à un soudeur expert de porter un jugement de valeur sur la qualité de chaque soudure et de la quantifier globalement, à l'aide d'une échelle visuelle analogue (annexe 3) variant de « soudure de mauvaise qualité » à « soudure d'excellente qualité ». Tous les assemblages ont été codés de telle sorte que l'expert ne pouvait connaître a priori le pistolet utilisé et la position de soudage. De plus, les pièces ont été évaluées dans un ordre aléatoire.

4.4 Conditions de soudage et réglage de l'extraction des fumées

Le même mode opératoire a été utilisé pour l'ensemble des essais de soudage. Le métal d'apport utilisé était un fil en acier doux S6 (Hobart HB28) de diamètre 1.2 mm. Le gaz de protection était un mélange Ar-10% CO₂ (Mig-Or). Les assemblages en « T » étaient en acier laminé à chaud ASTM A36.

Le réglage de l'extraction des fumées pour chaque pistolet a été basé selon le jugement d'un expert en soudage. Ce réglage est resté fixe pour tous les essais. Il importe de mentionner que l'influence du réglage sur la qualité de soudure n'a pas été étudié puisque cela débordait le cadre du mandat qui nous avait été confié.

5.0 Analyse statistique des données

L'analyse de variance (ANOVA) est utilisée pour l'analyse des 300 essais expérimentaux effectués. L'ANOVA est appliquée à chacune des variables expliquées étudiées : l'appréciation subjective de la maniabilité du pistolet, de l'inconfort perçu et de l'influence du pistolet sur la soudure ; le pourcentage d'utilisation musculaire (PUM) de cinq muscles des membres supérieurs qui sont principalement impliqués dans l'activité de soudage ; la qualité des soudures réalisées au cours des essais telle qu'appréciée par un soudeur expert. L'ANOVA permet de vérifier les hypothèses suivantes :

- le type de pistolet de soudage GMAW n'a aucun effet sur les variables expliquées ;
- la position de soudage n'a aucune influence sur les variables expliquées ;
- le type de pistolet de soudage GMAW, quelque soit la position de soudage, n'a aucune influence sur les variables expliquées (interaction pistolet x position).

Un seuil de signification de 5% ($\alpha = 0.05$) est utilisé pour l'identification des effets influents.

6.0 Résultats de l'étude

6.1 Évaluation psychophysique

6.1.1 Maniabilité du pistolet

Les résultats de l'ANOVA (tableau 1) révèlent que le type de pistolet ($p < 0,00001$) et la position de soudage ($p < 0,0007$) influencent l'appréciation subjective de la maniabilité du pistolet lors du soudage. De plus, l'interaction entre le type de pistolet et la position de soudage ($P \times O$) est significative ($p < 0,0075$). La figure 1 présente l'interaction entre le type de pistolet et l'orientation de la pièce à souder. Nous constatons que les soudeurs trouvent les pistolets de marque Bernard et Binzel moins maniables lorsqu'ils sont munis d'une buse d'aspiration à la source (**Bernard_{air}** et **Binzel_{air}**), tandis que le pistolet **AirMig**, pourtant muni d'une buse d'aspiration, présente une maniabilité comparable aux modèles de pistolet sans buse d'aspiration. Par ordre décroissant d'appréciation de la maniabilité, nous notons les pistolets du type **Binzel**, **AirMig**, **Bernard**, **Bernard_{air}** et **Binzel_{air}**. De la figure 3, nous constatons aussi que la position de soudage influence l'appréciation subjective de la maniabilité uniquement dans le cas du pistolet **Bernard_{air}**. En effet, pour ce dernier type, nous observons qu'il est perçu moins maniable dans les positions verticale et au au plafond.

Tableau 1 Tableau ANOVA de l'appréciation subjective de la maniabilité du pistolet de soudage

Source de variation	dl ¹	SC ²	CM ³	F ⁴	(p <) ⁵
Sujet (S)	9	51029.4	5669.94		
Pistolet (P)	4	109862.0	27465.5	13.57	0.0000 *
pOosition (O)	2	2907.52	1453.76	11.05	0.0007 *
Répétition (R)	1	145.917	145.92	3.84	0.0817
P x O	8	2337.79	292.22	2.89	0.0075 *
Total	299	257809.0			

¹ dl : degrés de liberté : le nombre de degrés de liberté est une quantité, qui est toujours associée à une somme des carrés et représente généralement le nombre de termes indépendants dans le calcul de cette somme des carrés.

² SC: somme des carrés : la somme des carrés est la somme des écarts des valeurs observées par rapport à la moyenne de ces valeurs. Cette mesure est le numérateur dans le calcul de la variance de cette série de valeurs.

³ CM: carré moyen : dans une analyse de variance, une somme des carrés divisée par ses degrés de liberté correspondants constitue un carré moyen (ou variance).

⁴ F: la valeur observée F est une variable aléatoire continue issue du rapport entre le carré moyen d'une variable explicative ou d'une interaction et le carré moyen résiduel (erreur).

⁵ p< : p-value ou seuil descriptif du test statistique : c'est la probabilité pour que la quantité F (Fisher) soit supérieure ou égale à la valeur observée de F; $p(F \geq F_{\text{observé}})$. Si $p(F \geq F_{\text{observé}}) < 0.05$, on rejette l'hypothèse nulle H_0 voulant que la variable explicative ou l'interaction n'ait pas d'influence sur la variable expliquée.

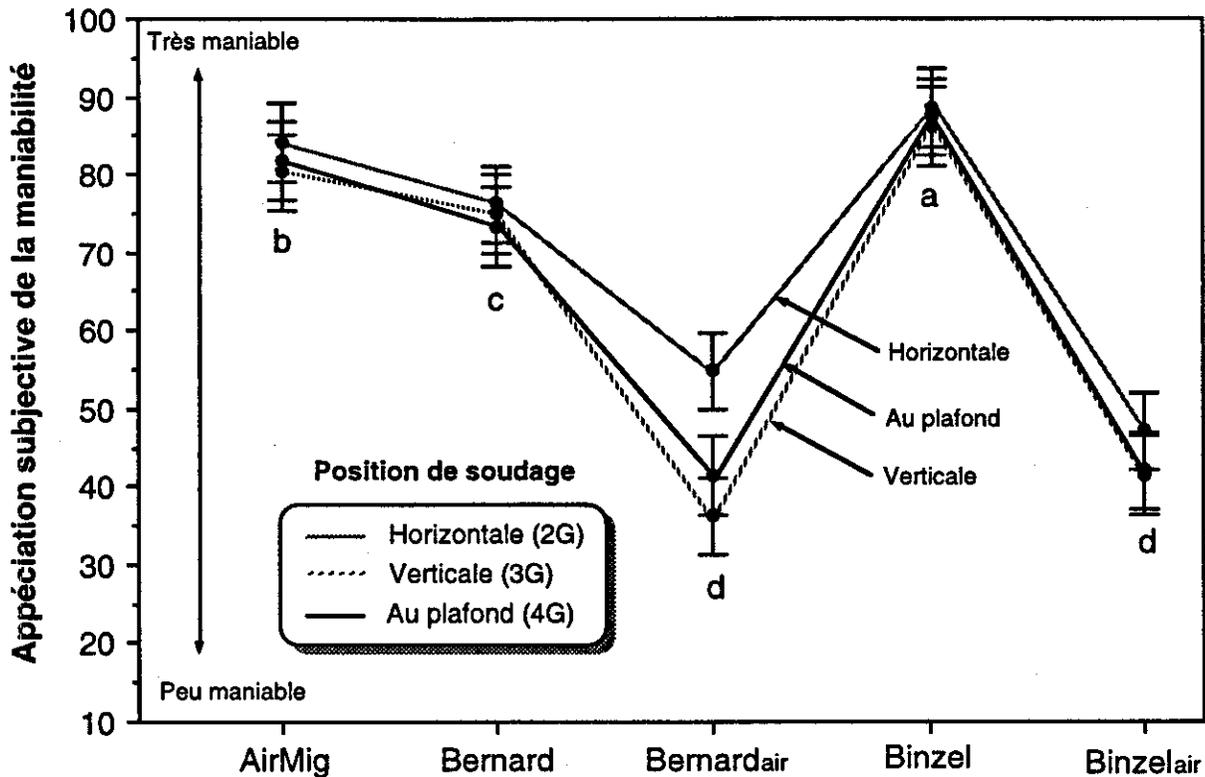


Figure 3 Graphique de l'appréciation subjective de la maniabilité en fonction du type de pistolet et de la position de soudage (interaction P x O)¹

6.1.2 Inconfort relié à l'utilisation du pistolet

L'analyse ANOVA de l'inconfort (tableau 2) met en évidence que le type de pistolet ($p < 0,00001$) et la position de soudage ($p < 0,0004$) influencent significativement l'appréciation subjective du niveau d'inconfort ressenti avec l'utilisation des différents type de pistolet. L'interaction entre le type de pistolet et la position de soudage (P x O) est également significative ($p < 0,0109$). La figure 4 révèle que les soudeurs trouvent les pistolets de marque Bernard et Binzel moins confortables (plus inconfortables) lorsqu'ils sont pourvus d'une buse d'aspiration à la source (**Bernard_{air}** et **Binzel_{air}**). Tout comme pour l'appréciation de la maniabilité, le pistolet **AirMig** apparaît aussi confortable à l'utilisation que les pistolets qui ne sont pas munis d'une buse d'aspiration. Du plus confortable à l'utilisation au moins confortable (plus inconfortable), les pistolets sont dans l'ordre suivant : **Binzel**, **AirMig**, **Bernard**, **Bernard_{air}** et **Binzel_{air}**. De la figure 4, il appert que la position de soudage influence l'appréciation subjective de l'inconfort uniquement dans le cas du pistolet **Bernard_{air}**. Comme pour la maniabilité, le pistolet **Bernard_{air}** est moins confortable dans les positions de soudage verticale et au au plafond.

¹ Les lettres (a, b, c, ...) utilisées dans la figure représentent le résultat du test de comparaison de moyennes (e.g. Newman-Keuls). Lorsque les lettres sont identiques cela dénotent que les niveaux correspondants de la variable explicative sont semblables.

Tableau 2 Tableau ANOVA de l'appréciation subjective de l'inconfort lors de l'utilisation du pistolet de soudage

Source de variation	dl	SC	CM	F	p <
Sujet (S)	9	43459.6	4828.85		
Pistolet (P)	4	109225.0	27306.4	15.62	0.0000 *
pOsition (O)	2	5550.96	2775.48	12.51	0.0004 *
Répétition (R)	1	23.42	23.42	0.42	0.5417
P x O	8	2299.04	287.38	2.73	0.0109 *
Total	299	243824.0			

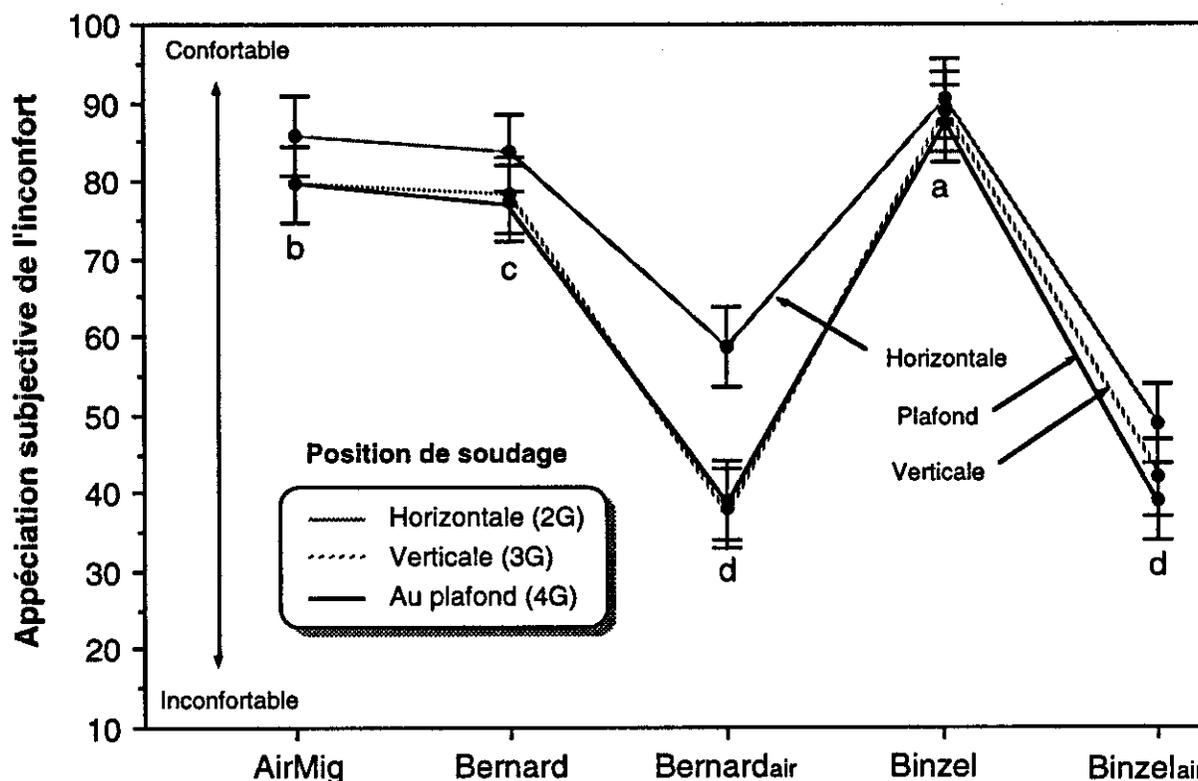


Figure 4 Graphique de l'appréciation subjective de l'inconfort en fonction du type de pistolet et de la position de soudage (interaction P x O).

6.1.3 Influence du pistolet sur la soudure

L'analyse ANOVA sur la qualité de la soudure (tableau 3) révèle que le type de pistolet ($p < 0,0144$) et la position de soudage ($p < 0,0007$) influencent l'appréciation subjective de l'influence du pistolet sur la qualité de la soudure effectuée. La figure 5 illustre la relation existant entre le type de pistolet utilisé et l'appréciation subjective de l'influence du pistolet sur la qualité de la soudure. De cette figure, nous constatons que les pistolets suivants : **AirMig**, **Bernard** et **Binzel** sont jugés équivalents du point de vue de l'appréciation de leur influence sur la qualité de la soudure. Par contre, les pistolets **Bernard_{air}** et **Binzel_{air}** sont jugés identiquement inférieurs du point de vue de leur influence sur la qualité de la

soudure. La figure 6 illustre l'influence de la position de soudage sur l'appréciation subjective de l'influence du pistolet sur la qualité de la soudure. Nous constatons que les trois positions conduisent à des niveaux différents d'appréciation subjective de la qualité de soudure. En moyenne, la position horizontale (2G) conduit à la meilleure perception de la qualité de la soudure, suivie des positions de soudage au plafond (4G) et verticale (3G).

Tableau 3 Tableau ANOVA de l'appréciation subjective de l'influence du pistolet sur la qualité de la soudure

Source de variation	dl	SC	CM	F	p <
Sujet (S)	9	46276.0	5141.77		
Pistolet (P)	4	13459.6	3364.9	3.60	0.0144 *
pOsition (O)	2	6516.82	3258.41	11.25	0.0007 *
Répétition (R)	1	190.061	190.06	1.04	0.3336
Total	299	129366.0			

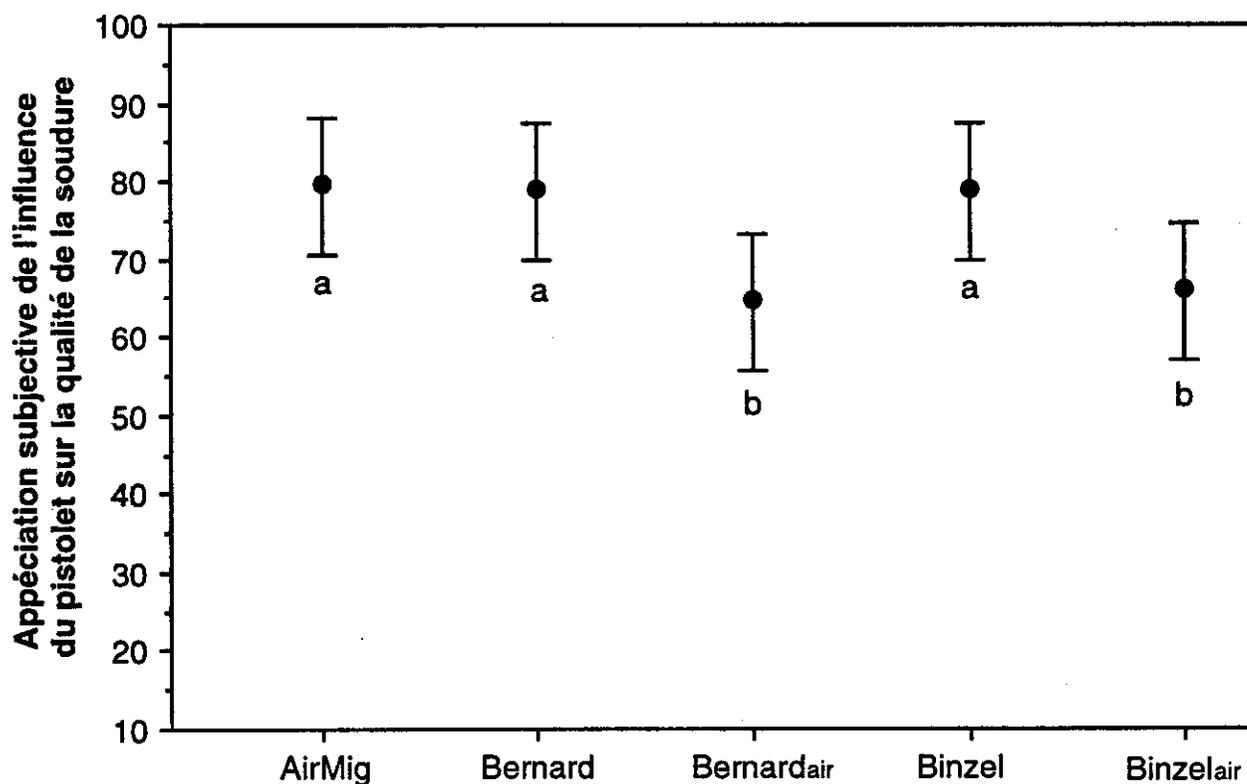


Figure 5 Graphique de l'appréciation subjective de l'influence du pistolet sur la qualité de la soudure en fonction du type de pistolet utilisé.

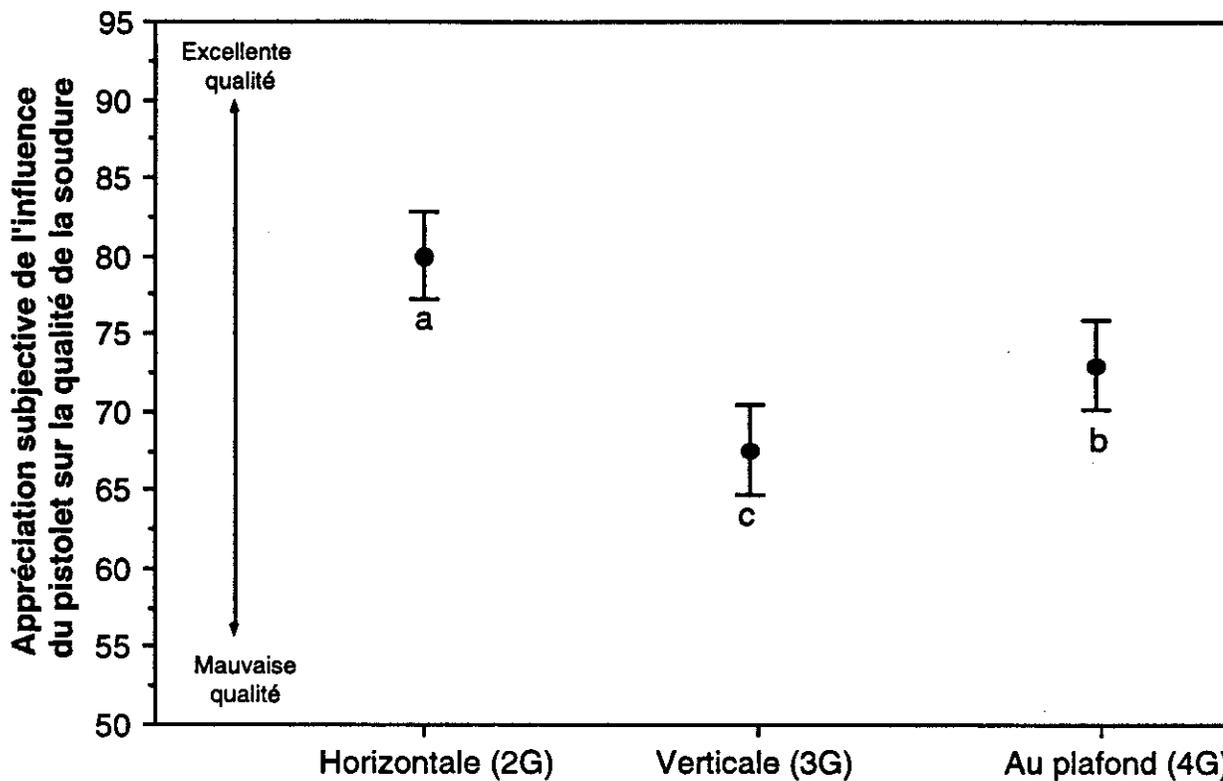


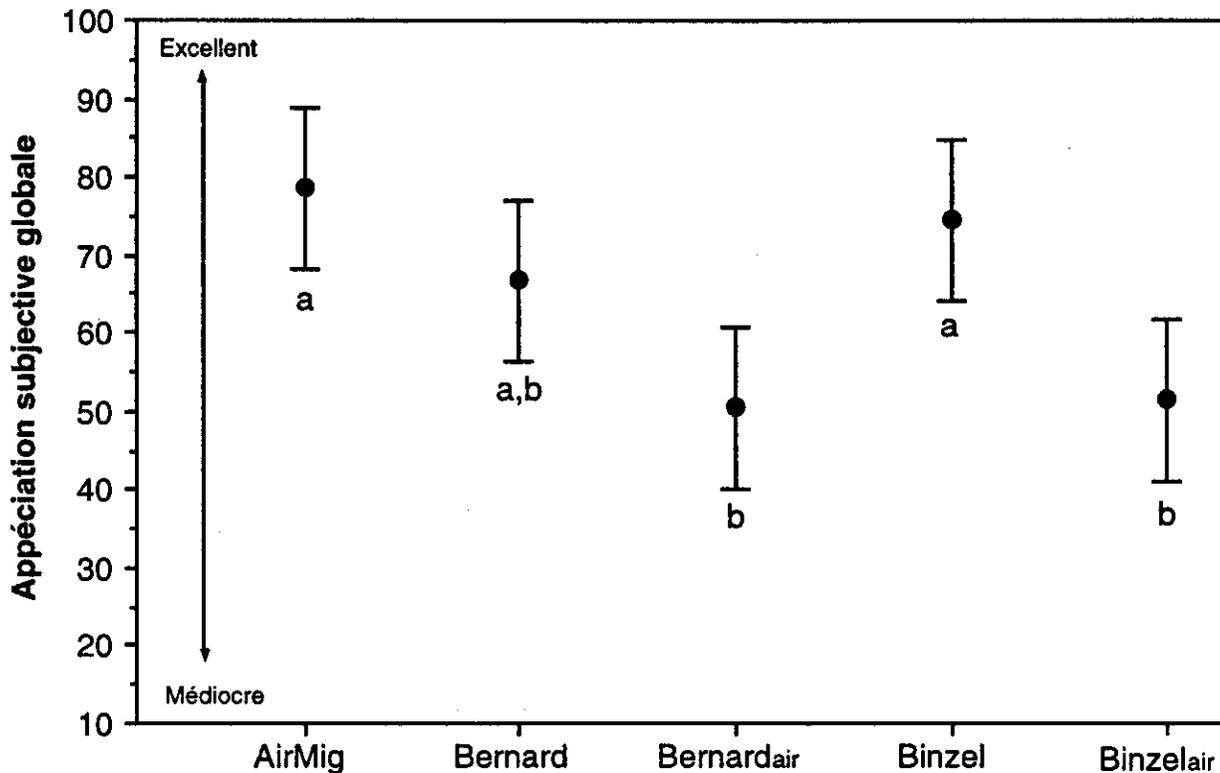
Figure 6 Graphique de l'appréciation subjective de l'influence du pistolet sur la soudure en fonction de la position de soudage.

6.1.4 Appréciation globale du pistolet de soudage

À la fin des essais, nous avons demandé aux sujets de donner leur appréciation globale de chacun des cinq pistolets évalués à l'aide d'une échelle visuelle analogue variant de « médiocre (0) » à « excellent (100) » (annexe 2). Les résultats de ces évaluations sont présentés au tableau 4. Nous remarquons que l'appréciation moyenne globale varie en fonction du type de pistolet employé ($p < 0,0018$). La figure 7 indique que les pistolets **AirMig**, **Bernard** et **Binzel**, obtiennent une appréciation globale équivalente mais, supérieure aux pistolets **Bernard_{air}** et **Binzel_{air}**. Le pistolet **Bernard** obtient une appréciation globale intermédiaire (figure 7).

Tableau 4 Tableau ANOVA de l'appréciation globale du pistolet de soudage

Source de variation	dl	SC	CM	F	p <
Sujet (S)	9	9295.37	1032.82		
Pistolet (P)	4	6352.43	1588.11	5.30	0.0018 *
Total	49	26437.9			

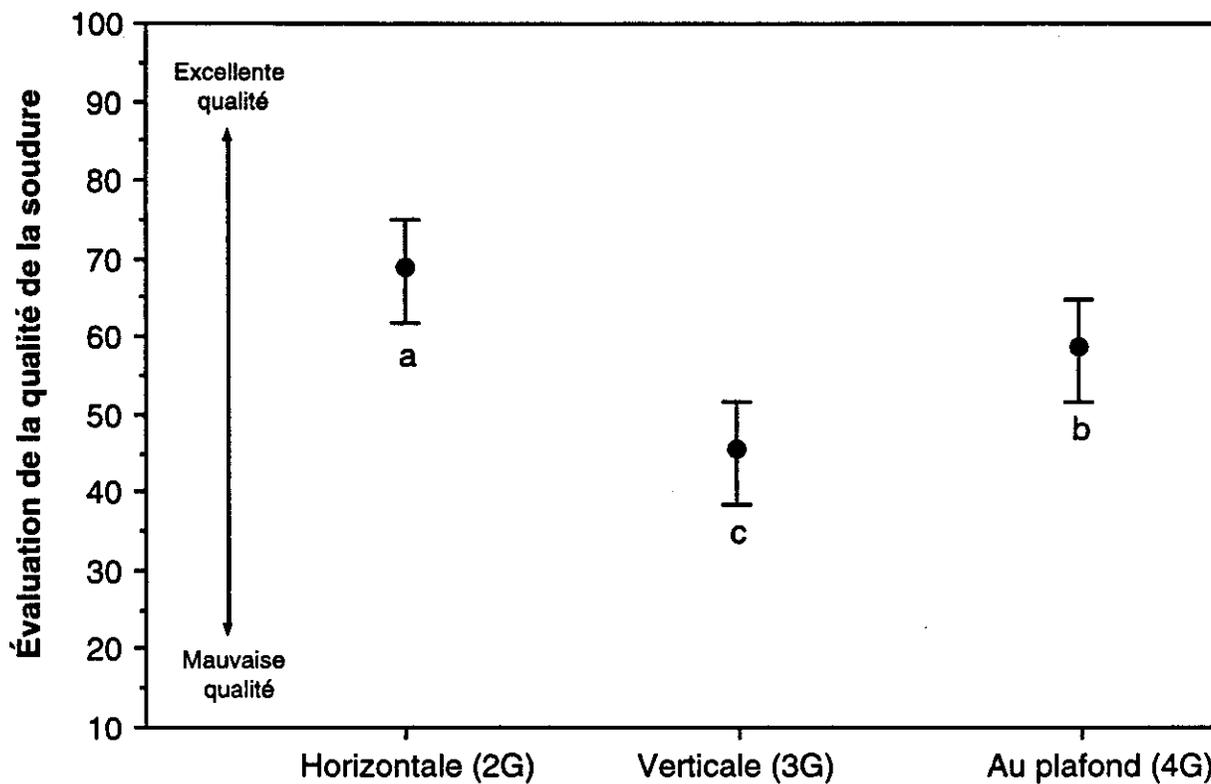
**Figure 7** Graphique de l'appréciation subjective globale en fonction du type de pistolet utilisé

6.1.5 Évaluation de la qualité de la soudure

Le tableau 5 présente les résultats de l'analyse de variance pour la variable expliquée «qualité de la soudure» telle qu'évaluée par un expert. Il ressort que la position de soudage influence la qualité de la soudure ($p < 0,0004$), tandis que le type de pistolet utilisé ne l'influence pas. La figure 8 montre l'influence de la position de soudage sur la qualité de la soudure. Nous constatons que les trois positions de soudage conduisent à des niveaux de qualité de la soudure significativement différents. En moyenne, la position horizontale (2G) conduit à la meilleure qualité de la soudure, suivie des positions au plafond (4G) et verticale (3G). Par ailleurs, il est intéressant de noter que la qualité de la soudure, telle qu'évaluée par un soudeur expert un mois après la fin des essais, est identique à l'appréciation subjective de l'influence du pistolet sur la qualité de la soudure, telle qu'évaluée par les soudeurs (figure 6).

Tableau 5 Tableau ANOVA de l'évaluation de la qualité de la soudure

Source de variation	dl	SC	CM	F	p <
Sujet (S)	9	38917.8	4324.2		
Pistolet (P)	4	1038.81	259.70	2.10	0.1010
pOsition (O)	2	26741.6	13370.8	12.76	0.0004 *
Répétition (R)	1	695.70	695.70	4.42	0.0649
Total	299	107182.0			

**Figure 8** Graphique de l'évaluation de la qualité de la soudure en fonction de la position de soudage.

6.2 Mesure du pourcentage d'utilisation musculaire

6.2.1 Biceps brachial de la main dominante (flexion du coude et de l'épaule)

Le tableau 6 présente les résultats de l'analyse ANOVA pour le pourcentage d'utilisation musculaire du biceps brachial de la main dominante. Nous constatons que le type de pistolet ($p < 0,00001$), la position de soudage ($p < 0,00001$) ainsi que l'interaction entre ces deux variables ($p < 0,0439$) influencent le pourcentage d'utilisation musculaire. Comme l'illustre la figure 9, les pistolets du type **AirMig** et **Binzel** conduisent à une activité musculaire du biceps brachial moins élevée que les autres types. Le pistolet **Bernard_{air}** requiert un pourcentage d'utilisation musculaire moyen plus élevé que les autres pistolets. Par ailleurs, il est intéressant de noter que la position de soudage horizontale (2G) conduit, au niveau du biceps brachial de la main dominante des soudeurs, à une plus forte activation musculaire (figure 10). En effet, dans la position 2G, nous avons constaté pour l'ensemble des sujets une légère extension du bras ($\approx 10^\circ$ à l'épaule) alors que l'avant-bras était parallèle au sol ($\approx 100^\circ$ de flexion au coude). Cette posture entraîne un moment de force important au niveau du coude, ce qui sollicite le biceps brachial. Par ailleurs, la position de soudage au plafond (4G) semble nécessiter un plus faible pourcentage d'utilisation musculaire pour ce muscle. En effet, pour cette position, l'angle de flexion du coude était d'environ 80° alors que celui de l'épaule était environ 45° . Cette posture occasionne donc un moment de force très faible au niveau du coude, ce qui explique la faible activation musculaire mesurée pour le biceps brachial de la main dominante. Dans cette position, le biceps agit principalement comme fléchisseur de l'épaule. Un examen plus détaillé de la figure 11 permet d'apporter certaines précisions sur les derniers constats énoncés. En effet, nous observons que l'utilisation du pistolet du type **Bernard_{air}** conduit à une augmentation plus marquée du pourcentage d'utilisation musculaire en position de soudage horizontale (2G). Par contre, le pourcentage d'utilisation musculaire n'est pas influencé par la position de soudage lorsque le pistolet du type **AirMig** est utilisé. Ces résultats peuvent être attribuables au faible poids du **AirMig** dans les trois positions (annexe 4). Enfin, les positions de soudage verticale (3G) et au plafond (4G) entraînent des pourcentages moyens d'utilisation musculaire comparables pour tous les types de pistolet évalués, sauf pour le **Binzel** qui apparaît conduire à une utilisation musculaire moindre.

Tableau 6 Tableau ANOVA du pourcentage d'utilisation musculaire (PMU) du biceps brachial de la main dominante

Source de variation	dl	SC	CM	F	p <
Sujet (S)	9	1606,51	178,50		
Pistolet (P)	4	83,82	20,95	15,21	0,0000 *
pOosition (O)	2	128,93	64,46	46,78	0,0000 *
Répétition (R)	1	9,41	9,41	6,83	0,0112 *
P x O	8	23,71	2,96	2,15	0,0439 *
Total	299	2940,77			

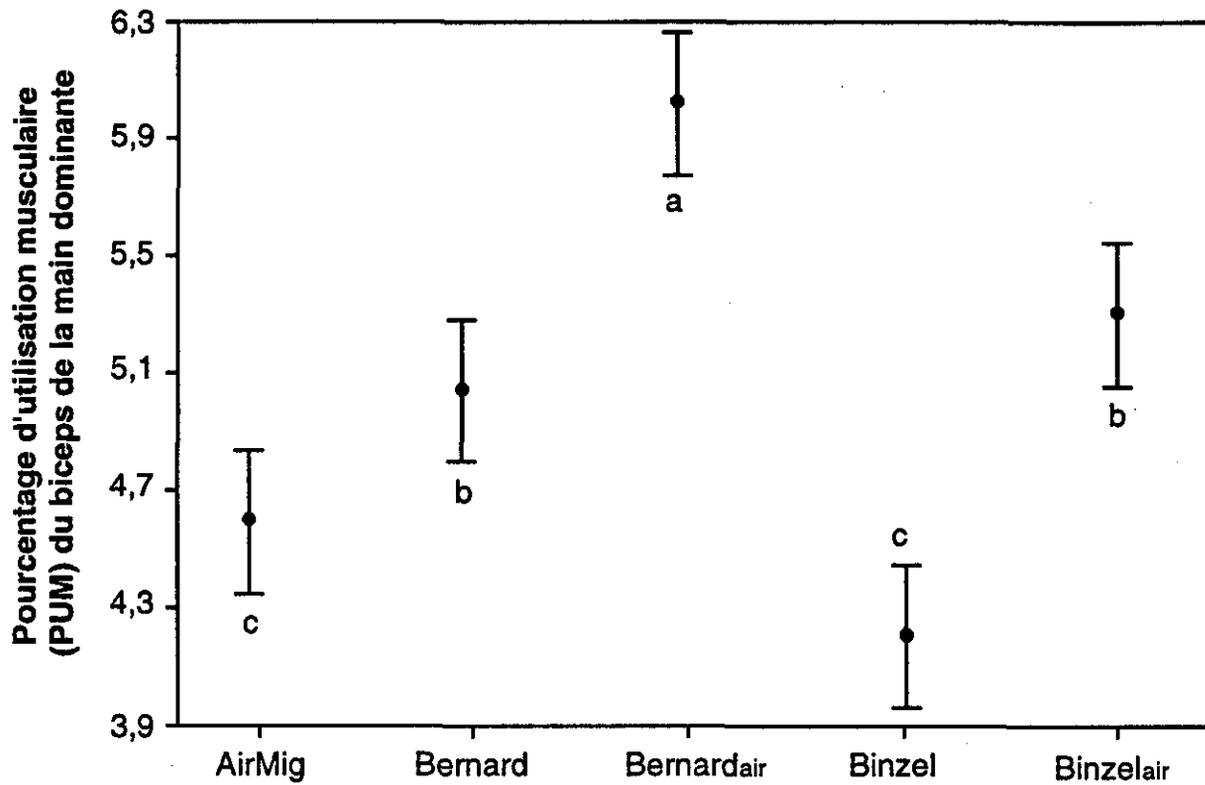


Figure 9 Graphique du pourcentage d'utilisation musculaire du biceps brachial de la main dominante en fonction du type de pistolet utilisé.

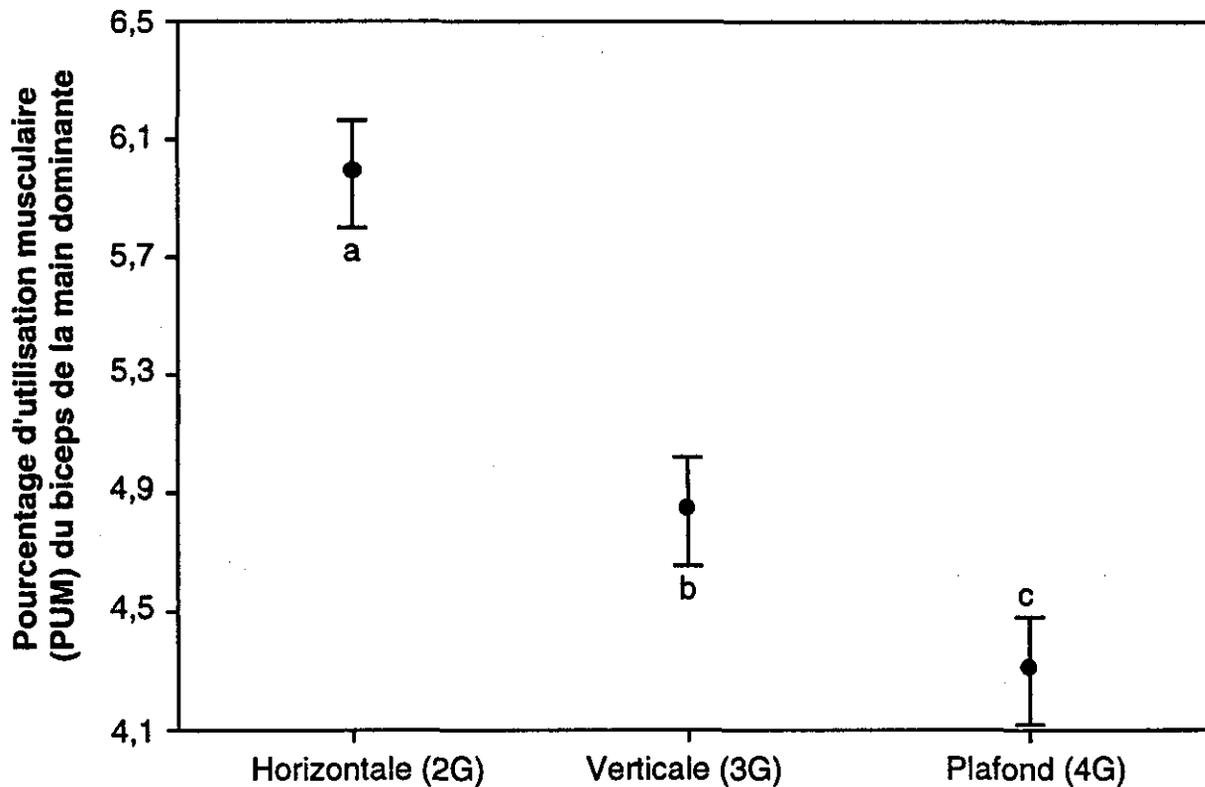


Figure 10 Graphique du pourcentage d'utilisation musculaire du biceps brachial de la main dominante en fonction de la position de soudage.

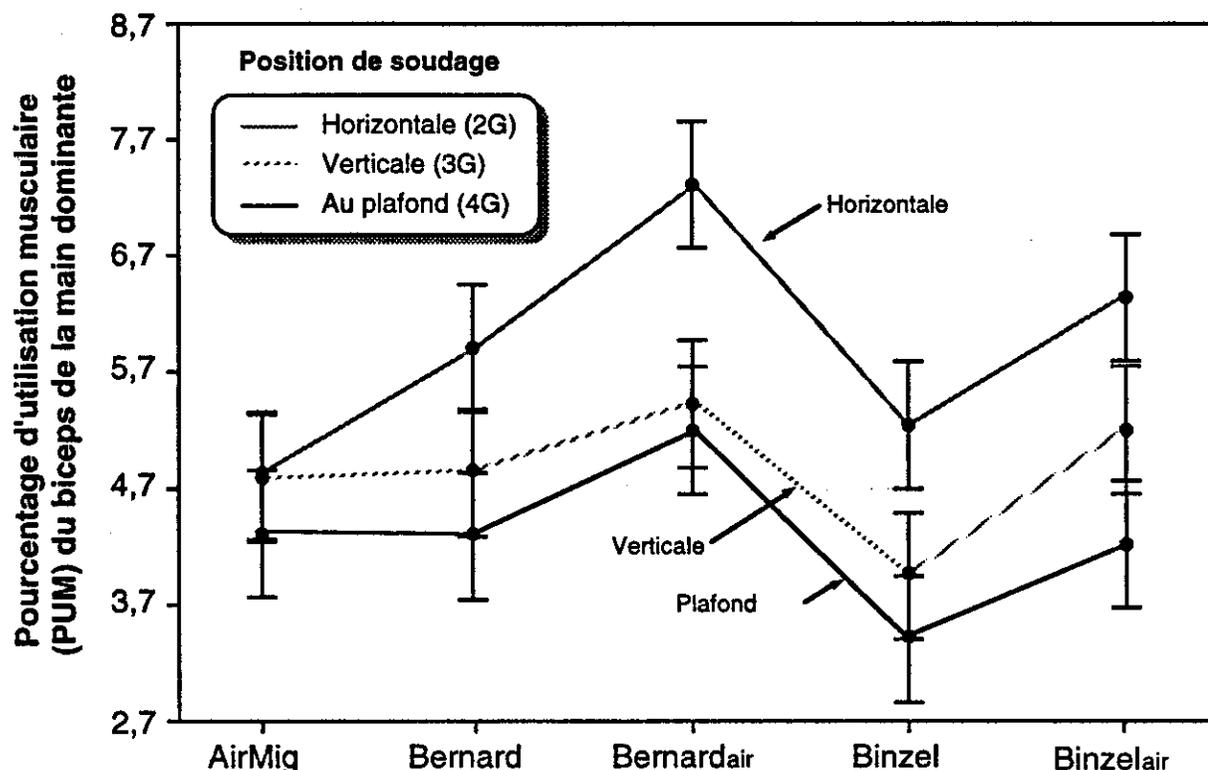


Figure 11 Graphique du pourcentage d'utilisation musculaire du biceps brachial de la main dominante en fonction du type de pistolet et de la position de soudage (interaction P x O).

6.2.2 Biceps brachial de la main non dominante (flexion du coude et de l'épaule) :

L'analyse du pourcentage d'utilisation musculaire du biceps brachial de la main non dominante révèle que la position de soudage ($p < 0,00001$) ainsi que l'interaction entre le type de pistolet et la position de soudage ($p < 0,0455$) sont significatives à un seuil de confiance de 5 % (tableau 7). La figure 12 montre que la position de soudage verticale (3G) conduit à un niveau moyen d'activation musculaire plus élevé, à l'exception du pistolet **Bernard_{air}** (figure 13), tandis que la position horizontale (2G) génère un niveau d'activation musculaire plus faible. Ce muscle joue donc un rôle important dans les déplacements du pistolet dans la position 3G. Il apparaît que le bras dominant stabilise la prise et que le bras non dominant assure le déplacement. Ces constats nous apparaissent plausibles compte tenu que la demande du fléchisseur commun de la main non dominante ne soit pas plus élevée dans la position verticale (voir figure 19).

Tableau 7 Tableau ANOVA du pourcentage d'utilisation musculaire du biceps brachial de la main non dominante

Source de variation	dl	SC	CM	F	p <
Sujet (S)	9	2046,78	227,42		
Pistolet (P)	4	10,58	2,64	1,15	0.3428
pOsition (O)	2	204,20	102,10	44,26	0.0000 *
Répétition (R)	1	1,34	1,34	0,58	0.4568
P x O	8	39,39	4,92	2,13	0.0455 *
Total	299	4334,88			

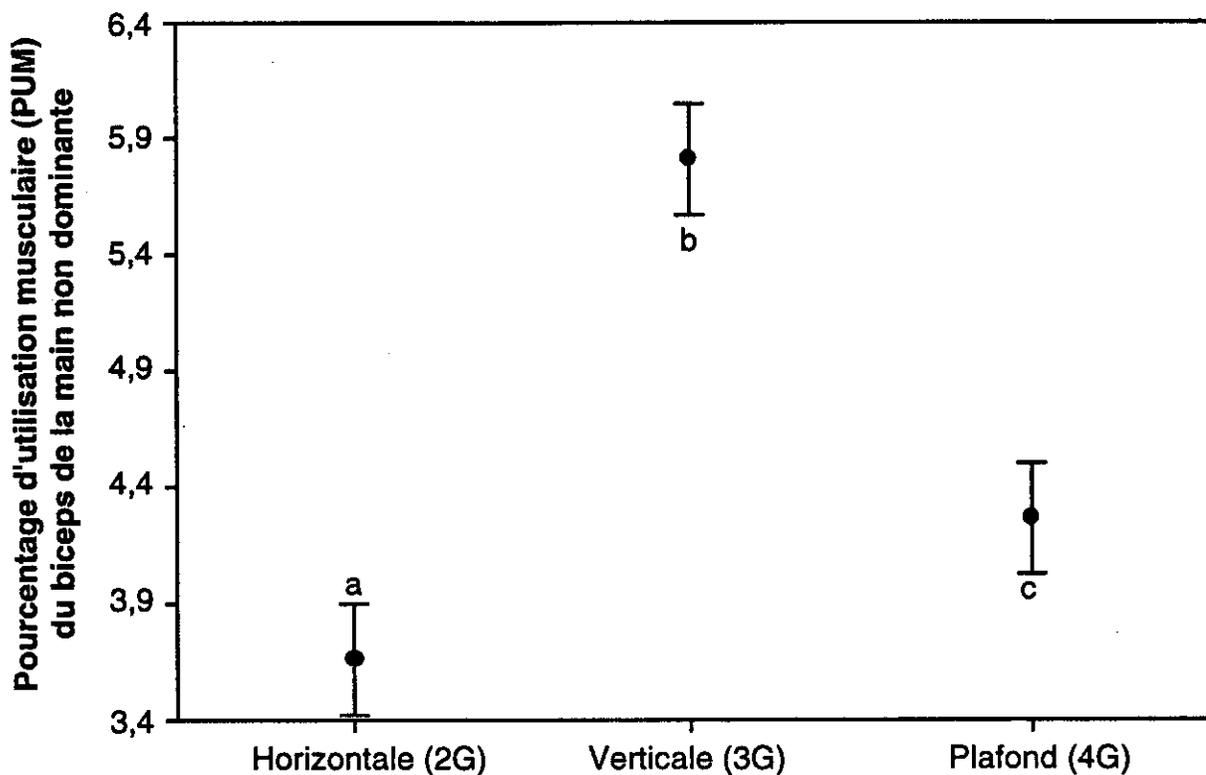


Figure 12 Graphique du pourcentage d'utilisation musculaire du biceps brachial de la main non dominante en fonction de la position de soudage.

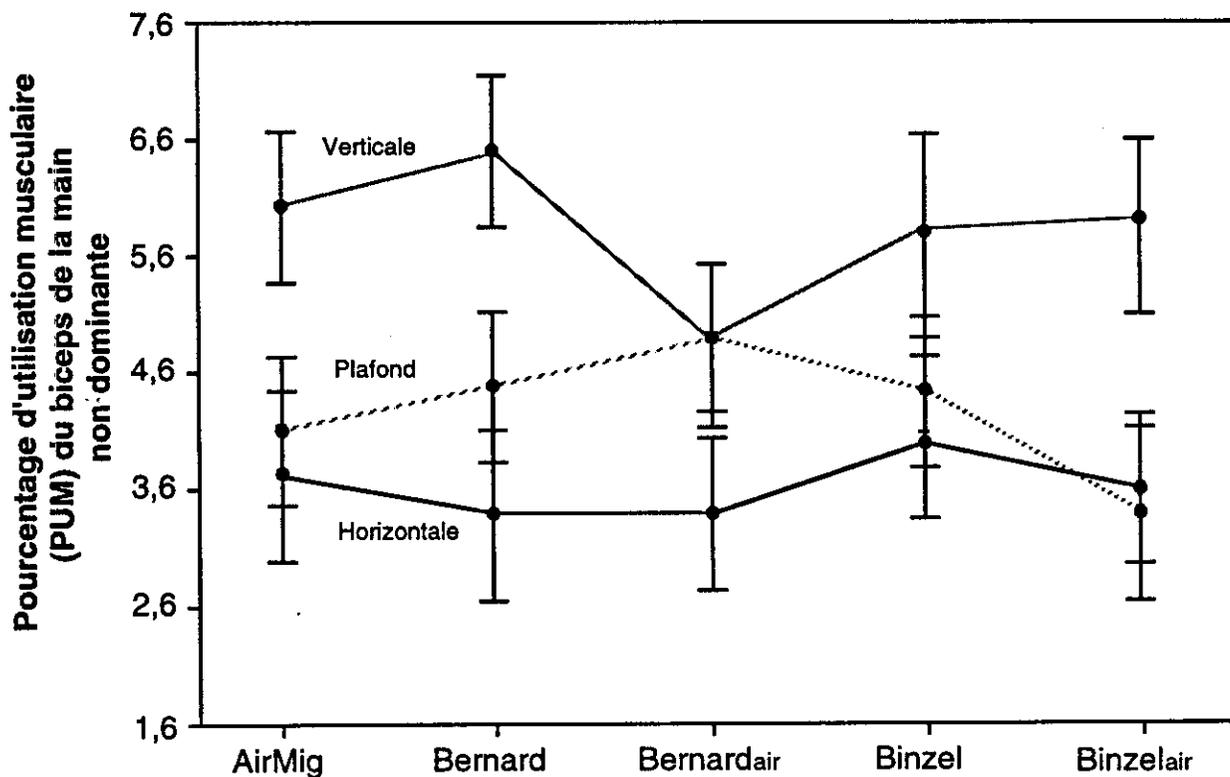


Figure 13 Graphique du pourcentage d'utilisation musculaire du biceps brachial de la main non dominante en fonction du type de pistolet et de l'orientation du joint de soudage (interaction PxO).

6.2.3 Fléchisseur commun des doigts de la main dominante (flexion des doigts et du poignet)

L'analyse de variance (ANOVA) au tableau 8 montre que le type de pistolet ($p < 0,00001$), la position de soudage ($p < 0,00001$) ainsi que l'interaction entre ces deux variables ($p < 0,0033$) affectent le pourcentage d'utilisation musculaire du fléchisseur commun des doigts de la main dominante. Comme le révèle la figure 14, les pistolets **AirMig** et **Binzel** entraînent un pourcentage moyen d'utilisation musculaire moins élevé que les autres pistolets. Nous constatons que le pistolet **AirMig** donne le pourcentage d'utilisation le plus faible de tous et que l'utilisation du **Binzel_{air}** requiert le pourcentage d'utilisation musculaire moyen le plus élevé. Ces résultats démontrent bien les avantages du pistolet **AirMig** dans les trois positions. Par ailleurs, la figure 15 révèle que la position de soudage horizontale (2G) entraîne, au niveau du fléchisseur commun des doigts de la main dominante, une activation musculaire nettement plus élevée. Les positions de soudage verticale (3G) et au plafond (4G) conduisent à des pourcentages moyens d'utilisation musculaire équivalents pour ce muscle. L'interaction significative observée entre le type de pistolet et la position de soudage est illustrée à la figure 16. Nous pouvons ainsi constater que l'utilisation du pistolet du type **AirMig** conduit à des pourcentages moyens d'utilisation musculaire identiques dans les trois orientations mais aussi plus faibles si on le compare aux autres pistolets. Dans l'ensemble, les résultats présentés à la figure 16 concordent avec les moments de force estimés pour chacun des pistolets (annexe 4). Ainsi, une portion plus importante de la force de préhension développée par ce muscle est utilisée pour balancer le moment de force engendré par la combinaison : position de soudage, pistolet et son faisceau. L'autre portion de la force développée par ce muscle correspond à la force exercée par le poids du pistolet. Par exemple, la demande musculaire moins importante observée avec l'utilisation du pistolet **AirMig** dans la position verticale est reliée au fait que le moment de force obtenu est pratiquement nul dans cette position. La force de préhension nécessaire pour assurer le maintien de ce pistolet dans la position verticale correspond donc au poids du pistolet lui-même.

Tableau 8 Tableau ANOVA du pourcentage d'utilisation musculaire du fléchisseur commun des doigts de la main dominante.

Source de variation	dl	SC	CM	F	p <
Sujet (S)	9	1126,29	125,14		
Pistolet (P)	4	62,92	15,73	27,58	0.0000 *
pOsition (O)	2	26,92	13,46	23,60	0.0000 *
Répétition (R)	1	3,56	3,56	6,25	0.0151 *
P x O	8	15,08	1,88	3,31	0.0033 *
Total	299	1724,45			

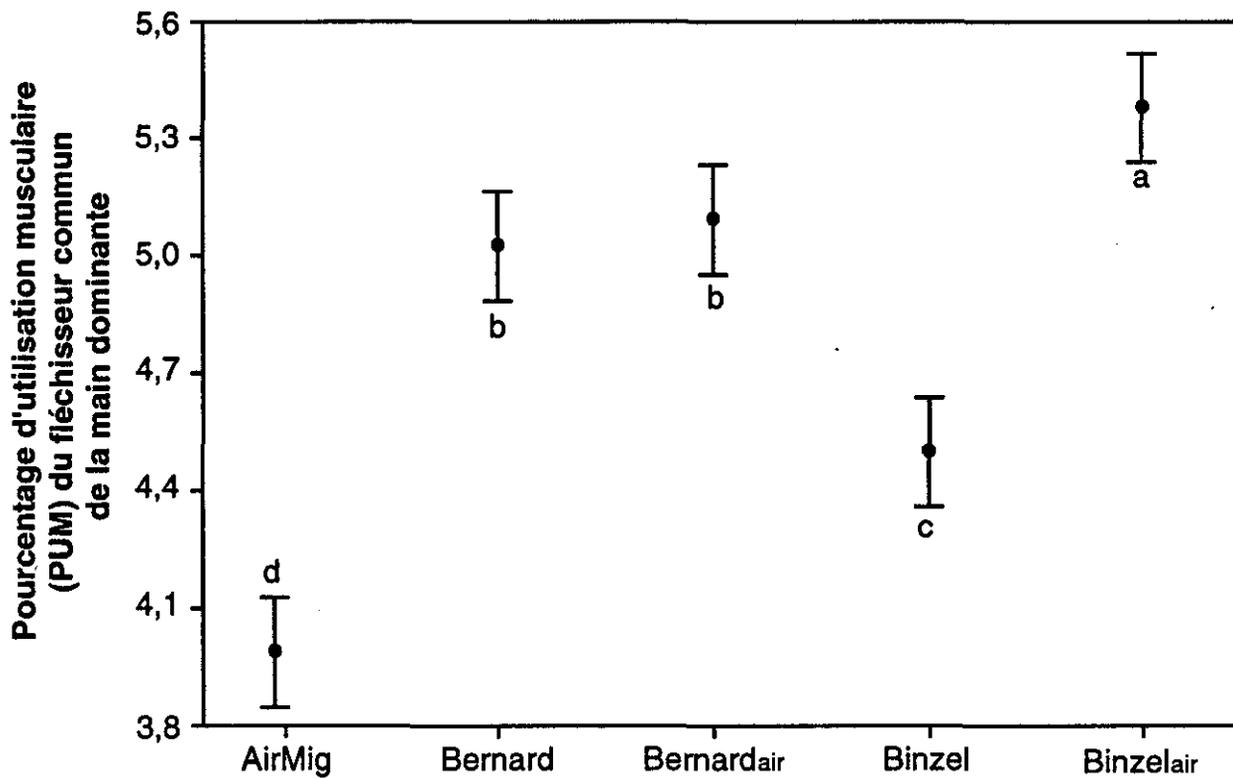


Figure 14 Graphique du pourcentage d'utilisation musculaire du fléchisseur commun des doigts de la main dominante en fonction du type de pistolet utilisé.

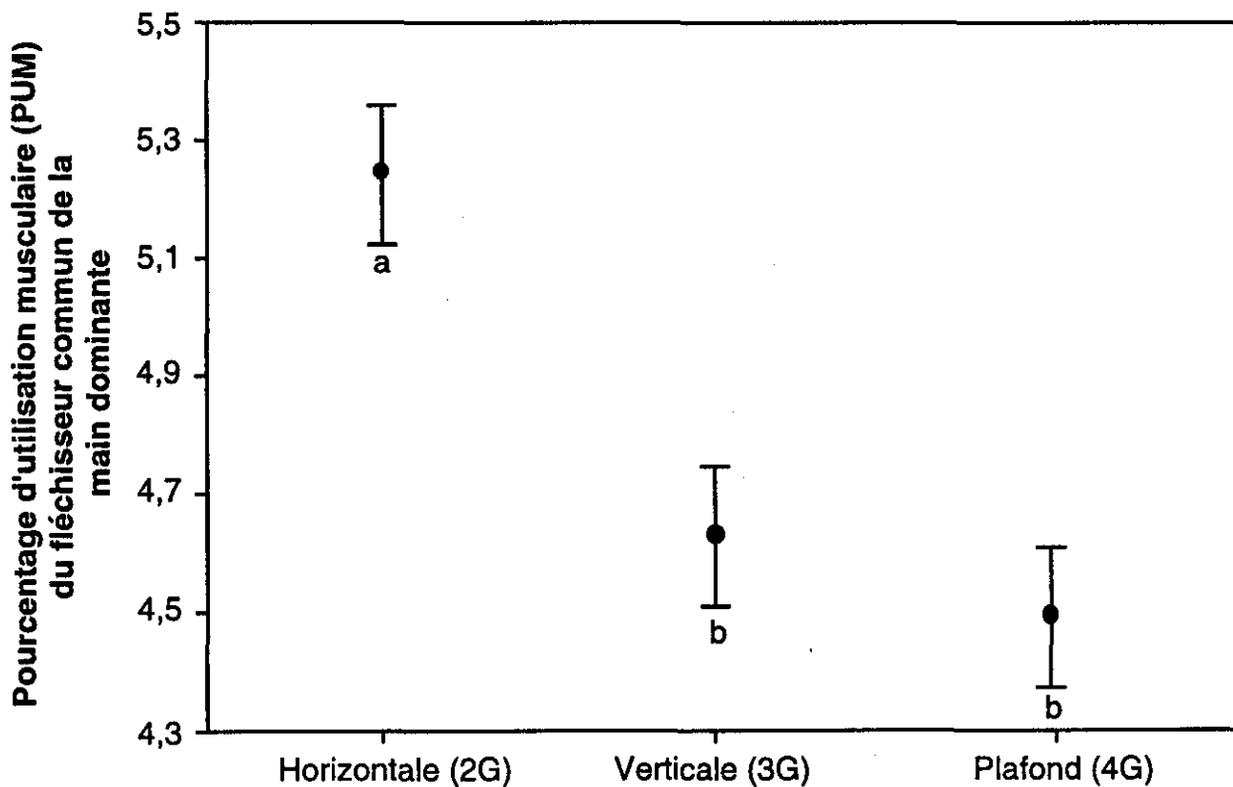


Figure 15 Graphique du pourcentage d'utilisation musculaire du fléchisseur commun des doigts de la main dominante en fonction de la position de soudage.

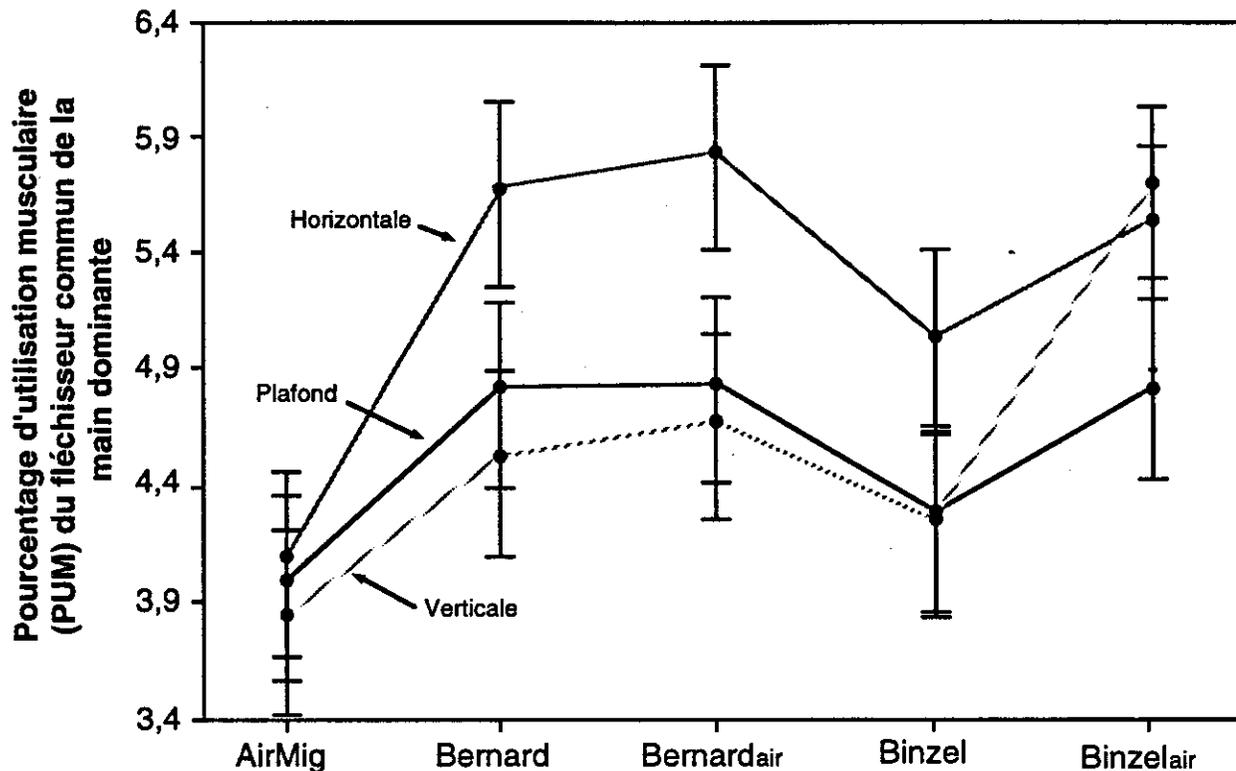


Figure 16 Graphique du pourcentage d'utilisation musculaire du fléchisseur commun des doigts de la main dominante en fonction du type de pistolet et de la position de soudage (interaction PxO).

6.2.4 Fléchisseur commun des doigts de la main non dominante (flexion des doigts et du poignet)

L'analyse de variance (ANOVA) du pourcentage d'utilisation musculaire du fléchisseur commun des doigts de la main non dominante révèle aussi que le type de pistolet ($p < 0,0456$), la position de soudage ($p < 0,0001$) et l'interaction double correspondante ($p < 0,0092$) sont significatifs au seuil de confiance 5 % (tableau 9). Comme le démontre la figure 17, les pistolets du type **AirMig** et **Bernard** entraînent des pourcentages moyens d'utilisation musculaire supérieurs aux autres types. De la figure 18, il ressort que les positions de soudage verticale (3G) et au plafond (4G) nécessitent une activation musculaire inférieure à la position horizontale (2G). Ce dernier constat, toutefois, ne s'applique pas aux pistolets du type **Binzel** et **Binzel_{air}**, lesquels présentent des pourcentages moyens d'utilisation comparables dans les trois positions (figure 19).

Tableau 9 Tableau ANOVA du pourcentage d'utilisation musculaire du fléchisseur commun des doigts de la main non dominante.

Source de variation	dl	SC	CM	F	p <
Sujet (S)	9	990,55	110,06		
Pistolet (P)	4	13,13	3,28	2,58	0.0456 *
pOsition (O)	2	27,76	13,88	10,92	0.0001 *
Répétition (R)	1	0,34	0,34	0,27	0.6125
P x O	8	28,97	3,62	2,85	0.0092 *
Total	299	1906,09			

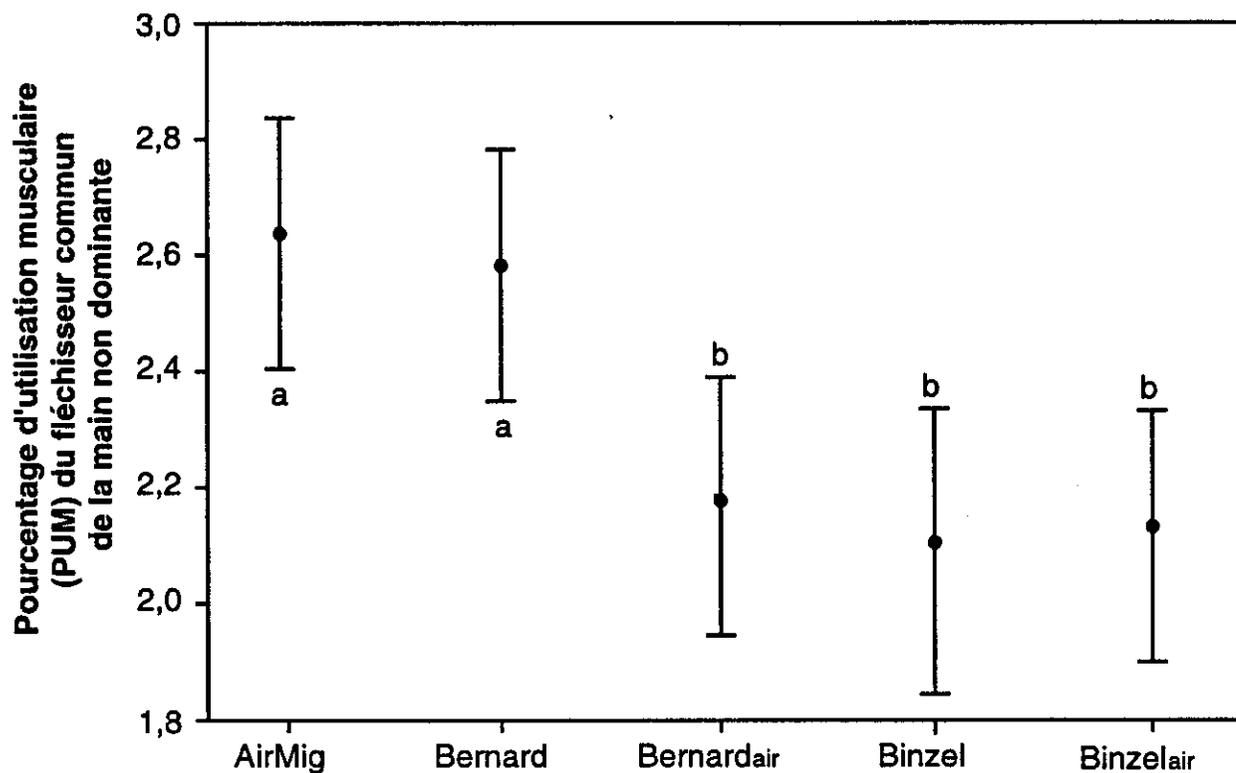


Figure 17 Graphique du pourcentage d'utilisation musculaire du fléchisseur commun des doigts de la main non dominante en fonction du type de pistolet utilisé.

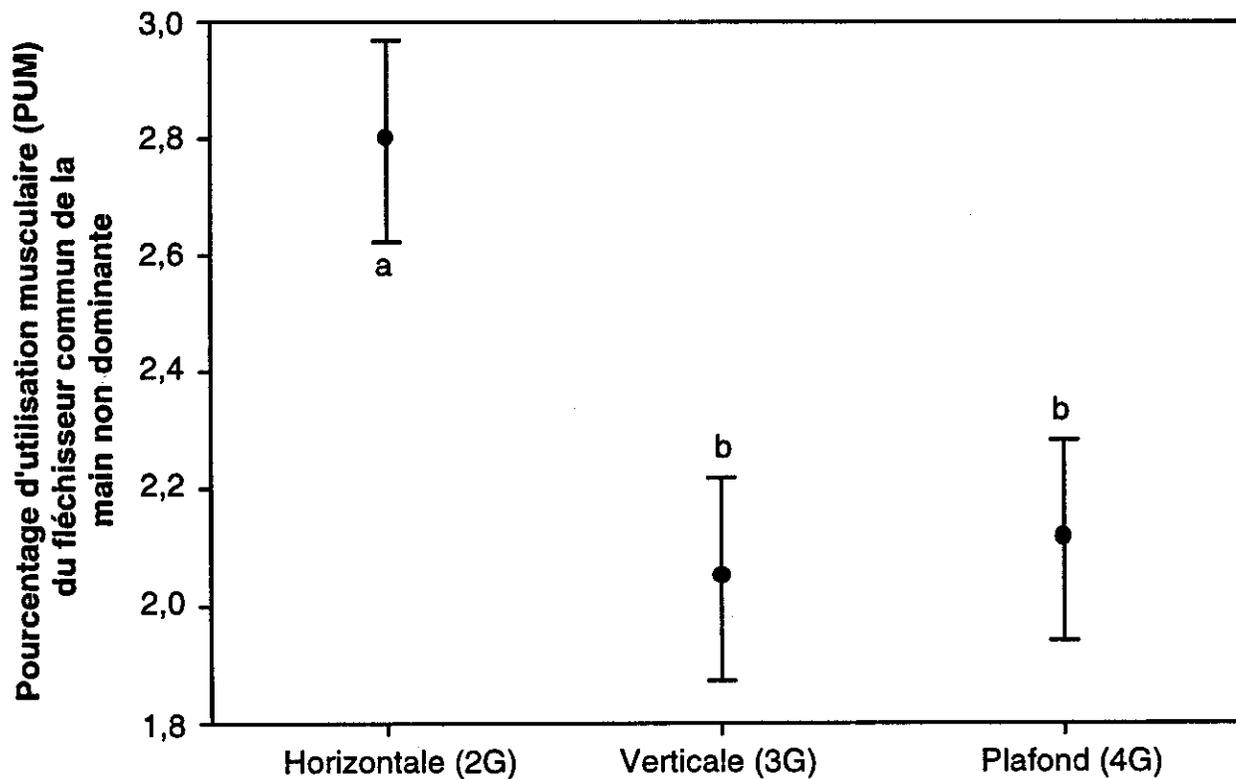


Figure 18 Graphique du pourcentage d'utilisation musculaire du fléchisseur commun des doigts de la main non dominante en fonction de la position de soudage.

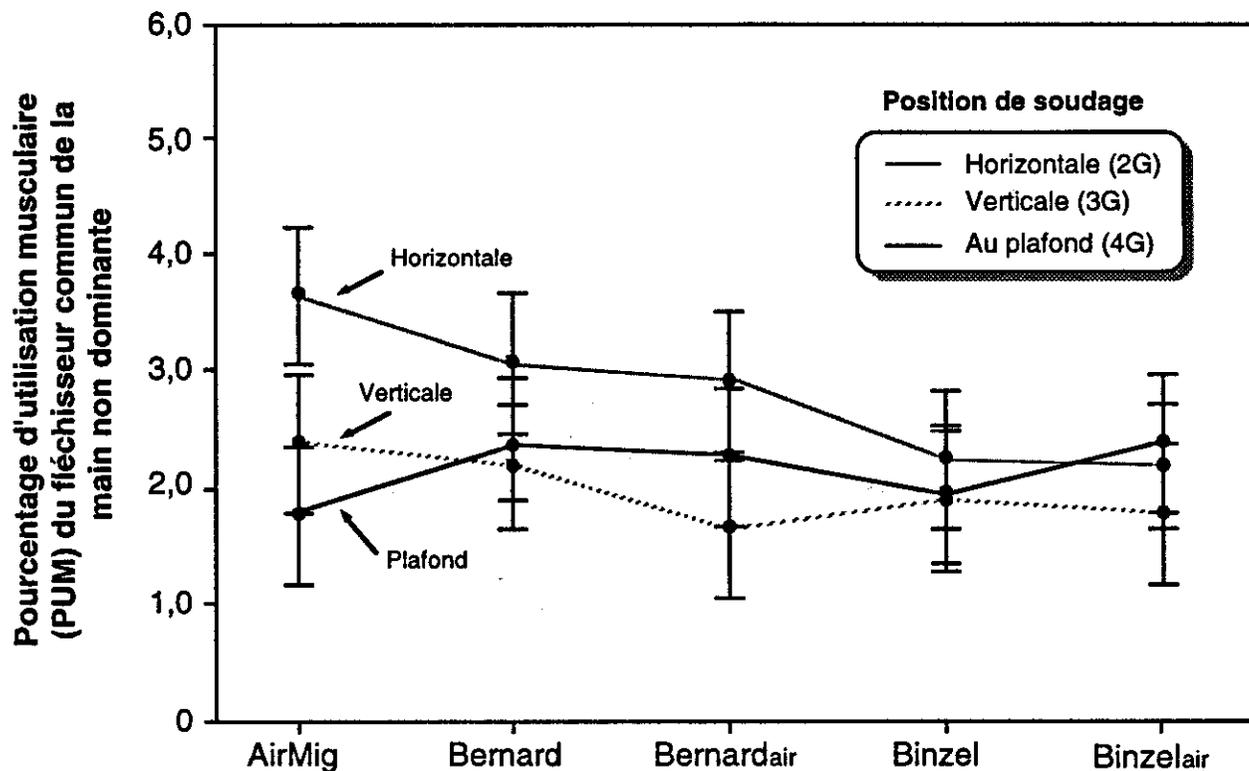


Figure 19 Graphique du pourcentage d'utilisation musculaire du fléchisseur commun des doigts de la main non dominante en fonction du type de pistolet et de la position de soudage (interaction P x O).

6.2.5 Long supinateur de la main dominante (flexion du poignet, abduction du poignet et extension du coude lorsque la main est en position neutre)

L'analyse de la variance (ANOVA) au tableau 10 révèle à nouveau que le type de pistolet ($p < 0,0118$), la position de soudage ($p < 0,00001$) et l'interaction du deuxième ordre correspondante ($p < 0,0021$) influencent le pourcentage d'utilisation musculaire du long supinateur de la main dominante. Il est intéressant de constater que le pistolet du type **Bernard_{air}** présente un pourcentage moyen d'utilisation musculaire différent des autres types. D'ailleurs, il entraîne le pourcentage moyen d'utilisation musculaire le plus élevé (figure 20). Les résultats révèlent aussi que les positions de soudage verticale (3G) et au plafond (4G) conduisent à une utilisation musculaire accrue (figure 21) et encore plus accentuée pour le pistolet du type **Bernard_{air}** (figure 22). Un examen plus détaillé de l'interaction entre le type de pistolet et la position de soudage (figure 22) révèle que tous les pistolets requièrent un pourcentage moyen d'utilisation musculaire comparable en position horizontale (2G). L'utilisation du pistolet **AirMig** est meilleure en position verticale (3G) plutôt qu'au plafond (4G), alors que le contraire est constaté pour les pistolets **Bernard_{air}** et **Binzel_{air}**. Dans l'ensemble, ce muscle est très sollicité dans les positions au plafond et verticale à cause de l'augmentation du poids du pistolet et de son faisceau engendrée par ces positions et en particulier avec la position au plafond (4G). En fait, cette position requiert l'application d'un moment de force négatif (anti-horaire) par le poignet (abduction du poignet). Par conséquent, elle sollicite davantage le rôle d'abducteur du poignet du long supinateur.

Tableau 10 Tableau ANOVA du pourcentage d'utilisation musculaire du long supinateur de la main dominante.

Source de variation	dl	SC	MC	F	p <
Sujet (S)	9	18475,3	2052,81		
Pistolet (P)	4	56,33	14,08	3,52	0.0118 *
pOsition (O)	2	392,51	196,26	49,12	0.0000 *
Répétition (R)	1	0,71	0,71	0,18	0.6795
P x O	8	113,03	14,01	3,50	0.0021 *
Total	299	22839,1			

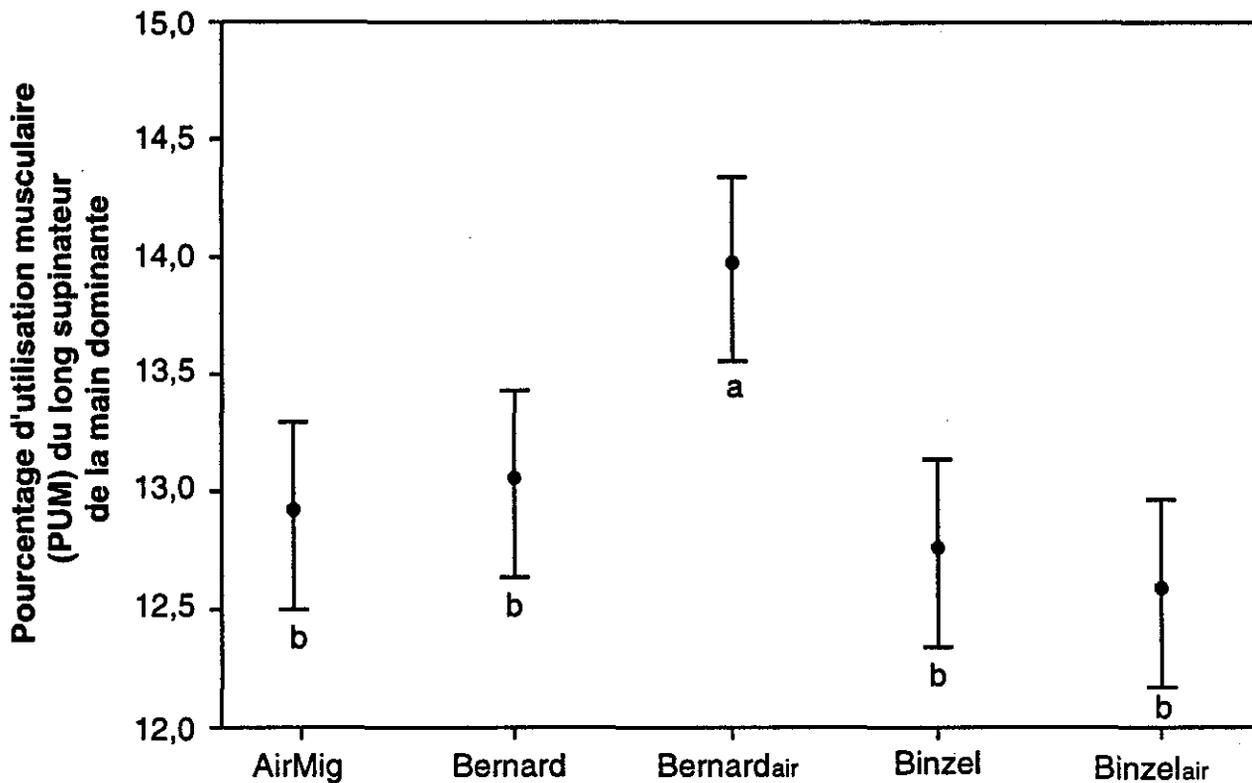


Figure 20 Graphique du pourcentage d'utilisation musculaire du long supinateur de la main dominante en fonction du type de pistolet utilisé.

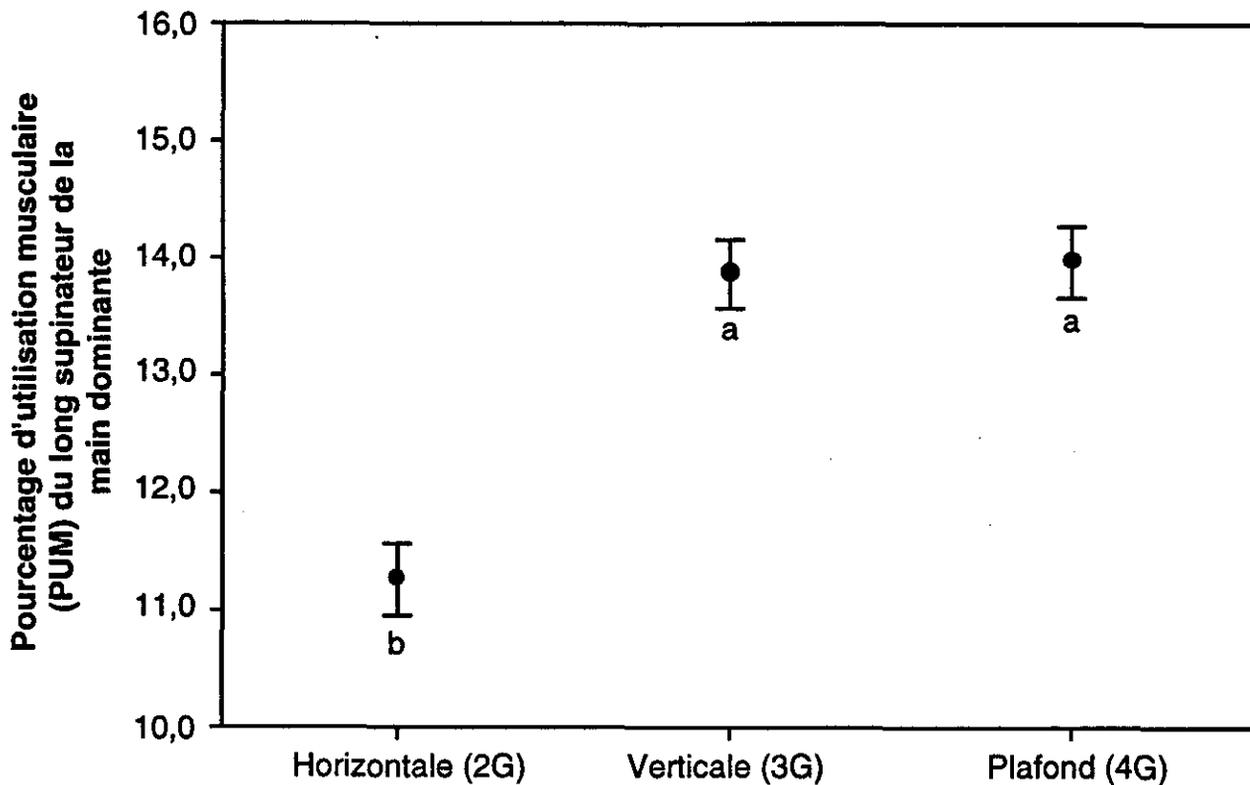


Figure 21 Graphique du pourcentage d'utilisation musculaire du long supinateur de la main dominante en fonction de la position de soudage.

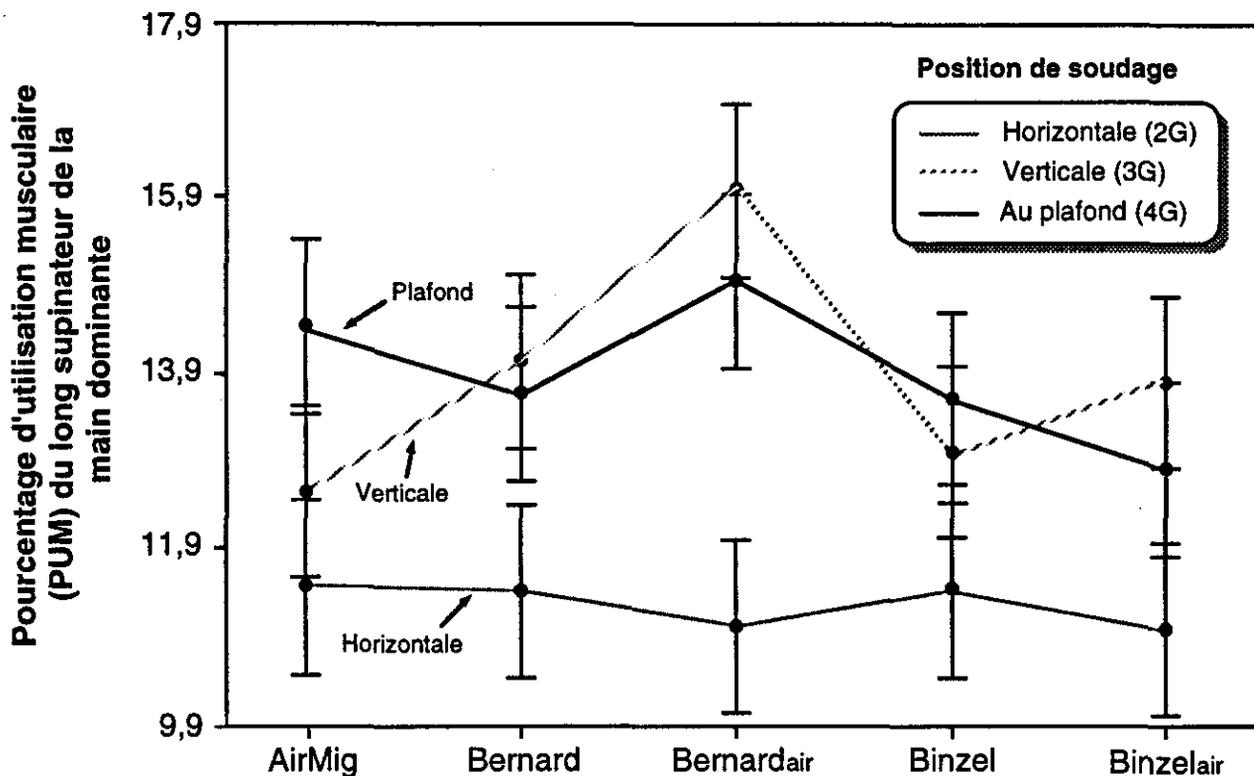


Figure 22 Graphique du pourcentage d'utilisation musculaire du long supinateur de la main dominante en fonction du type de pistolet et de la position de soudage (interaction P x O)

6.2.6 Cubiteur antérieur de la main dominante (adduction et flexion du poignet ainsi que flexion du coude)

Comme pour la majorité des autres muscles évalués, les résultats de l'analyse de variance (tableau 11) révèlent aussi que le type de pistolet ($p < 0,00001$), la position de soudage ($p < 0,00001$) et l'interaction double correspondante ($p < 0,0224$) influencent le pourcentage d'utilisation musculaire de ce muscle à un seuil de confiance 5 % ($p < 0,05$). Le pistolet de type **AirMig** est celui qui entraîne le pourcentage moyen d'utilisation musculaire le plus faible de l'ensemble des pistolets évalués (figure 23). Le pistolet **Binzel_{air}**, par contre, conduit à une activation musculaire significativement plus élevée que les autres types de pistolet. Ces niveaux d'activation musculaire peuvent s'expliquer par le fait que les positions de soudage horizontale (2G) et verticale (3G) entraînent des moments de force très élevés (voir annexe 4) qui doivent nécessairement être balancés par l'action des adducteurs du poignet. Par ailleurs, c'est la position horizontale (2G) qui est responsable du pourcentage d'utilisation musculaire le plus élevé (figure 24). Ce dernier constat est également applicable à l'ensemble des cinq types de pistolet évalués (figure 25). Par ailleurs, le pourcentage moyen d'utilisation musculaire apparaît nettement plus élevé lorsque les pistolets du type **Bernard** et **Bernard_{air}** sont employés en position horizontale (2G). Encore une fois, ces résultats s'expliquent par les moments de force plus élevés qui ont été mesurés pour ces deux pistolets dans la position de soudage horizontale (annexe 4). Enfin, le passage d'une position verticale (3G) à une position au plafond (4G) ne semble pas influencer le pourcentage moyen d'utilisation musculaire pour les pistolets du type **AirMig** et **Binzel_{air}**.

Tableau 11 Tableau ANOVA du pourcentage d'utilisation musculaire du cubiteur antérieur de la main dominante.

Source de variation	dl	SC	MC	F	p <
Sujet (S)	9	4827,86	536,43		
Pistolet (P)	4	290,72	72,68	23,39	0.0000 *
pOsition (O)	2	529,85	264,93	85,26	0.0000 *
Répétition (R)	1	6,42	6,42	2,07	0.1557
P x O	8	61,01	7,62	2,45	0.0224 *
Total	299	8292,0			

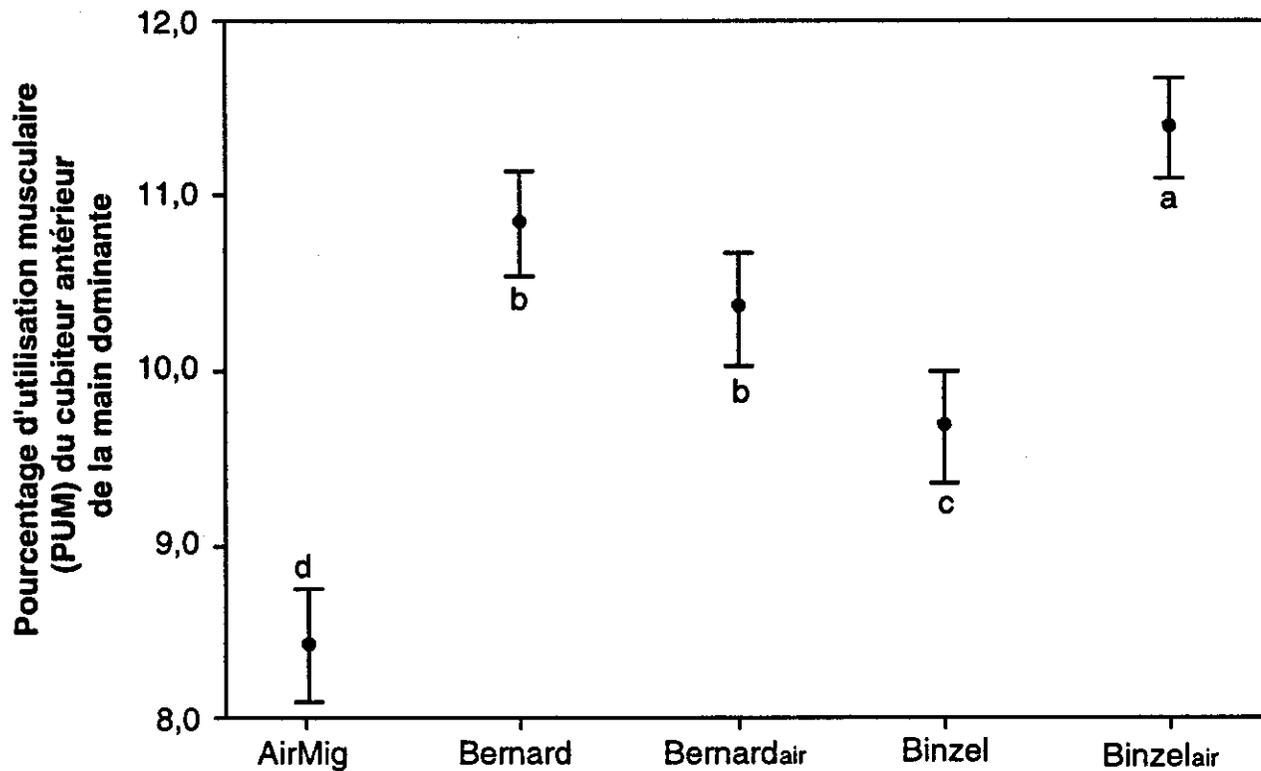


Figure 23 Graphique du pourcentage d'utilisation musculaire du cubiteur antérieur de la main dominante en fonction du type de pistolet utilisé

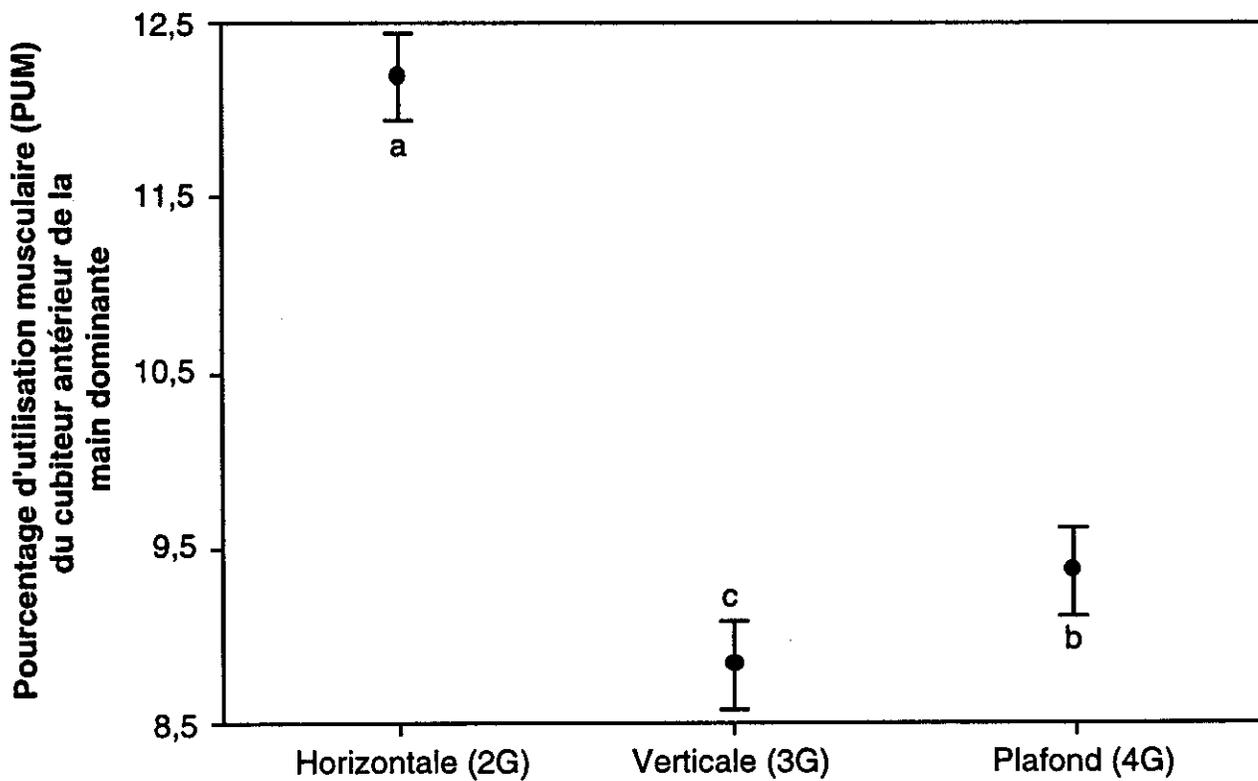


Figure 24 Graphique du pourcentage d'utilisation musculaire du cubiteur antérieur de la main dominante en fonction de la position de soudage.

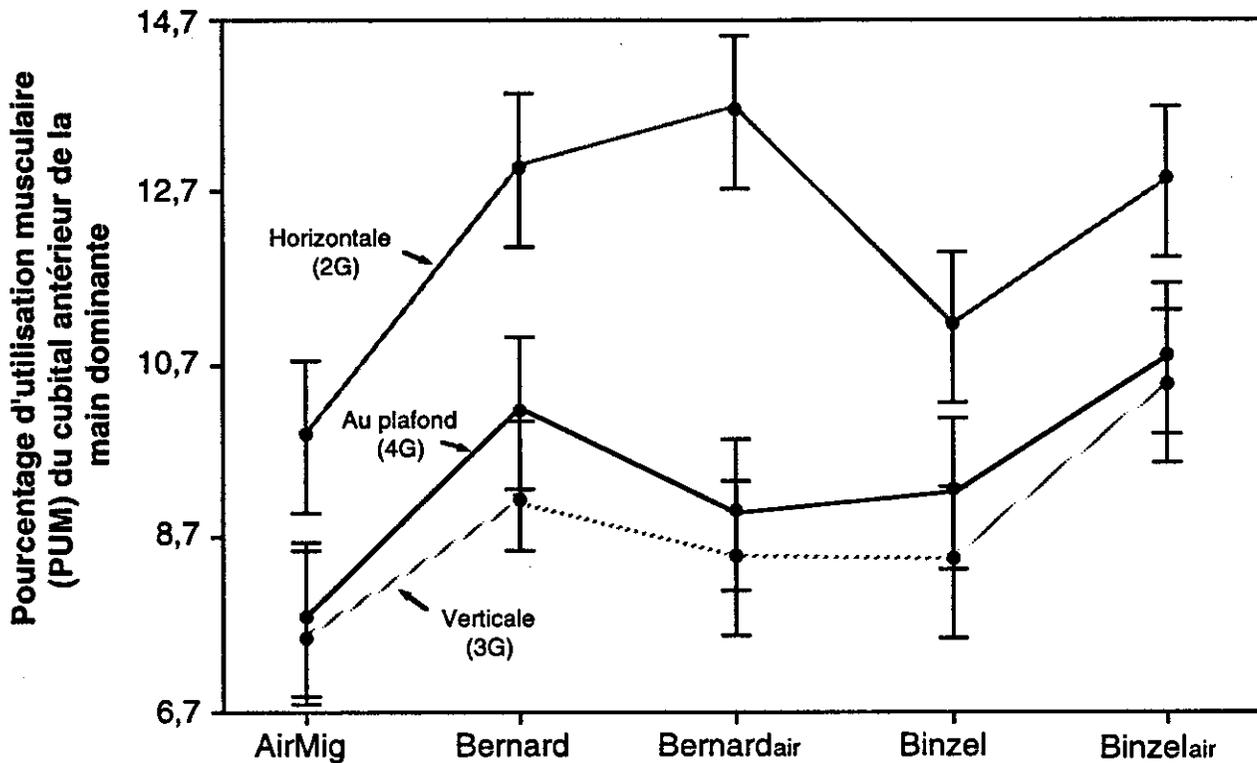


Figure 25 Graphique du pourcentage d'utilisation musculaire du cubiteur antérieur de la main dominante en fonction du type de pistolet et de la position de soudage (interaction P x O).

6.2.7 Deltoïde antérieur de la main dominante (flexion de l'épaule)

L'analyse de variance au tableau 12 met en évidence que le type de pistolet ($p < 0,00001$), la position de soudage ($p < 0,00001$) ainsi que l'interaction entre ces deux variables ($p < 0,00001$) affectent le pourcentage d'utilisation musculaire du deltoïde antérieur de la main dominante. De tous les types de pistolet évalués, le **AirMig** est celui qui entraîne le pourcentage moyen d'utilisation musculaire le plus élevé pour ce muscle responsable de la flexion de l'épaule (figure 26). Cette augmentation de la demande musculaire pour le pistolet **AirMig** est causée par l'angle plus fermé du col de cygne (125°). En effet, pour obtenir l'angle recherché avec la position de soudage choisie ($\approx 45^\circ$), les soudeurs doivent accentuer l'abduction du poignet (le moment requis à la position 4G est le plus élevé pour ce pistolet; c.f. annexe 4) ce qui a pour effet d'éloigner le faisceau d'alimentation (la partie la plus lourde du pistolet) de l'axe de rotation de l'épaule. Par contre, l'utilisation du pistolet **Bernard** entraîne une activation musculaire plus faible que celle observée avec les autres pistolets. La position 4G conduit à un plus grand pourcentage d'utilisation musculaire pour le deltoïde antérieur comme le démontre la figure 27. En effet, dans cette position, l'angle de flexion de l'épaule est environ 45° , ce qui entraîne un moment de force plus élevé par rapport aux autres positions. Par ailleurs, nous constatons que l'utilisation du pistolet **AirMig** dans la position 4G entraîne une augmentation légère, mais significative, du pourcentage moyen d'utilisation musculaire, tandis que le pistolet **Bernard** présente un pourcentage plus faible en moyenne (figure 28). Enfin, le pourcentage moyen d'utilisation musculaire du deltoïde antérieur dans la position 2G apparaît relativement constant d'un

pistolet à l'autre. Dans l'ensemble, les résultats du deltoïde antérieur représentent bien les moments de force exercés sur l'épaule en fonction des différentes positions.

Tableau 12 Tableau ANOVA du pourcentage d'utilisation musculaire du deltoïde antérieur de la main dominante

Source de variation	dl	SC	MC	F	p <
Sujet (S)	9	32444,5	3604,95		
Pistolet (P)	4	356,24	89,06	8,95	0.0000 *
pOsition (O)	2	14033,2	7016,59	705,51	0.0000 *
Répétition (R)	1	5,53	5,53	0,56	0.4665
P x O	8	419,58	52,45	5,27	0.0000 *
Total	299	63700,3			

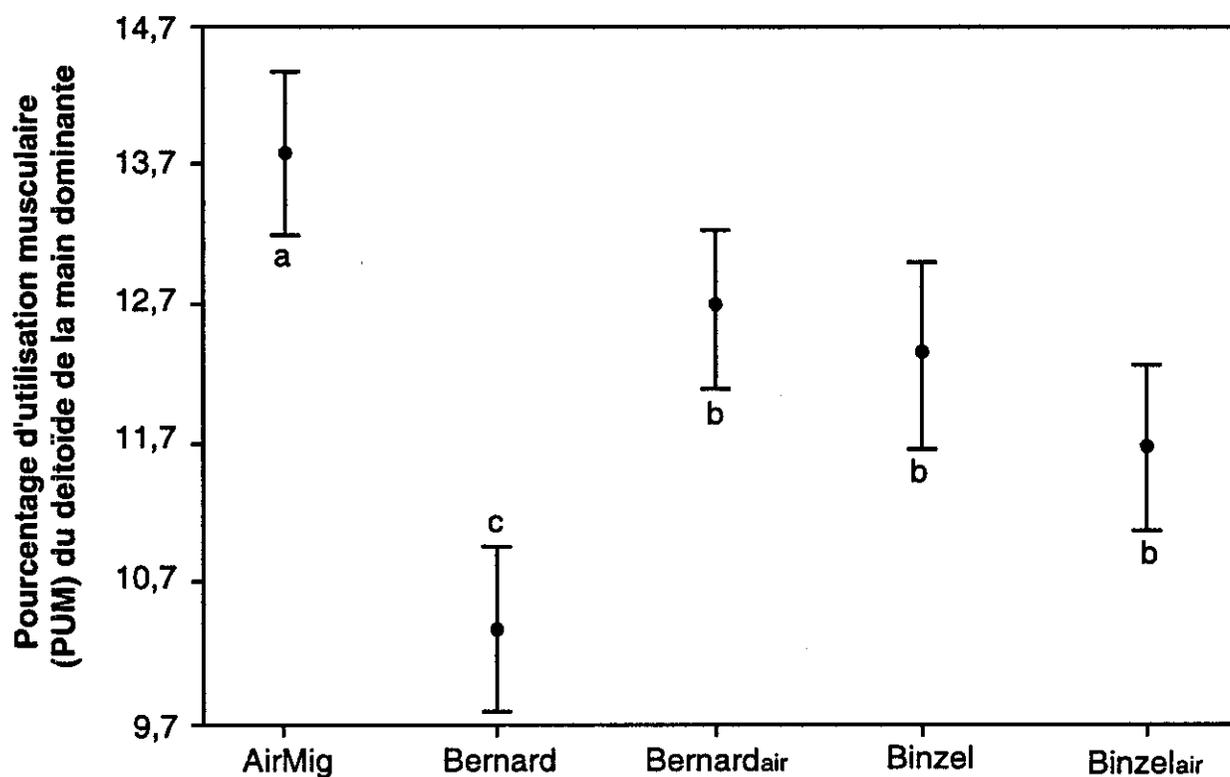


Figure 26 Graphique du pourcentage d'utilisation musculaire du deltoïde antérieur de la main dominante en fonction du type de pistolet utilisé.

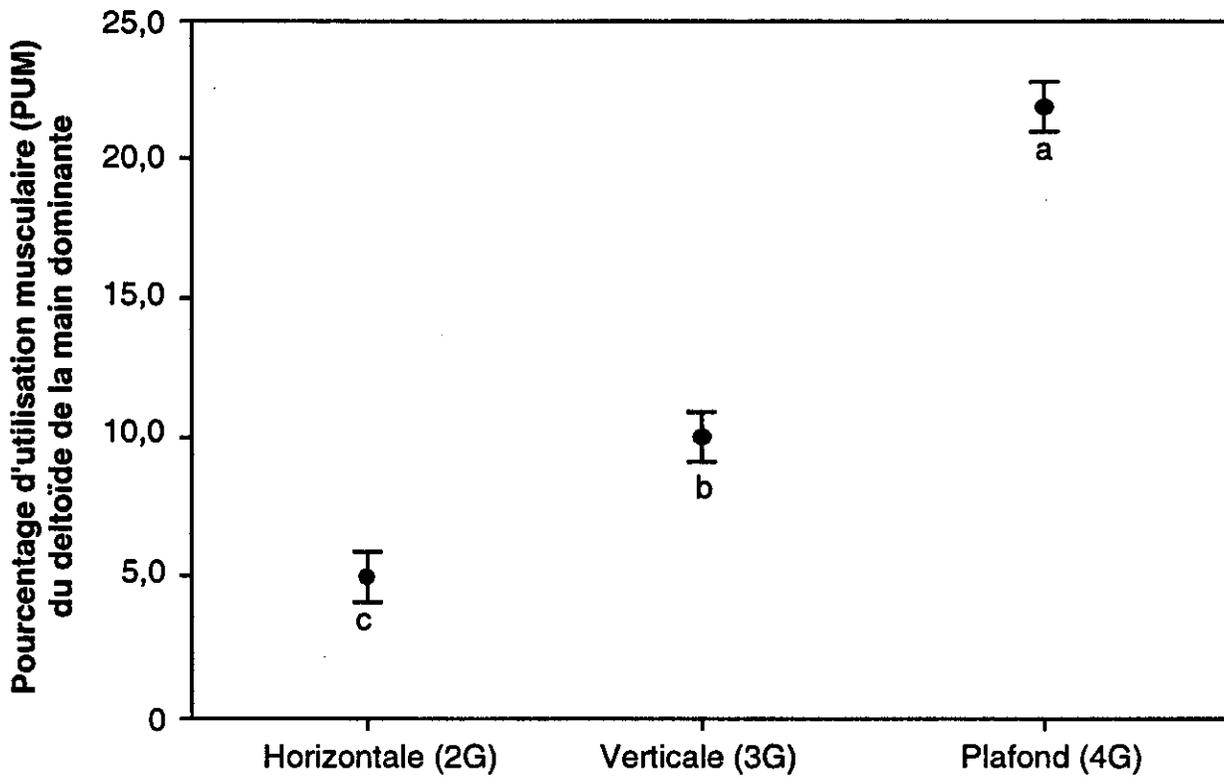


Figure 27 Graphique du pourcentage d'utilisation musculaire du deltoïde antérieur de la main dominante en fonction de la position de soudage.

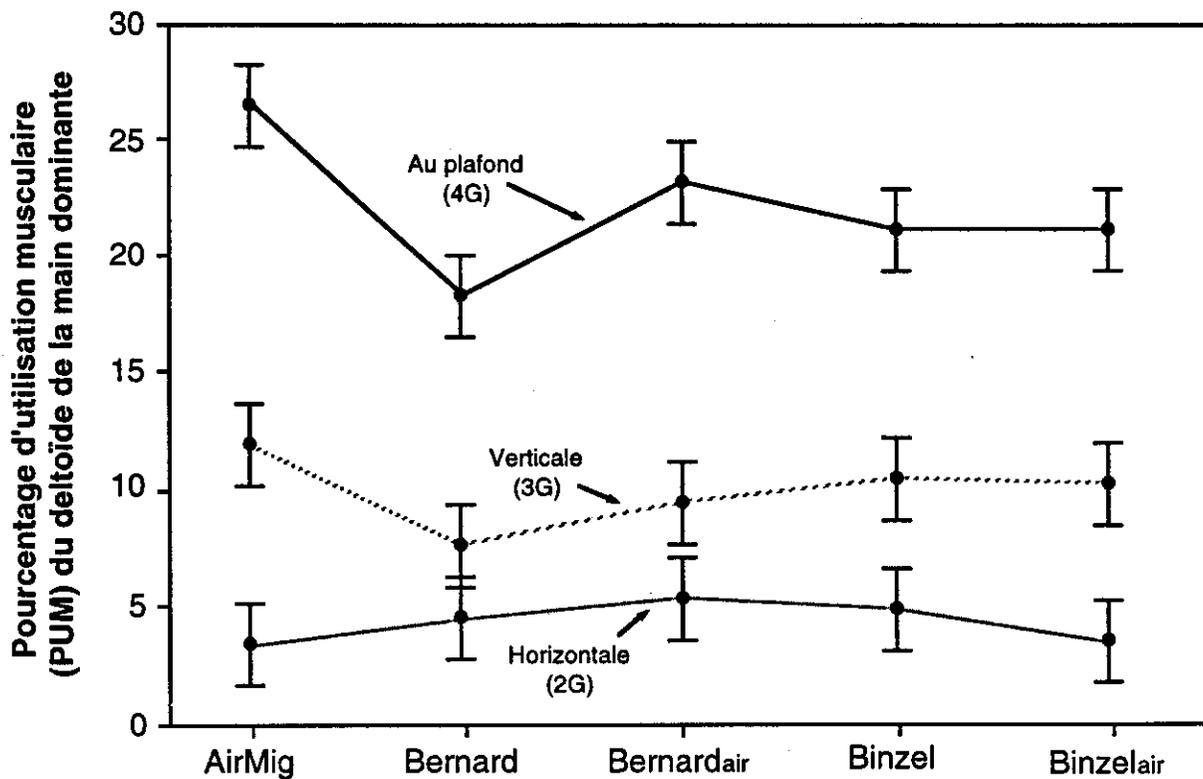


Figure 28 Graphique du pourcentage d'utilisation musculaire du deltoïde antérieur de la main dominante en fonction du type de pistolet et de la position de soudage (interaction P x O).

7.0 Synthèse et conclusion

Les tableaux 13 et 14, respectivement, présentent le sommaire des principaux résultats des évaluations psychophysiques et électromyographiques. Pour chacune des variables explicatives retenues dans les deux types d'évaluation, nous présentons le classement relatif des pistolets allant du plus performant (n° 1) au moins performant ainsi qu'une brève description de l'influence de la position de soudage s'il y a lieu.

Pour la majorité des variables explicatives, les pistolets de soudage **Bernardair** et **Binzelair** ont été classés moins performants que les pistolets de la même marque qui ne sont pas munis d'une buse d'aspiration (**Bernard** et **Binzel**). De plus, ces pistolets sont perçus par les soudeurs comme étant nettement moins maniables et confortables que leur homologues de la même marque. Les soudeurs opinent, en général, que le faisceau est trop lourd et relativement peu flexible (rigide) ce qui a pour effet d'affecter la maniabilité lors du soudage, notamment en ce qui concerne le pistolet **Bernardair** dans les positions verticale (3G) et au plafond (4G). D'ailleurs, le **Bernardair** conduit à un pourcentage moyen d'utilisation musculaire du long supinateur nettement plus élevé dans ces mêmes positions, ce qui est en partie imputable au poids plus élevé du pistolet avec son faisceau.

Tableau 13 Sommaire des résultats de l'évaluation psychophysique

Évaluation psychophysique Classement relatif des pistolets de soudage					
Pistolet	Maniabilité	Confort	Influence sur la qualité	Appréciation globale	Qualité de la soudure
AirMig	2	2	1 Perception de la qualité de la soudure meilleure en 2G suivie de 4G et de 3G	1	1 Qualité de la soudure meilleure en 2G suivie de 4G et de 3G
Bernard	3	3	1 Perception de la qualité de la soudure meilleure en 2G suivie de 4G et de 3G	1,2	1 Qualité de la soudure meilleure en 2G suivie de 4G et de 3G
Bernardair	4 Moins maniable en position 3G & 4G	4 Moins maniable en position 3G & 4G	2 Perception de la qualité de la soudure meilleure en 2G suivie de 4G et de 3G	2	1 Qualité de la soudure meilleure en 2G suivie de 4G et de 3G
Binzel	1	1	1 Perception de la qualité de la soudure meilleure en 2G suivie de 4G et de 3G	1	1 Qualité de la soudure meilleure en 2G suivie de 4G et de 3G
Binzelair	4	4	2 Perception de la qualité de la soudure meilleure en 2G suivie de 4G et de 3G	2	1 Qualité de la soudure meilleure en 2G suivie de 4G et de 3G

Classement relatif (le meilleur étant égal à 1)

1

Observations sur la position de soudage lorsqu'un effet existe

Tableau 14 Sommaire de l'évaluation électromyographique (EMG)

Évaluation électromyographique							
Classement relatif des pistolets de soudage							
Pistolet	Biceps brachial (main dominante)	Biceps brachial (main non-dominante)	Fléchisseur commun des doigts (main dominante)	Fléchisseur commun des doigts (main non-dominante)	Long supinateur (main dominante)	Cubiteur antérieur (main dominante)	Deltoïde antérieur (main dominante)
AirMig	1 PUM plus faible dans les positions 3G et 4G. La position 2G conduit à un PUM plus élevé.	1 PUM plus faible dans les positions 2G et 4G, ces deux positions étant comparables. La position 3G conduit à un PUM plus élevé.	1 PUM plus faible dans les positions 2G et 3G, ces deux positions étant comparables. La position 4G conduit à un PUM plus élevé.	2 PUM plus faible dans les positions 2G et 3G, ces deux positions étant comparables. La position 4G conduit à un PUM plus élevé.	1 PUM plus faible dans la position 2G suivi de l'ordre de la position 3G et de la position 4G.	1 PUM plus faible dans les positions 3G et 4G, lesquelles sont comparables. Par contre, la PUM en position 2G est le moins élevée comparativement aux autres pistolets dans cette position.	3 PUM plus faible en position 2G suivi de la position 3G. La position 4G conduit à un PUM nettement plus élevé. De plus, le PUM dans la position 4G est plus élevé que pour les autres pistolets.
Bernard	2 PUM plus faible dans les positions 3G et 4G. La position 2G conduit à un PUM plus élevé.	1 PUM plus faible dans la position 2G suivi de la position 4G et de la position 3G.	3 PUM plus faible dans les positions 3G et 4G, ces deux positions étant comparables. La position 2G conduit à un PUM plus élevé.	2 PUM plus faible dans les positions 2G, 3G et 4G, lesquelles sont comparables, conduisent à des PUM plus élevés.	1 PUM plus faible dans la position 2G. Les positions 3G et 4G, lesquelles sont comparables, conduisent à des PUM plus élevés.	3 PUM plus faible dans les positions 3G et 4G. La position 2G conduit à une augmentation marquée du PUM.	1 PUM plus faible en position 2G suivi de la position 3G. La position 4G conduit à un PUM nettement plus élevé. De plus, le PUM dans la position 4G est moins élevé que pour les autres pistolets.
Bernardair	3 PUM plus faible dans les positions 3G et 4G. La position 2G conduit à un PUM plus élevé. Cette dernière position entraîne le PUM le plus élevé de tous les pistolets.	1 PUM plus faible dans la position 2G. Les positions 3G et 4G sont comparables mais plus élevés que la position 2G. Dans la position 3G, ce pistolet conduit à un PUM moindre qu'avec les autres pistolets dans la même position.	3 PUM plus faible dans les positions 3G et 4G, ces deux positions étant comparables. La position 2G conduit à un PUM plus élevé.	1 PUM plus faible dans les positions 2G, 3G et 4G, lesquelles sont comparables, conduisent à des PUM nettement plus élevés.	2 PUM plus faible dans la position 2G. Les positions 3G et 4G, lesquelles sont comparables, conduisent à des PUM plus élevés.	3 PUM plus faible dans les positions 3G et 4G. La position 2G conduit à une augmentation marquée du PUM.	2 PUM plus faible en position 2G suivi de la position 3G. La position 4G conduit à un PUM nettement plus élevé.
Binzel	1 PUM plus faible dans les positions 3G et 4G. La position 2G conduit à un PUM plus élevé.	1 PUM plus faible dans les positions 2G et 4G. La position 3G conduit à un PUM plus élevé.	2 PUM plus faible dans les positions 3G et 4G, ces deux positions étant comparables. La position 2G conduit à un PUM plus élevé.	1 PUM plus faible dans les positions 2G, 3G et 4G, lesquelles sont comparables, conduisent à des PUM plus élevés.	1 PUM plus faible dans la position 2G. Les positions 3G et 4G, lesquelles sont comparables, conduisent à des PUM plus élevés.	2 PUM plus faible dans les positions 3G et 4G. La position 2G conduit à un PUM plus élevé.	2 PUM plus faible en position 2G suivi de la position 3G. La position 4G conduit à un PUM nettement plus élevé.
Binzelair	2 PUM plus faible dans la position 4G suivi dans l'ordre des positions 3G et 2G.	1 PUM plus faible dans les positions 2G et 4G. La position 3G conduit à un PUM plus élevé.	4 PUM plus faible dans la position 4G. Les positions 2G et 3G sont comparables mais plus élevés que la position 4G.	1 PUM plus faible dans les positions 2G, 3G et 4G, lesquelles sont comparables, conduisent à des PUM plus élevés.	1 PUM plus faible dans la position 2G. Les positions 3G et 4G, lesquelles sont comparables, conduisent à des PUM plus élevés.	4 PUM plus faible dans les positions 3G et 4G. La position 2G conduit à un PUM plus élevé.	2 PUM plus faible en position 2G suivi de la position 3G. La position 4G conduit à un PUM nettement plus élevé.

Par ailleurs, les soudeurs rapportent que les buses d'aspiration sur les pistolets **Bernardair** et **Binzelair** sont relativement grosses, ce qui tend à nuire à la visibilité lors du soudage. Ils soulignent, par contre, que les pistolets **Bernardair** et **Binzelair** sont adéquats pour les travaux effectués en position horizontale (2G). Nos évaluations, toutefois, ont révélé un pourcentage d'utilisation musculaire plus élevé dans la position 2G pour le cubiteur antérieur (responsable de l'adduction et de la flexion du poignet ainsi que de la flexion du coude). Ce résultat s'explique par les moments de force plus élevés mesurés pour ces deux pistolets dans la position de soudage horizontale (2G).

Il est intéressant de constater que le pistolet **AirMig**, pourtant pourvu d'une buse d'aspiration, affiche une performance supérieure tant pour l'évaluation psychophysique qu'électromyographique. Nos évaluations globales le classent en deuxième position, juste derrière le pistolet **Binzel** sans buse d'aspiration et dont le poids est le plus faible de tous. Les principales caractéristiques de ce pistolet sont sa légèreté relative, en comparaison des pistolets **Bernardair** et **Binzelair**, sa poignée plus courte en longueur ainsi que son angle du col de cygne légèrement moins ouvert (125°), ce qui conduit à un moment nul dans la position de soudage verticale (3G). Les soudeurs opinent que ce pistolet est très maniable et peu lourd. Les soudeurs, par contre, rapportent que l'aspiration est beaucoup plus bruyante (note : nous n'avons pas mesuré la pression sonore) avec le **AirMig** comparativement aux pistolets **Bernardair** et **Binzelair**. Par ailleurs, nous avons pu constater que l'utilisation de ce pistolet conduisait à un pourcentage d'utilisation plus élevé du deltoïde antérieur dans la position au plafond (4G) comparativement à l'ensemble des autres pistolets de soudage. Nous rappelons ici que le deltoïde antérieur est responsable de la flexion de l'épaule. L'augmentation du PUM de ce muscle est causée par l'angle plus fermé du col de cygne, lequel rappelons-le représentait justement un avantage dans la position verticale de soudage (3G).

De ce qui précède, il ressort que les principaux inconvénients qui sont reliés à l'utilisation des pistolets pourvus d'une buse d'aspiration à la source sont imputables au poids plus élevé du pistolet avec son faisceau, à la trop grande rigidité du faisceau et à l'influence de l'angle du col de cygne dans les diverses positions de soudage. Plus particulièrement, il apparaît que les soudeurs ont préféré l'utilisation du pistolet **AirMig** principalement à cause de sa légèreté, de sa poignée plus courte et de son faisceau plus flexible qui le rendent plus maniable. Les évaluations psychophysiques et électromyographiques confirment ces avantages. De nos évaluations, il ressort aussi qu'aucun des pistolets n'apparaît idéal pour une utilisation dans l'ensemble des positions de soudage évaluées. En effet, bien que l'utilisation d'un pistolet conçu avec un angle de col de cygne plus fermé apparaît plus avantageux dans une position de soudage verticale, il peut constituer un désavantage lorsqu'il est utilisé dans une position au plafond (4G). Idéalement, un pistolet de soudage pourvu d'une buse d'aspiration à la source devrait avoir les caractéristiques suivantes : angle de col de cygne réglable, poignée d'une longueur relativement courte (comparable au **AirMig**) ainsi qu'un ensemble pistolet-faisceau qui soit à la fois léger et flexible. Enfin, la conception de la buse du **AirMig** apparaît adéquate quoique son efficacité de captation des fumées de soudage n'a pas été évaluée à notre connaissance.

Limitation de l'étude en ce qui a trait aux valeurs PUM obtenues lors des essais

Dans cette étude, les valeurs électromyographiques mesurées servaient à évaluer ponctuellement la demande des principaux muscles impliqués dans l'action de souder pour différents types de pistolets de soudage. Les valeurs obtenues ont été transformées en pourcentage d'utilisation musculaire (PUM) uniquement dans le but de mieux situer le niveau de force musculaire requis par rapport à la capacité maximale de chacun des sujets. Le protocole utilisé n'a pas été conçu de telle sorte à évaluer si un type de pistolet engendrait davantage de fatigue musculaire par rapport aux autres. Toutefois, il demeure évident qu'une demande musculaire plus élevée entraîne généralement une fatigue musculaire plus précoce.

À ce jour, les études réalisées sur le sujet (Hagber, 1981¹; Jensen et al., 1993²; Cooper et Stoke, 1994³) ne permettent pas de généraliser les résultats obtenus à ceux de la présente étude. Le problème vient du fait que l'intensité de travail musculaire exigé lors de ces études est difficilement comparable avec celle mesurée chez les différents muscles évalués dans la présente étude. En effet, les résultats montrent beaucoup de variation du PUM requis d'un muscle à l'autre (par exemple, de 3.5 à 7.3% pour le biceps brachial et de 3.5 à 27% pour le deltoïde antérieur d'une condition à l'autre). Le problème vient surtout du fait que l'apparition de la fatigue ou des risques de blessures dépend non seulement de l'intensité du travail musculaire, mais aussi de la durée des contractions et des pauses musculaires. Toutefois, il est intéressant de souligner que des signes de fatigue mesurés avec une analyse spectrale (déplacement du spectre de puissance moyenne du muscle vers des basses fréquences) surviennent entre 19 et 24 secondes avec un travail musculaire statique soutenu correspondant à 20% de la capacité de contraction musculaire pour le deltoïde. Dans la présente étude, il n'y a que les conditions de soudage au plafond qui entraînent une demande musculaire comparable ou supérieure à celle évaluée dans l'étude citée précédemment.

Remerciements

Les responsables de cette étude tiennent à remercier Messieurs **Martin Brosseau**, professionnel de recherche au sein de l'Équipe de recherche en sécurité du travail (EREST) de l'ÉTS, **Stéphane Patenaude**, étudiant à la maîtrise en kinanthropologie à l'Université du Québec à Montréal et **Marc-André Gouin**, technicien à l'ÉTS pour leur participation active à la planification et à la réalisation des essais en laboratoire. Les responsables sont aussi très reconnaissants envers les soudeurs qui ont participé à l'étude.

¹ Hagberg, M. (1981) On evaluation of local muscular load and fatigue by electromyography *Arbet Och Halsa* 24: 1-53.

² Jensen, B.R. (1993) Shoulder muscle load and shoulder muscle fatigue among industrial sewing machine operators *Eur. J. Appl. Physiol.* 67: 467-475.

³ Cooper R.G. & Stokes, M.J. Load-induced inflexion of the surface electromyographic signal during isometric fatiguing activity of normal human paraspinal muscle. *Electromyogr. Clin. Neurophysiol.* 34: 177-184.

Annexe 1
Formulaire de consentement

Nom, prénom Âge Poids (kg ou lb) kg ou lbTaille (cm ou pi.) cm ou pi. po.Nombre d'années d'expérience à titre de soudeur

Responsables de l'étude : Yves Beauchamp, ÉTS
Denis Marchand, UQAM
Michel Galopin, ÉTS
Marc Thomas, ÉTS

Professionnel de recherche : Martin Brosseau

Objectif du projet :

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'influence des buses d'aspiration de pistolets de soudage GMAW sur l'activation musculaire des membres supérieurs, l'inconfort perçu par le soudeur et la qualité des assemblages soudés dans des conditions réelles de travail.

Procédure :

Une période d'entraînement, préalable à chaque série d'essais, vous permettra une familiarisation avec l'équipement utilisé, la nature des assemblages à réaliser et avec la grille d'évaluation psychophysique.

Lors des essais, vous devrez utiliser chacun des cinq (5) modèles de pistolets de soudage dans trois (3) positions de soudage.

Afin de mesurer l'activation musculaire de vos membres supérieurs, des électrodes de surfaces seront posées sur un ensemble de huit (8) muscles. Avant la pose des électrodes, la peau sera lavée à l'aide d'un tampon alcoolisé. Les électrodes de surface seront disposées sur la peau. La fixation des électrodes, de même que la mesure de l'activation musculaire est sans douleur.

Utilisation de l'information :

Toutes les informations recueillies lors de ces évaluations seront traitées dans la plus stricte confidentialité. Seuls les responsables du projet et l'expérimentateur auront accès aux informations personnalisées. De plus, toutes les informations recueillies seront conservées sous clé au laboratoire de recherche en sécurité du travail de l'École de technologie supérieure. À la fin de l'étude, un rapport de recherche et des articles seront préparés puis publiés. Les informations contenues dans ses publications seront entièrement dépersonnalisées, de sorte qu'il sera impossible d'identifier l'un ou l'autre des participants à cette recherche. Sur demande, il vous sera possible d'obtenir une copie du rapport de recherche et/ou des informations qui vous sont spécifiques.

Signatures :

J'ai (le participant) pris connaissance de ce formulaire et j'accepte de participer à cette étude.

Participant: _____ Date _____/96

J'ai (expérimentateur) expliqué en détail le but de l'étude et la procédure expérimentale.

Expérimentateur: _____ Date _____/96

Annexe 2
Grille d'évaluation psychophysique

Ce questionnaire a été conçu dans le but d'évaluer votre perception sur divers aspects. Il vous sera administré après chaque essai que vous effectuerez dans le cadre de votre participation dans cette étude.

Avant de remplir ce questionnaire il est important de prendre connaissance des éléments suivants :

- il n'y a pas de bonnes ou de mauvaises réponses aux questions ci-bas ;
- nous vous demandons d'être le plus impartial possible ;
- n'hésitez pas à marquer un «X» près des extrémités de l'échelle ;
- essayez autant que possible de ne pas tout marquer dans le centre de l'échelle ;
- les réponses nécessiteront votre opinion et votre jugement ;
- donnez votre opinion le plus honnêtement possible ;
- toutes ces informations seront confidentielles.

Sur cette échelle, marquez d'un «X» l'endroit qui globalement correspond le mieux au niveau d'inconfort ressenti à utiliser ce pistolet.

Inconfortable

Confortable

Sur cette échelle, marquez d'un «X» l'endroit qui globalement correspond le mieux à l'influence du pistolet sur la qualité de la soudure effectuée.

Soudure de
mauvaise qualité

Soudure
de qualité acceptable

Soudure
d'excellente qualité

Sur cette échelle, marquez d'un «X» l'endroit qui globalement correspond le mieux à la facilité d'utilisation (maniabilité) de ce pistolet.

Difficile d'utilisation
(peu maniable)

Facile d'utilisation
(très maniable)

Observations

Pistolet :

Position:

- Horizontale
- Verticale
- Au plafond

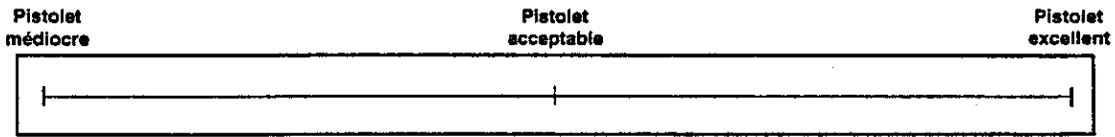
Date / / 96

Sujet no.

Réplicat no.

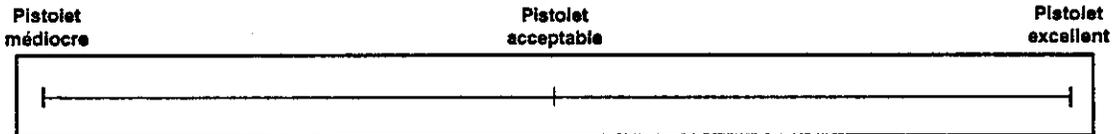
Bernard à fumée

Sur cette échelle, marquez d'un «X» l'endroit qui correspond le mieux à votre appréciation globale de ce pistolet



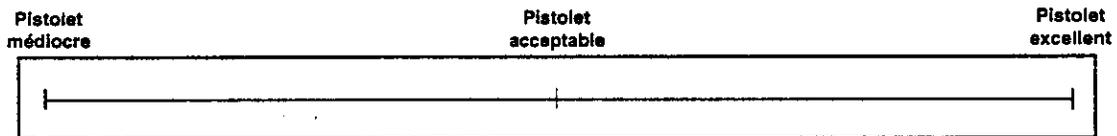
Bernard

Sur cette échelle, marquez d'un «X» l'endroit qui correspond le mieux à votre appréciation globale de ce pistolet



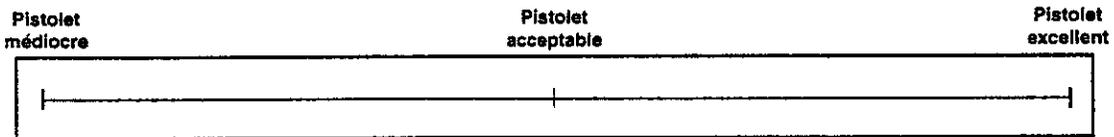
Binzel à fumée

Sur cette échelle, marquez d'un «X» l'endroit qui correspond le mieux à votre appréciation globale de ce pistolet



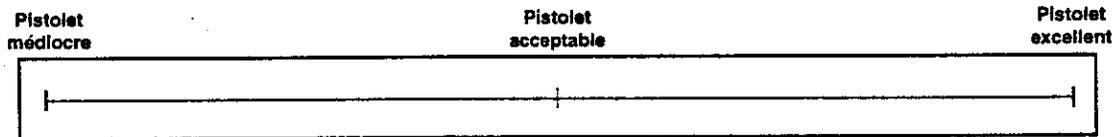
Binzel

Sur cette échelle, marquez d'un «X» l'endroit qui correspond le mieux à votre appréciation globale de ce pistolet



Air Mig

Sur cette échelle, marquez d'un «X» l'endroit qui correspond le mieux à votre appréciation globale de ce pistolet



Observations

Date / / 96

Sujet no.

Annexe 3
Grille d'évaluation de la qualité des joints de soudure

Essai:

Pistolet:

Réplicat no. 1 2

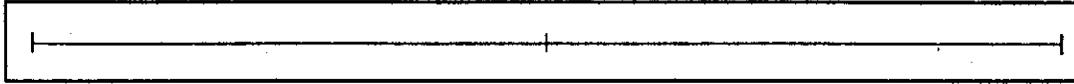
Condition :

- Horizontale
- Verticale
- Au plafond

Soudure de
mauvaise qualité

Soudure
de qualité acceptable

Soudure
d'excellente qualité



Essai:

Pistolet:

Réplicat no. 1 2

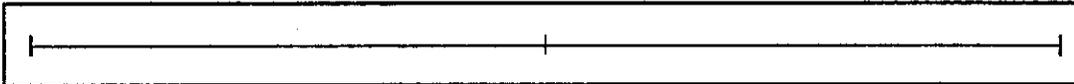
Condition :

- Horizontale
- Verticale
- Au plafond

Soudure de
mauvaise qualité

Soudure
de qualité acceptable

Soudure
d'excellente qualité



Essai:

Pistolet:

Réplicat no. 1 2

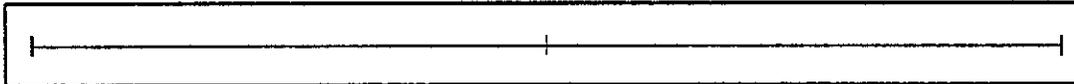
Condition :

- Horizontale
- Verticale
- Au plafond

Soudure de
mauvaise qualité

Soudure
de qualité acceptable

Soudure
d'excellente qualité



Essai:

Pistolet:

Réplicat no. 1 2

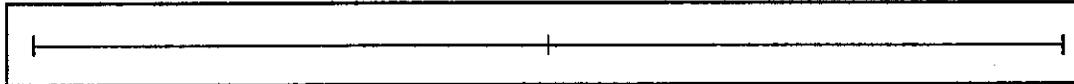
Condition :

- Horizontale
- Verticale
- Au plafond

Soudure de
mauvaise qualité

Soudure
de qualité acceptable

Soudure
d'excellente qualité



Essai:

Pistolet:

Réplicat no. 1 2

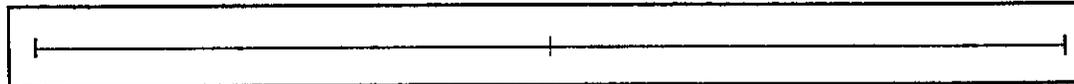
Condition :

- Horizontale
- Verticale
- Au plafond

Soudure de
mauvaise qualité

Soudure
de qualité acceptable

Soudure
d'excellente qualité



Essai:

Pistolet:

Réplicat no. 1 2

Condition :

- Horizontale
- Verticale
- Au plafond

Soudure de
mauvaise qualité

Soudure
de qualité acceptable

Soudure
d'excellente qualité

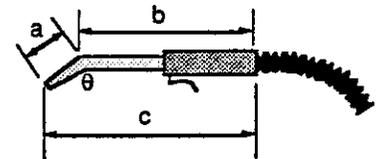


Annexe 4
Caractéristiques des pistolets de soudure évalués

Caractéristiques des pistolets de soudage évalués

Pistolet	Angle du col de cygne (θ)	Dimension (cm)			Circonférence de la prise (cm)	Rebord	Position	Moment (N-m)	Poids ² (kg)	Caractéristiques de la poignée
		a	b	c						
AirMig	125	11.0	22.0	28.0	13.0	oui	2G 3G 4G	1.075 nul -0.825	1.25 1.38 1.47	Ovale et incurvée
Bernard	135	12.1	25.0	33.0	12.0	non	2G 3G 4G	1.755 1.102 -0.754	1.47 1.57 1.66	Ronde
Bernardair	130	13.2	27.1	36.0	13.2	non	2G 3G 4G	2.263 1.081 -0.511	2.08 2.37 2.50	Ronde
Binzel	130	11.3	28.0	34.1	12.4	oui	2G 3G 4G	0.697 0.526 -0.395	1.1 1.2 1.27	Rectangulaire et arrondie
Binzelair	135	13.0	25.1	35.0	12.3	oui	2G 3G 4G	1.684 1.559 -0.621	1.4 1.53 1.62	Rectangulaire et arrondie

- 1) Moment requis pour maintenir le pistolet dans la position désirée (2G, 3G ou 4G) avec un angle de 45° entre la buse et le joint de soudure. Le moment a été mesuré à partir du centre de la poignée.
- 2) Le poids du pistolet diffère entre les positions compte tenu que la longueur de son faisceau (par conséquent, le poids) varie elle aussi d'une position à l'autre (e.g. la partie libre du faisceau est toujours plus longue à la position 4G).



Annexe 5
Évaluation acoustique des pistolets de soudage

Le niveau de pression sonore globale à l'oreille de l'opérateur a été mesuré pour la position de soudage horizontale (2G). Les résultats sont présentés dans le tableau 1.

TABLEAU 1
Niveau de pression sonore globale en dB(A)

Pistolets	Essai 1	Essai 2	Essai 3
AIR MIG	83,8	83,7	
BERNARD	82,9	81,8	79,4
BERNARD _{air}	80,7	80,4	
BINZEL	81,5	79,6	83,5
BINZEL _{air}	79,6	80,2	

Une analyse de variance de ces résultats a montré qu'il n'y avait aucune différence significative ($p = 0,1851$) entre les niveaux sonores émis par chaque pistolet même si le AIR MIG semble donner un niveau global moyen plus élevé. Ceci est illustré sur la figure 1 qui montre, pour chaque pistolet, la valeur moyenne obtenue ainsi que l'intervalle de confiance à 95%. Les intervalles de confiance se recouvrent, ce qui illustre bien l'absence de différence significative entre les niveaux sonores des différents pistolets.

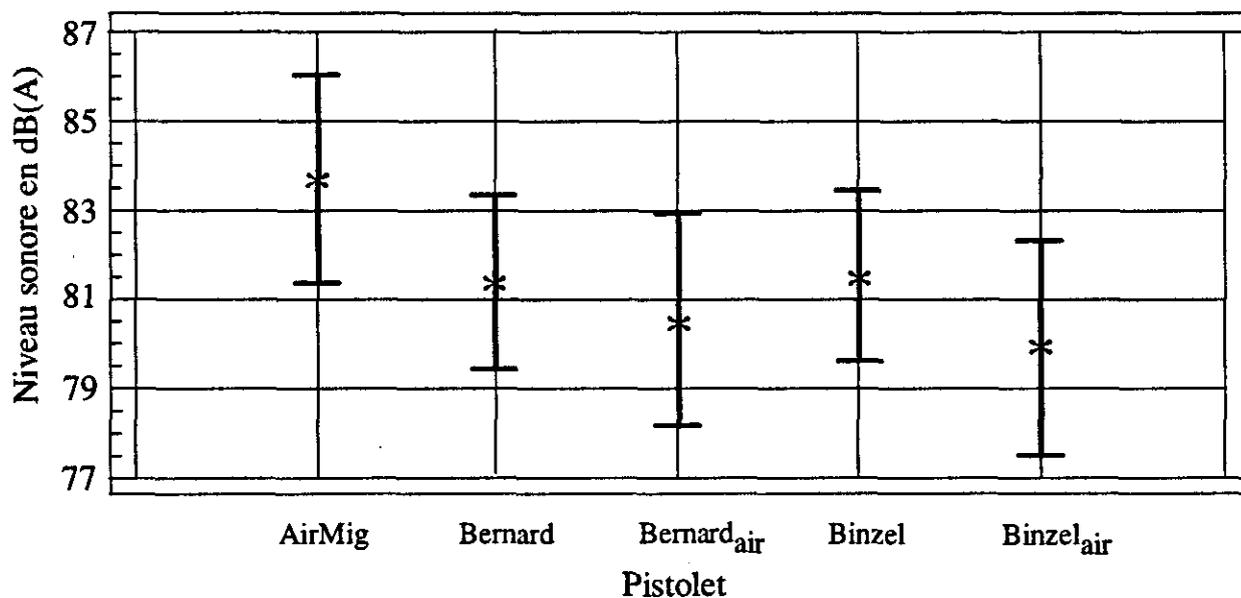


Figure 1. Valeurs moyennes et intervalles de confiance à 95%