De l'ébarbage traditionnel à l'usage d'un cobot : analyse du geste professionnel dans un objectif de prévention des troubles musculo-squelettiques

Clara Schoose

▶ **To cite this version:**

Clara Schoose. De l'ébarbage traditionnel à l'usage d'un cobot : analyse du geste professionnel dans un objectif de prévention des troubles musculo-squelettiques. Psychologie. Université Grenoble Alpes [2020-..], 2022. Français. NNT : 2022GRALH013 . tel-03942554

HAL Id: tel-03942554
https://theses.hal.science/tel-03942554

Submitted on 17 Jan 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE GRENOBLE ALPES

Spécialité : **Psychologie du travail et Ergonomie**
Arrêté ministériel : 25 mai 2016

Présentée par

Clara SCHOOSE

Thèse dirigée par **Sandrine CAROLY**
et co-encadrée par **Adriana SAVESCU**, INRS,
Aude CUNY-GUERRIER, INRS et **Laurent CLAUDON**, INRS

préparée au sein du **Laboratoire interuniversitaire de Psychologie/personnalité, Cognition, Changement social (LIP/PC2S)**, **Laboratoire Politiques publiques, ACtion politique, TErritoires (PACTE)** dans **l'École Doctorale Sciences de l'Homme, du Politique et du Territoire (SHPT)**

De l'ébarbage traditionnel à l'usage d'un cobot : analyse du geste professionnel dans un objectif de prévention des troubles musculo-squelettiques

Thèse soutenue publiquement le **11 octobre 2022**
devant le jury composé de :

Madame Flore BARCELLINI
Professeure des Universités, CNAM Paris, Rapporteure
Monsieur Denys DENIS
Professeur des Universités, Université du Québec, Montréal, Rapporteur
Madame Aurélie LANDRY
Maîtresse de conférences, Université Grenoble Alpes, Examinatrice
Monsieur Pascal SIMONET
Maître de conférences, Université de Nantes, Examinateur
Madame Peggy ZWOLINSKI
Professeure des Universités, INPG, Présidente du jury
Madame Sandrine CAROLY
Professeure des Universités, Université Grenoble Alpes, Directrice de thèse
Madame Adriana SAVESCU
Docteure en Sciences, Département IET, INRS, Co-encadrante, Invitée
Madame Aude CUNY-GUERRIER
Docteure en Sciences, Département HT, INRS, Co-encadrante, Invitée
Monsieur Laurent CLAUDON
Chargé de Recherche, Département HT, INRS, Co-encadrant, Invité

« Le mec qui voit un mec qui tient une meuleuse, il se dit « ouais bah il tient une meuleuse et pis c'est tout » mais y'a pas que ça ! Y'a pas que ça ! Toi t'as compris ! »

Extrait d'un entretien avec un ébarbeur

À mon grand-père,

À mes parents,

Merci…

À l'ensemble des ébarbeurs sans lesquels cette étude n'aurait pas vu le jour. Merci de m'avoir accueillie et intégrée avec tant de gentillesse et de confiance. J'ai tellement appris grâce à vous, autant vis-à-vis de ma discipline qu'humainement. Je remercie également l'ensemble des acteurs de la fonderie. Merci pour le temps que vous m'avez accordé et votre confiance !

À l'INRS pour m'avoir offert l'opportunité de réaliser ce doctorat. Merci à Agnès Aublet-Cuvelier de m'avoir fait confiance au tout début de ce travail et à Jean Theurel d'avoir pris le relais.

À Sandrine Caroly, ma directrice de thèse, pour ses conseils pertinents tout au long de ma thèse, pour ses recadrages quand le souci du détail m'entrainait dans une spirale infernale. Merci d'avoir su m'aiguiller à distance.

À Flore Barcellini, Denys Denis, Aurélie Landry, Pascal Simonet et Peggy Zwolinski, je suis très honorée que vous ayez accepté de faire partie du jury de soutenance de ma thèse.

À Adriana Savescu et Aude Cuny, mes deux encadrantes de l'INRS. Adriana, merci pour ce mélange d'interrogations et de patience, témoignage quotidien de ta bienveillance. Aude, merci pour ta gentillesse et ton intérêt pour cette thèse qui ont été si stimulants pour moi. Je ne peux vous dire à quel point je suis reconnaissance.

À Laurent Claudon, chef du laboratoire PMT à l'INRS, pour s'être accroché à cette thèse bien que ce ne soit pas ta discipline. Merci pour tes conseils précieux, merci pour ta bienveillance sans failles. Tu as nourri ce travail de tes remarques pertinentes.

À mes collègues du département HT de l'INRS : Mathilde, ma camarade de thèse (binôme indissociable, pas vrai Laurent ?), Kévin, tu étais là en face de mon bureau et ça m'apaisait énormément, Olivier R., je n'aurais voulu faire ces trajets en Haute-Marne avec personne d'autre (en Nevada bien sûr !), Corinne G., ma « covoitureuse », pour ton soutien constant et amical de mon travail, Bastien, pour ta gentillesse (ils n'étaient pas si horribles que ça mes méga-protocoles Captiv !), Sylvie pour nos sessions piscines qui m'ont permis de souffler. Je ne peux tous vous citer mais merci à vous tous, de près ou de loin, vous êtes chacun une pierre à part entière de cette thèse.

Aux membres du groupe ESTO : Aurélie, Kévin, Johanna, Eugénie, Déborah, Antoine…merci pour nos échanges précieux pour avancer tous ensemble dans ce travail laborieux de thèse.

À mes amis, avec une attention particulière pour Clémentine, Noémie et Paul… J'ai eu beaucoup de chance de vous avoir auprès de moi pour m'épauler et me soutenir. Merci d'avoir cru en moi. Je vous aime, du plus profond de mon cœur, merci d'être vous. Il me tarde de vous voir enfin plus souvent pour se créer plein de nouveaux souvenirs !

Un grand merci à ma famille, à mes tantes, à mes cousins, à mes grands-parents… Merci à mes parents, Catherine et Alain. Maman, merci pour tes conseils généreux, merci pour m'avoir poussée à aller toujours plus haut avec tant d'amour et de respect et merci de m'avoir transmis ton courage. Papa, merci pour ton oreille toujours attentive et bienveillante, pour ton humour et tes encouragements si réconfortants et pour les valeurs si chères à mon cœur que tu m'as transmises.

Enfin merci à Théau, merci d'être toi, merci de m'avoir donné la force d'atteindre le sommet de cette montagne, d'avoir toujours cru en moi même quand moi je doutais. Merci pour ta patience sans failles et tes bons petits plats réconfortants les soirs de doute. Qu'importe le chemin tant que ma main serre la tienne, pas vrai ?

Résumé

Cette thèse porte sur le secteur de la fonderie et plus particulièrement l'activité d'ébarbage, concernée par la survenue de troubles musculo-squelettiques (TMS). L'ébarbage consiste à enlever les défauts résiduels des pièces notamment à travers le meulage. Dans le but de prévenir les TMS au sein de cette activité, des solutions de robotique collaborative se développent. Un des enjeux de prévention des TMS, dans un contexte de robotique collaborative, réside dans la compréhension de la complexité du geste professionnel et la conception de milieu favorable à son développement. La notion de geste professionnel en ergonomie de l'activité permet de considérer l'articulation des dimensions biomécanique, cognitive et psycho-sociale du geste et sa réalisation dans la situation de travail. Le geste est considéré comme le meilleur compromis trouvé par le travailleur à un moment donné. La thèse défendue dans cette recherche soutient que l'usage d'un cobot a des conséquences sur l'articulation de l'ensemble des dimensions du geste professionnel. Le cobot considéré dans cette étude est un robot d'assistance physique sans contention manipulé par l'opérateur lors de l'activité de meulage. Un des premiers développés de la sorte en France, la spécificité de ce cobot réside dans le fait que l'outil de travail, à savoir la meuleuse, est fixé à l'extrémité de son bras articulé. Lors des opérations de meulage, le travailleur ne manipule plus directement la meuleuse mais le terminal du cobot pour réaliser son geste. La méthodologie déployée dans ce travail a mobilisé des entretiens semi-directifs, des observations de gestes traditionnels et de gestes avec le cobot, des entretiens au poste de travail, des échelles visuelles analogiques et des auto-confrontations individuelles. L'évolution de chacune des dimensions biomécanique, cognitive et psycho-sociale du geste a été analysée dans un objectif de compréhension puis d'analyse de leur articulation. Les résultats de cette recherche montrent notamment que l'usage du cobot diminue l'effort lié au port de l'outil et les vibrations ressentis par les ébarbeurs mais que de nouveaux types d'efforts émergent. De plus, lors de l'usage du cobot les informations sensorielles recueillies par les travailleurs se modifient ce qui agit sur la précision du geste et la qualité du meulage. Enfin, nous avons montré que le sens donné au geste par les individus est impacté par l'usage du cobot qui contraint le rythme de travail et ne permet plus aux ébarbeurs de réaliser un « bon travail » selon leurs critères de qualité. Nos résultats ont alors permis d'identifier une diversité de caractéristiques de la situation de travail à prendre en compte pour agir en matière de prévention des TMS lors de l'usage d'un cobot. Des points de vigilance en matière de prévention des TMS tenant compte des effets du cobot sur le geste dans toutes ses dimensions ont été formulés.

Mots-clés : geste professionnel, troubles musculo-squelettiques, cobot, ébarbage

Abstract

This thesis concerns the foundry sector and more specifically the deburring activity affected by the occurrence of musculoskeletal disorders (MSD). Deburring consists of removing residual faults from the surface of a part in particular by grinding. In order to prevent MSDs in this activity, collaborative robotics solutions are being developed. In this context of collaborative robotics, one of the challenges of MSD prevention is to understand the complexity of the professional gesture and create enabling environments to its development. In activity-centred ergonomics the professional gesture allows analysing all of its biomechanical, cognitive and psychosocial dimensions. The purpose of this work is to describe and analyze the effect of the cobot use on the articulation of all the professional gesture dimensions. The cobot considered in this study is a restraint-free physical assistance robots handled by the operator during the grinding activity. One of the first to be developed in France, the specificity of this cobot is that the work tool, i.e. the grinder, is attached to the end of its articulated arm. During grinding operations, the worker no longer handles the grinder directly but the cobot's terminal to carry out his work. The methodology is based on semi-directive interviews, observations of traditional gestures and gestures with the cobot, interviews at the workstation, visual analogue scales and individual self-confrontations. The evolution of each of the biomechanical, cognitive and psycho-social dimensions of the gesture was analysed with the aim of understanding their articulation. Our results show in particular that the cobot use reduces the effort linked to the carrying of the tool and the vibrations felt by the grinders but new types of effort emerge. Furthermore, during the use of the cobot, the sensory information gathered by the workers changes, which impacts the gesture precision and the quality of the grinding. Finally, we showed that the meaning given to the gesture by the individuals is impacted by the cobot use, which constrains the work rhythm and no longer allows the workers to perform a "good job" according to their quality criteria. Then our results enabled us to identify a variety of characteristics of the work situation to be taken into account in order to take action to prevent MSDs when using a cobot. Points of vigilance in terms of MSD prevention were formulated in relation to the effects of the cobot on the gesture in all its dimensions.

Keywords : professional gesture, musculoskeletal disorders, cobot, deburring

Table des matières

Résumé I
Abstract II
Table des matières III
Table des illustrations VII
Table des annexes X
Glossaire XI
Introduction 1
PARTIE 1 : CADRE THEORIQUE 9
Chapitre 1 : Industrie du futur et robots collaboratifs 9
1. Classification des robots collaboratifs 11
2. Effets de l'utilisation d'un robot collaboratif sur la sécurité et la santé au travail 14
Synthèse et conclusion du chapitre 1 18
Chapitre 2 : Étiologie des modèles de survenue des troubles musculo-squelettiques 19
1. Les TMS, une préoccupation majeure en matière de santé au travail 19
2. De l'exposition aux facteurs de risque biomécanique à une dynamique multifactorielle d'apparition des TMS 21
3. De l'exposition multifactorielle à l'échec des régulations 25
Synthèse et conclusion du chapitre 2 29
Chapitre 3 : Analyse du geste professionnel et prévention des TMS 30
1. Apport de la biomécanique à la compréhension du mouvement 30
2. Apport de la clinique de l'activité à la compréhension du geste 31
3. Apport de la psychodynamique à la compréhension du geste 34
4. Apport de l'ergonomie de l'activité à la compréhension du geste 35
Synthèse du chapitre 3 et définition retenue du geste professionnel dans cette thèse 40
Chapitre 4 : Activité d'ébarbage et TMS 41
1. Secteur de la fonderie 41
2. Activité d'ébarbage et survenue de TMS 42
Synthèse de conclusion chapitre 4 44
PARTIE 2 : CONTEXTE DE L'ETUDE, PROBLEMATIQUE ET METHODOLOGIE 45
Chapitre 5 : Contexte de l'étude 45
1. Présentation de l'entreprise et de l'atelier parachèvement 45
2. Organisation de l'ébarbage 46
3. Historique du développement et de l'introduction du cobot dans l'activité d'ébarbage 49
Synthèse et conclusion du chapitre 5 53
Chapitre 6 : Problématique et hypothèses de recherche 54
1. Problématique 54
2. Modèle du geste 56

Dimension biomécanique du geste professionnel 58
Dimension cognitive du geste professionnel 59
Dimension psycho-sociale du geste professionnel 59
3. Hypothèses 60
Chapitre 7 : Méthodologie 63
1. Participants 63
2. Identification des gestes 64
3. Recueil et mise en forme des données sur les gestes 67
3.1 Observations systématiques 69
3.2 Entretiens au poste de travail 71
3.3 Entretien d'auto-confrontation individuelle consécutif aux observations 72
3.4 Entretien d'auto-confrontation individuelle a posteriori 72
4. Analyse des gestes 74
4.1. Dimension biomécanique 74
4.2. Dimension cognitive 78
4.3. Dimension psycho-sociale 79
4.4. Articulation des dimensions 81
Synthèse et conclusion du chapitre 7 84
PARTIE 3 : RESULTATS 85
Chapitre 8 : Analyse descriptive de l'évolution des modes opératoires 86
1. Position de l'opérateur par rapport à la pièce 87
2. Position des mains sur l'outil de travail 88
3. Orientation de la meuleuse par rapport à l'opérateur 89
4. Inclinaison du disque par rapport à la surface 90
5. Mouvements réalisés avec l'outil de travail 91
Synthèse 93
Chapitre 9 : Évolution des dimensions du geste professionnel 94
1. Évolution des composantes de la dimension biomécanique 94
1.1 Évolution de l'effort global ressenti 94
1.2 Évolution des vibrations ressenties lors de l'usage du cobot 97
1.3 Évolution de la répétitivité des mouvements effectués par les ébarbeurs 97
1.4 Évolution des postures adoptées par les ébarbeurs lors de l'usage du cobot 99
Synthèse 110
2. Évolution des composantes de la dimension cognitive 111
2.1 Évolution de la concentration 111
2.2 Évolution du recueil d'informations sensorielles 112
2.3 Évolution du traitement de l'information et des prises de décision 116
Synthèse 120
3. Évolution des composantes de la dimension psycho-sociale 121
3.1 Évolution de la qualité perçue par les ébarbeurs 121
3.2 Évolution de la protection de soi 124

3.3 Émergence d'empêchement 126
3.4 Évolution des émotions ressenties 128
3.5 Évolution de la reconnaissance du geste 130
Synthèse 132
Chapitre 10 : Évolution de l'articulation des dimensions du geste professionnel 133
1. Articulation de la dimension biomécanique avec les autres dimensions du geste professionnel 133
Synthèse 141
2. Articulation de la dimension cognitive avec les autres dimensions du geste professionnel 143
Synthèse 149
3. Articulation de la dimension psycho-sociale avec les autres dimensions du geste professionnel 151
Synthèse 158
4. Synthèse du chapitre 10 160
Une diminution de l'effort lié au port de l'outil mais l'émergence de nouveaux types d'efforts lors de l'usage du cobot 160
Une modification des informations visuelles recueillies lors de l'usage du cobot 161
Le sens donné au geste par les individus impacté par un rythme de travail contraint par le cobot 162
Caractéristiques de la situation de travail et caractéristiques propres aux individus influençant l'évolution du geste professionnel 163
Synthèse de la partie résultats 167
PARTIE 4 : DISCUSSION 168
1. Évolution du geste professionnel lors de l'usage d'un cobot : lien avec la prévention des TMS 168
1.1. Évolution des dimensions du geste professionnel 168
1.2. Évolution de la performance du geste professionnel 172
1.3. Caractéristiques influençant l'évolution du geste professionnel 175
2. Limites de cette recherche 178
2.1. Situation d'usage du cobot 178
2.2. Analyse de deux gestes avec des niveaux d'apprentissage différents 179
2.3. Méthodologie 179
3. Apports et perspectives de cette recherche 180
3.1. Conception d'une situation de travail future intégrant un cobot 180
3.2. Développement du geste lors de l'introduction d'un cobot 186
3.3. L'Homme au cœur de l'Industrie du futur ? 186
Conclusion 192
Bibliographie 193
Annexes 204

Table des illustrations

Liste des figures

Figure 1 : Partage d'espace de travail 12
Figure 2 : Collaboration indirecte 12
Figure 3 : Collaboration directe 13
Figure 4 : Robot d'assistance physique sans contention manipulé par l'opérateur (RB3D, 2014) 14
Figure 5 : Conséquences biologiques du stress sur la survenue ou l'aggravation des TMS (Aptel et Cnockaert, 2002) 22
Figure 6 : Dynamique d'apparition des TMS (Aptel et al., 2014) 24
Figure 7 : Modèle de la genèse des TMS liés au travail (Stock et al., 2013) 24
Figure 8 : Modèle de compréhension des situations de travail centrée sur la personne en activité (Vézina, 2001) 26
Figure 9 : Cadre général pour l'analyse de l'activité (Leplat, 2006) 26
Figure 10 : Détail de la partie "activité" en lien avec les TMS (Vézina, 2001) 37
Figure 11 : Différents ateliers d'une fonderie illustrant le processus de fabrication d'une pièce 41
Figure 12 : Processus de fabrication d'une pièce (partie haute de gauche à droite) avec les différentes activités du parachèvement (partie basse) 46
Figure 13 : Illustration des équipements des ébarbeurs 48
Figure 14 : Illustration des composantes de la meuleuse traditionnelle 48
Figure 15 : Illustration des composantes du cobot 49
Figure 16 : Modélisation du geste professionnel au sein de l'activité 57
Figure 17 : Illustration d'une pièce courbe 65
Figure 18 : Modes de recueil de données 68
Figure 19 : Inclinaison du disque par rapport à la surface 69
Figure 20 : Direction des mouvements réalisés avec l'outil de travail 70
Figure 21 : Position de l'opérateur par rapport à la pièce 70
Figure 22 : Position des mains sur l'outil de travail 70
Figure 23 : Orientation de la meuleuse par rapport à l'opérateur 71
Figure 24 : Exemple de chronique d'activité support de l'entretien d'auto-confrontation individuelle a posteriori 73
Figure 25 : Estimation de l'effort ressenti par les ébarbeurs (E) selon le geste réalisé (traditionnel vs cobot) et la surface travaillée (verticale et horizontale) 94
Figure 26 : Ébarbeur meulant une surface verticale lors du geste traditionnel 95
Figure 27 : Ébarbeur meulant une surface horizontale lors du geste traditionnel 96
Figure 28 : Ébarbeur meulant une surface verticale (à gauche) et horizontale (à droite) lors du geste cobot 96

Figure 29 : Estimation des vibrations ressenties par les ébarbeurs (E) selon le geste réalisé (traditionnel vs cobot) et la surface travaillée (verticale et horizontale) 97
Figure 30 : Répétitivité des mouvements effectués par les ébarbeurs (E) avec l'outil de travail par minute selon le geste réalisé (traditionnel vs cobot) et la surface travaillée (verticale et horizontale) 98
Figure 31 : Estimation de la concentration par les ébarbeurs 111
Figure 32 : Estimation de la qualité perçue par les ébarbeurs 121
Figure 33 : Exemple de l'aspect visuel d'une surface lisse sans défauts apparents (geste traditionnel) 122
Figure 34 : Exemple d'une surface présentant des crans (geste cobot) 123
Figure 35 : Estimation des émotions ressenties par les ébarbeurs 128
Figure 36 : Illustration des inclinaisons du disque lors du geste cobot (à gauche) et lors du geste traditionnel (à droite) 136
Figure 37 : Schématisation de l'articulation de la dimension biomécanique avec les autres dimensions du geste professionnel 142
Figure 38 : Schématisation de l'articulation de la dimension cognitive avec les autres dimensions du geste professionnel 150
Figure 39 : Exemple de l'aspect visuel d'une surface meulée suite au geste traditionnel (à gauche) et suite au geste cobot (à droite) 155
Figure 40 : Schématisation de l'articulation de la dimension psycho-sociale avec les autres dimensions du geste professionnel 159
Figure 41 : Modélisation du geste cobot au sein de l'activité 166

Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques individuelles des ébarbeurs volontaires 64
Tableau 2 : Découpage de l'activité de meulage traditionnel et assisté par le cobot 65
Tableau 3 : Présentation des gestes 67
Tableau 4 : Modes de recueil de données sur les gestes 67
Tableau 5 : Outil de description des postures selon les zones articulaires de confort et à risque de développement de TMS 75
Tableau 6 : Grille de codage de la dimension biomécanique 77
Tableau 7 : Grille de codage de la dimension cognitive 79
Tableau 8 : Grille de codage de la dimension psycho-sociale 80
Tableau 9 : Position de l'opérateur par rapport à la pièce 87
Tableau 10 : Position des mains sur l'outil de travail 89
Tableau 11 : Orientation de la meuleuse par rapport à l'opérateur 90
Tableau 12 : Inclinaison du disque par rapport à la surface 91
Tableau 13 : Mouvements réalisés avec l'outil de travail 92
Tableau 14 : Directions et amplitudes des mouvements réalisés lors des gestes traditionnels et lors des gestes cobot 98

Tableau 15 : Flexion du cou lors des gestes traditionnels et lors des gestes cobot 100
Tableau 16 : Torsion du cou lors des gestes traditionnels et lors des gestes cobot..... 101
Tableau 17 : Flexion du tronc lors des gestes traditionnels et lors des gestes cobot 102
Tableau 18 : Abduction des épaules lors des gestes traditionnels et lors des gestes cobot... 103
Tableau 19 : Flexion/extension des coudes lors des gestes traditionnels et lors des gestes cobot 105
Tableau 20 : Flexion/extension des poignets lors des gestes traditionnels et lors des gestes cobot 107
Tableau 21 : Abduction/adduction des poignets lors des gestes traditionnels et lors des gestes cobot 109
Tableau 22 : Informations visuelles recueillies lors du geste traditionnel et lors du geste cobot 113
Tableau 23 : Informations tactiles recueillies lors du geste traditionnel et lors du geste cobot 115
Tableau 24 : Empêchements évoqués par les ébarbeurs 127
Tableau 25 : Types d'émotions ressenties lors des gestes traditionnels et lors des gestes cobot 129
Tableau 26 : Reconnaissance du geste perçue par les ébarbeurs 130
Tableau 27 : Douleurs ressenties suite aux gestes traditionnels et aux gestes cobot (schéma corporel)..... 140

Table des annexes

Annexe 1 : Frise chronologique de l'historique du projet de développement et d'introduction du cobot 204
Annexe 2 : Guide d'entretiens avec les ébarbeurs (entretiens semi-directifs) 206
Annexe 3 : Guide d'entretiens avec les ébarbeurs (entretiens au poste de travail) 207
Annexe 4 : Guide d'entretiens avec les ébarbeurs (entretiens d'auto-confrontation individuelle a posteriori) 208
Annexe 5 : Définition et fonctionnalités de l'outil Captiv 209
Annexe 6 : Définition et fonctionnalités du logiciel NVivo 209
Annexe 7 : Postures adoptées par le cou lors des gestes traditionnels et lors des gestes cobot 210
Annexe 8 : Postures adoptées par le tronc lors des gestes traditionnels et lors des gestes cobot 211
Annexe 9 : Postures adoptées par les épaules lors des gestes traditionnels et lors des gestes cobot 212
Annexe 10 : Postures adoptées par les coudes lors des gestes traditionnels et lors des gestes cobot 214
Annexe 11 : Postures adoptées par les poignets lors des gestes traditionnels et lors des gestes cobot 215

Glossaire

E : Ébarbeur

EVA : Échelle Visuelle Analogique

Geste cobot : Geste réalisé avec le cobot

Geste traditionnel : Geste réalisé avec la meuleuse traditionnelle

INRS : Institut National de Recherche et de Sécurité

Meuleuse traditionnelle : Meuleuse manuelle

SH : Surface Horizontale

SV : Surface Verticale

TMS : Troubles Musculo-Squelettiques

Introduction

Cette thèse répond à l'expression, par une entreprise du secteur de la fonderie, de préoccupations portant sur la prévention des troubles musculo-squelettiques (TMS) en lien avec l'usage d'un robot collaboratif pour l'activité d'ébarbage. En effet, les principaux avantages de l'usage de cobots énoncés dans la littérature sont d'améliorer la productivité et la flexibilité de l'entreprise et de réduire les TMS. Au vu de la littérature et du contexte de cette étude, nous avons alors décidé d'aborder cette question de l'introduction de la robotique collaborative dans une visée de prévention des TMS par l'analyse de l'évolution du geste professionnel entre l'ébarbage traditionnel (utilisant une meuleuse traditionnelle) et l'ébarbage assisté par le cobot.

Industrie du futur et robots collaboratifs

Différentes révolutions industrielles ont marqué l'évolution du travail. La troisième révolution a notamment automatisé la production avec le début de la robotique industrielle. Ce passage du manuel à l'automatisation a rencontré des difficultés dans certaines situations (Bainbridge, 1983; Barbé, 2007; Böhle & Milkau, 1998; Dodier, 1995; Jeantet & Tiger, 1988; Linhart, 1981; Parasuraman & Wickens, 2008) ; si bien que certains métiers automatisés ont été alors parfois reconvertis en activités manuelles (Classen, 2019). Une explication à cette situation porte sur la difficulté pour les concepteurs à comprendre la complexité des gestes professionnels nécessaires à ces activités et à les reproduire (Barbé, 2007; Peshkin et al., 2001). Face à ces difficultés d'automatisation, une solution alternative à la robotique industrielle concerne l'apport d'une robotique avec laquelle l'opérateur puisse interagir sur son poste de travail : la robotique collaborative (Peshkin & Colgate, 1999).

Cette solution alternative est un des moyens mis en œuvre pour accompagner les entreprises vers l'Industrie du futur, ou Industrie 4.0. Cette dernière propose de répondre aux besoins des entreprises qui doivent rester toujours plus compétitives sur des marchés plus concurrentiels avec de nouvelles formes d'organisation et de nouveaux moyens de production.

La démarche initiée en France se distingue des pays européens par l'enjeu de mettre « l'homme au cœur de cette excellence opérationnelle » (AIF, 2018, p. 11) en avançant que « la technologie et l'organisation permettent de le décharger des tâches pénibles, répétitives, pour qu'il se concentre sur les tâches à fortes valeurs ajoutées » (p. 8). Parmi les équipements émergents de l'Industrie du futur, les robots collaboratifs sont définis comme permettant une interaction directe avec un opérateur humain dans un espace de travail partagé (Peshkin & Colgate, 1999). Ces situations de robotique collaborative permettraient d'améliorer la productivité et la flexibilité de l'entreprise et de réduire les troubles musculo-squelettiques (TMS). Les individus seraient alors soulagés des tâches pénibles et répétitives tout en préservant leur savoir-faire et la qualité de leur travail. Toutefois, des retours d'expériences montrent qu'en dépit d'une assistance au port de l'outil apportée à l'opérateur par exemple, de nouvelles problématiques apparaissent avec l'usage d'un cobot comme des risques de choc, de coincement ou encore l'adoption de postures contraignantes par les utilisateurs (Jocelyn, Burlet-Vienney, Giraud, & Sghaier, 2017; Maurice, Measson, Padois, & Bidaud, 2013; Maurice, Padois, Measson, & Bidaud, 2017). Les auteurs rappellent alors la nécessité de s'assurer que l'usage du cobot n'engendre pas d'efforts supplémentaires et ne cause pas de nouvelles situations à risque de développement de TMS.

Prévention des troubles musculo-squelettiques

Les TMS regroupent un ensemble de troubles et de maladies qui touchent les articulations, les muscles, les tendons et les nerfs (Buckle & Devereux, 2002; Côté et al., 2013). Ces troubles peuvent concerner aussi bien les membres supérieurs, le dos que les membres inférieurs (Aptel & Aublet-Cuvelier, 2005). Les TMS sont les pathologies les plus répandues dans le monde du travail dans les pays industrialisés. En France, ils sont depuis plus de 20 ans la première maladie professionnelle reconnue (*Rapport annuel 2019 de l'Assurance Maladie - Risques professionnels*, 2020). Les TMS sont des pathologies multifactorielles dues à une dynamique d'exposition entre des facteurs biomécaniques, psycho-sociaux, organisationnels et individuels. Leur prévention s'est majoritairement basée sur la réduction des facteurs de risque auxquels sont exposés les travailleurs (NIOSH, 1997; Silverstein, Fine, & Armstrong, 1986) en cherchant à supprimer les contraintes qui pèsent sur les travailleurs ou tout du moins

à les réduire. Cette approche a notamment permis de démontrer la nécessité d'adopter un point de vue pluridisciplinaire pour prévenir les TMS (Aptel, Cail, & Aublet-Cuvelier, 2011).

Cependant, la notion d'exposition aux facteurs de risque peut laisser supposer que les travailleurs soient « passifs » dans un environnement à risque associant directement une caractéristique de la situation à un effet délétère sur la santé de l'individu. Or, quand l'environnement de travail le permet, l'individu en situation de travail est un individu « capable » (Rabardel et al., 1998) de mettre en place des stratégies en faveur de sa santé et sa sécurité et de sa performance (St-Vincent et al., 2011; Vézina, 2001). Ainsi, en complément de l'identification et de la maîtrise des facteurs de risque auxquels sont exposés les travailleurs, il est nécessaire de chercher à augmenter les ressources disponibles aux individus ; et ce notamment grâce à des approches plus constructives (Canguilhem, 1943; Falzon, 2013) centrées sur l'individu et son activité de travail (Guérin, Laville, Daniellou, Duraffourg, & Kerguelen, 2006). Le point de vue se décale sur ce que les individus font en situation de travail, ce qu'ils cherchent à faire, ce qu'ils mobilisent mais également ce qu'ils ne font pas et/ou ce qu'ils auraient voulu faire. Ainsi, un des enjeux pour prévenir la survenue des TMS, proposé notamment par l'ergonomie de l'activité, est de concevoir des situations de travail offrant la possibilité aux individus de développer des régulations en faveur de leur santé et de leur performance. Ces régulations peuvent se caractériser par le développement du geste professionnel (Bourgeois et al., 2006; Vézina, 2001).

Concept du geste professionnel en ergonomie de l'activité

Le geste professionnel élaboré par le travailleur correspond au meilleur compromis trouvé par lui, à un moment donné (Bourgeois et al., 2006). Les conséquences sont doubles : d'une part, un enjeu de santé dans le sens de « bien-être physique et mental » et d'autre part, un enjeu de production « autant en termes de quantité à produire que de qualité du produit » (Vézina, 2001, p.46). Si l'un et/ou l'autre de ces enjeux ne peuvent pas être atteints alors un déséquilibre s'installe et peut conduire à l'apparition de TMS. Ainsi, la possibilité de réaliser son geste professionnel peut être une ressource pour la prévention des TMS quand les moyens de le construire sont présents. Si ce n'est pas le cas alors le geste se trouve « empêché » et ce geste « qui ne se fait pas » devient « délétère » et peut conduire à des maladies

professionnelles comme les TMS (Clot, 2006, 2011). Il a également été démontré dans la littérature que ne pas avoir les moyens de faire un travail de qualité peut entraîner des atteintes à la santé (Caroly et al., 2008 ; Dejours, 2003 ; Pezé, 1998).

Le geste professionnel est multidimensionnel (Bourgeois et al., 2006 ; Bourgeois & Hubault, 2005 ; Brunet, 2011 ; Chassaing, 2006 ; Vézina, 2001) et ne peut donc, tout comme les TMS, se réduire à son seul aspect biomécanique qui, à lui seul, « ne peut en saisir la complexité et les différentes facettes » (Caroly et al., 2008). Il est également nécessaire de comprendre « les intentions et les motifs » (Bourgeois et al., 2006, p. 161), « le recours aux sens, à la mémoire, à l'expérience » (Chassaing, 2006, p. 259) en menant « une analyse assurant l'identification des composantes cognitives » (p. 259) qui font partie du geste professionnel réalisé. De même, en « prônant un changement de gestes dans le travail, on bouleverse une modalité d'inscription du sujet dans la société, et au-delà on atteint jusqu'à la personne et son identité [puisque] l'on touche alors au noyau central de ce qui fait que chacun de nous se reconnaît et est reconnu par les autres comme membre d'une communauté d'appartenance culturelle, sociale ou professionnelle. Voilà l'une des raisons principales pour lesquelles il est si difficile de modifier les gestes utilisés traditionnellement. » (Dejours, Dessors, & Molinier, 1994, p. 2).

Le concept de geste professionnel en ergonomie de l'activité permet alors de garder articulé l'ensemble de ses dimensions biomécanique, cognitive et psycho-sociale au sein de l'activité (Bourgeois et al., 2006 ; Bourgeois & Hubault, 2005 ; Brunet, 2011 ; Chassaing, 2006 ; Vézina, 2001). Ainsi, le geste professionnel se compose dans l'articulation de ses dimensions. Nous considérons ainsi que la dimension biomécanique concerne l'analyse du mouvement incluant les postures adoptées, l'effort et les vibrations ressentis ainsi que la répétitivité des mouvements effectués (Luttmann et al., 2003; NIOSH, 1997; Silverstein et al., 1986). La dimension cognitive s'intéresse au recueil et au traitement des informations perçues, à la prise de décision et à la concentration mobilisée dans le geste réalisé (Hoc & Amalberti, 1999; Sperandio, 1983). Enfin la dimension psycho-sociale se focalise, du point de vue du geste, sur la qualité du travail perçue, les émotions ressenties, la protection de soi, l'empêchement et la reconnaissance du geste (Clot, 1999, 2004; Dejours, 2003; Morin & Aranha, 2007; Petit & Dugué, 2013; Van De Weerdt, 2003).

Activité d'ébarbage et contexte de l'étude

L'ébarbage consiste à enlever le surplus de matière d'une pièce selon différentes opérations notamment de meulage (Ramachandran, Pande, & Ramakrishnan, 1994) et demande une précision importante (Odum, Castillo, Das, & Linke, 2014; Ramachandran et al., 1994; Vasselin & Wioland, 2007). Pour cela, les ébarbeurs utilisent des meuleuses qui sont des outils énergisés entraînant en rotation un bloc cylindrique abrasif appelé meule. Catégorisées parmi les machines les plus nuisantes et dangereuses (poids, bruit, effort...), Vasselin et Wioland (2007) montrent, dans leur étude, que les ébarbeurs utilisent ces outils plus de 50% de leur temps de travail. L'ébarbage fait partie des activités les plus éprouvantes physiquement et mentalement dans le secteur de la fonderie. Il est particulièrement concerné par la survenue de TMS (Vasselin & Wioland, 2007). Les douleurs se localisent principalement au niveau des poignets, des épaules et des lombaires (Atain-Kouadio et al., 2004).

Une entreprise du secteur de la fonderie, terrain de cette étude, est particulièrement préoccupée par une problématique importante de TMS au sein de l'ébarbage. Face à ce constat et compte tenu de la fabrication de pièces unitaires et du savoir-faire des ébarbeurs, un projet visant à assister ces opérateurs dans ces tâches à fortes contraintes physiques a émergé : celui-ci concernait le développement d'une solution de robotique collaborative (Atain-Kouadio, Sghaier, & Picot, 2015). Cette entreprise a alors participé à la conception d'un robot d'assistance physique sans contention manipulé par l'opérateur (RAPscM appelé ici « cobot »). Un des premiers développés de la sorte en France, la spécificité de ce cobot concerne le fait que l'outil de travail, la meuleuse, soit fixée à l'extrémité de son bras articulé. L'opérateur ne manipule alors plus directement la meuleuse mais le terminal du cobot pour réaliser ses opérations d'ébarbage le soulageant du poids et des vibrations de l'outil et de l'effort inhérent au meulage.

Le postulat initialement formulé par l'entreprise, en suivant les arguments avancés par la conception de ce type de robots collaboratifs, est qu'en diminuant le poids supporté par les opérateurs par la démultiplication de l'effort et les vibrations de la meuleuse par l'introduction de dispositifs réducteurs des vibrations, les sollicitations biomécaniques (effort de meulage et

vibrations) diminuent réduisant ainsi le risque de survenue de TMS tout en gardant le savoir-faire gestuel des ébarbeurs. Une analyse rétrospective du projet de développement et d'implantation de ce cobot dans l'activité d'ébarbage montre que ce projet s'est initié avec une vision partielle des TMS centrée uniquement sur la dimension biomécanique réduite aux efforts de meulage et aux vibrations (Schoose, Caroly, Cuny-Guerrier, & Savescu, 2020). Suite à l'introduction et l'usage de ce cobot, les premiers constats de ce projet ont été que la réduction attendue des sollicitations biomécaniques (réduction des efforts et des vibrations) ne semble pas « suffire » pour soulager les opérateurs. En effet, les ébarbeurs émettent des plaintes lors de l'utilisation de ce dispositif : des douleurs sont ressenties, une qualité moindre, une durée de travail plus élevée... Les effets sur la santé et la performance des ébarbeurs ont été sous-estimés. Ce cobot, introduit dans l'activité d'ébarbage fin 2012, est moins utilisé qu'initialement envisagé. Cette entreprise souhaite obtenir des réponses argumentées sur l'impact du cobot sur l'activité des ébarbeurs pouvant expliquer la situation actuelle et permettre de modifier ou concevoir de nouvelles situations d'usage.

Dans ce contexte et compte tenu du peu de littérature scientifique sur le lien entre l'usage de ce cobot et la prévention des TMS, l'INRS a proposé une étude sur ce sujet. Analyser uniquement les effets sur certaines contraintes biomécaniques est insuffisant au vu de la littérature et du contexte de cette étude. Nous avons décidé d'aborder cette question de l'introduction de la robotique collaborative dans une visée de prévention des TMS par l'analyse de l'évolution du geste professionnel dans ses différentes dimensions. Ce cobot, comme les applications de robotique collaborative en général, engendre des modifications des situations de travail qu'il faut pouvoir décrire et comprendre pour s'assurer de leur contribution en faveur de la santé/sécurité et la performance des travailleurs.

Un enjeu pour la prévention des TMS est de concevoir des milieux favorables au développement des gestes professionnels dans l'articulation de leurs dimensions biomécanique, cognitive et psycho-sociale. Il nous est donc apparu nécessaire de décrire et comprendre l'évolution des gestes professionnels des ébarbeurs dans ce contexte de robotique collaborative pour s'assurer que les évolutions futures soient en faveur de la santé, la sécurité

et la performance des travailleurs. Ainsi, l'objectif général de cette recherche porte sur la description de l'évolution du geste professionnel entre le meulage traditionnel et le meulage assisté par un cobot. Plus précisément, l'objectif de cette thèse est de comprendre comment évolue l'articulation des dimensions biomécanique, cognitive et psycho-sociale avec l'usage du cobot et quelles conséquences cela a sur la santé, la sécurité et la performance des travailleurs. Cette analyse permettra d'expliciter les déterminants de la situation de travail influençant l'évolution des gestes afin de proposer des points de vigilance à prendre en compte pour agir en faveur de la prévention des TMS lors de l'usage d'un cobot. L'impact du cobot sur les gestes professionnels des ébarbeurs est analysé de façon à proposer des réponses argumentées à l'entreprise dans laquelle cette étude se réalise pour expliquer le faible usage du cobot et envisager le futur. Cette étude permettra également de proposer aux entreprises des points de vigilance à prendre en compte en amont d'un projet de développement et d'intégration d'un cobot visant à prévenir les TMS. De plus, elle apportera des connaissances sur l'impact réel de l'usage du cobot en situation réelle de travail aux concepteurs de ce type de cobot afin d'éviter des écueils de conception. La recherche sur la prévention des TMS et la robotique collaborative a besoin d'évoluer vers une meilleure compréhension de l'évolution du geste dans toutes ses dimensions.

Présentation de l'organisation de la thèse

Le présent manuscrit se compose de quatre parties.

La première partie présente le cadre théorique de cette thèse. Le premier chapitre concerne l'Industrie du futur en montrant historiquement le passage d'une activité manuelle à une activité automatisée puis à une activité incluant un robot collaboratif. La classification des robots collaboratifs est abordée en définissant celui sur lequel cette étude porte. Les effets avancés dans la littérature sur la santé/sécurité et la performance des travailleurs de l'usage d'un cobot sont présentés. Le second chapitre retrace l'étiologie des modèles de survenue des TMS afin de situer l'approche théorique sur laquelle se base cette thèse. Tout d'abord le passage de l'exposition aux facteurs de risque biomécanique à une dynamique multifactorielle d'apparition des TMS est abordé ainsi que la nécessité de prendre également en compte les régulations dans l'activité des travailleurs. Le chapitre 3 évoque l'intérêt de passer par l'analyse

du geste professionnel au sein de l'activité pour prévenir les TMS en montrant l'apport pluridisciplinaire à sa description et sa compréhension. Enfin, le chapitre 4 présente le secteur de la fonderie et l'activité d'ébarbage en lien avec la survenue de TMS.

À l'issue de ce cadre théorique, la seconde partie de cette recherche concerne le contexte de l'étude, la problématique et les hypothèses de recherche ainsi que la méthodologie déployée. Le chapitre 5 détaille le contexte de cette étude en présentant l'entreprise et l'organisation de l'ébarbage ainsi que l'historique du développement et de l'introduction du cobot. Le chapitre 6 concerne la problématique de cette thèse, le modèle théorique sur lequel nous nous appuyons ainsi que les hypothèses de recherche rattachées. Enfin, le dernier chapitre explique la méthodologie empruntée dans cette étude pour répondre aux hypothèses de recherche.

Les résultats de cette thèse sont présentés au sein de la troisième partie. Le chapitre 8 concerne l'analyse descriptive des modes opératoires. Le chapitre 9 décrit l'évolution de chacune des dimensions du geste professionnel. L'évolution de l'articulation des dimensions du geste est analysée au sein du chapitre 10.

Enfin, la dernière partie de la thèse porte sur une discussion des résultats ainsi que sur les limites et les perspectives de cette recherche.

Partie 1 : Cadre théorique

Le cadre théorique de cette thèse comporte quatre chapitres qui visent à introduire des notions importantes pour notre problématique. Le premier chapitre concerne l'Industrie du futur et les robots collaboratifs. Le second chapitre retrace l'étiologie des modèles de survenue des TMS afin de situer l'approche théorique sur laquelle se base cette thèse. Puis, l'intérêt de passer par l'analyse du geste professionnel dans l'activité pour prévenir les TMS est présenté dans le chapitre 3 en montrant l'apport pluridisciplinaire à sa description et sa compréhension. Enfin, le chapitre 4 s'intéresse au secteur de la fonderie et à l'activité d'ébarbage en lien avec la survenue de TMS.

Chapitre 1 : Industrie du futur et robots collaboratifs

L'évolution du travail est marquée par différentes révolutions industrielles (Bahrin, Othman, & Nor, 2016; Neugebauer, Hippmann, Leis, & Landherr, 2016; Saraceno, 2020; Vaidya, Ambad, & Bhosle, 2018). La première révolution, en 1784, est basée sur l'invention de la machine à vapeur et la découverte du charbon sur lesquelles se repose la production. En 1870, une deuxième révolution industrielle a lieu avec l'électricité et le pétrole entraînant la production de masse. Puis, en 1969, une troisième révolution industrielle émerge avec la volonté d'automatiser la production grâce à l'électronique, l'information et la télécommunication avec l'avènement du numérique et des technologies de l'information et la communication (TIC). L'objectif de cette troisième révolution industrielle est d'automatiser la production avec le début de la robotique industrielle.

Le passage du manuel à l'automatisation, loin d'être aisé, rencontre des difficultés dans certaines situations de travail (Bainbridge, 1983; Barbé, 2007; Böhle & Milkau, 1998; Dodier, 1995; Jeantet & Tiger, 1988; Linhart, 1981; Parasuraman & Wickens, 2008). En effet, des difficultés à gérer les situations inhabituelles émergent. L'activité des professionnels est modifiée avec un retour sensoriel limité, un sentiment d'angoisse, l'adoption de nouvelles stratégies et la perte des repères professionnels. Un passage du livre « Des manivelles au clavier » de Jeantet et Tiger (1988) illustre bien le besoin pour les travailleurs de rechercher de

nouveaux repères : « Ils s'inventent, cependant, de nouveaux repères, guettent de nouveaux signes qui puissent leur servir d'indicateurs leur permettant de suivre le bon déroulement des opérations. Même si, sur ce matériel beaucoup mieux carrossé pour des raisons de sécurité, cette recherche les conduit, au mépris des consignes à travailler capot ouvert : « On aime bien encore voir comment travaille notre outil », s'excusent-ils. Ils essaient d'observer les enchaînements des séquences opératoires, mais c'est alors la rapidité des changements automatiques d'outils qui les gêne. Si bien qu'une fois la pièce réalisée, il leur est beaucoup plus difficile qu'avant de savoir à quel moment s'est produit le défaut. Ainsi, malgré leurs efforts, les nouvelles machines les tiennent-elles davantage éloignés que les précédents de la connaissance effective du travail de l'outil sur la pièce. De plus en plus privés des moyens d'observation immédiats qui constituaient les vecteurs de cette connaissance, ils sont renvoyés à l'appréciation d'un résultat dont ils ont de plus en plus de mal à suivre les phases concrètes. Un nouveau métier est-il ainsi en train de naître ? » (Jeantet & Tiger, 1988, pp. 54-55)

Certains processus automatisés sont alors parfois reconvertis en activités manuelles (Classen, 2019). Une des explications à cela porte sur la difficulté à reproduire la complexité des gestes professionnels nécessaires à ces activités (Barbé, 2007; Peshkin et al., 2001). Face à ces difficultés d'automatisation, une solution alternative à la robotique industrielle concerne l'apport d'une robotique avec laquelle l'opérateur peut interagir sur son poste de travail : la « robotique collaborative » (Peshkin & Colgate, 1999). Cette solution alternative est un des moyens mis en œuvre pour accompagner les entreprises dans la quatrième révolution industrielle : l'Industrie du futur ou Industrie 4.0 (Bahrin et al., 2016; Lafeuillade, 2021; Neugebauer et al., 2016; Saraceno, 2020; Vaidya et al., 2018).

Cette quatrième révolution industrielle est marquée par l'omniprésence du numérique avec objets connectés et intelligence artificielle et l'essor des nouvelles technologies. Sa volonté est de moderniser l'industrie. En France, l'Alliance Industrie du Futur (AIF, 2018) est créée et réunit des organisations professionnelles de l'industrie et du numérique ainsi que des partenaires académiques et technologiques. Le gouvernement lance alors une opération visant une industrie « connectée, optimisée et créative » (FIM, 2015). Cette révolution industrielle répond aux besoins des entreprises qui doivent rester toujours plus compétitives sur des

marchés concurrentiels. Les enjeux avancés par l'Industrie du futur sont de prendre en compte l'évolution des marchés, d'être au plus près du client pour rendre l'offre toujours plus compétitive, de repenser le modèle organisationnel pour que l'organisation devienne « plus apprenante, plus collaborative » tout en prenant en compte l'aspect environnemental. La démarche française se « distingue sur le plan international » par sa volonté de « placer l'Homme au cœur de l'Industrie du futur » où « la technologie et l'organisation permettent de le décharger des tâches pénibles, répétitives pour qu'il se concentre sur les tâches à forte valeur ajoutée » (AIF, 2018, p. 8). En effet, un des leviers de compétitivité avancé par l'Industrie du futur est d'avoir une nouvelle approche de l'Homme au travail et ce notamment par l'introduction de robots collaboratifs au sein des situations de travail.

Les robots collaboratifs sont définis comme des robots conçus pour une interaction directe avec un opérateur humain dans un espace de travail partagé (Peshkin & Colgate, 1999). L'évolution des concepts de robotique classique vers la robotique collaborative est argumentée par le fait que cette dernière « n'a plus vocation à remplacer l'Homme mais à l'assister ou à prolonger ses gestes pour apporter précision, force et dextérité » (CEA, 2015). Une étude exploratoire menée auprès d'industriels déjà utilisateurs de robots industriels montre que près de deux tiers des personnes interrogées expriment un intérêt potentiel pour la robotique collaborative (Tihay, 2018). Leurs attentes visent principalement à améliorer la productivité et la flexibilité de l'entreprise et à réduire les troubles musculo-squelettiques (TMS) (Bigliardi, Bottani, & Casella, 2020). Les individus seraient alors soulagés des tâches pénibles et répétitives tout en préservant leur savoir-faire (Peshkin & Colgate, 1999). Néanmoins, les éléments avancés par cette littérature ne sont pas démontrés et sont à investiguer pour s'assurer que ces nouvelles situations de travail ne génèrent pas d'autres problématiques de santé et sécurité au travail notamment du point de vue de la prévention des TMS.

1. Classification des robots collaboratifs

L'organisation internationale de normalisation (ISO) définit le robot collaboratif comme un robot conçu pour interagir directement avec l'humain (ISO13482, 2014). Plus précisément, un robot collaboratif est « un bras articulé énergisé, plus ou moins autonome, conçu pour

travailler à proximité des opérateurs ou en relation directe avec eux » (Blaise et al., 2020, p. 3). Différentes classifications de la robotique collaborative existent dans la littérature et varient selon le degré d'interaction entre l'homme et le cobot. Par exemple, Bounouar et al. (2022) distinguent deux types de solutions :

- Les solutions de « robots collaboratifs » qui visent à effectuer des tâches de manière autonome, sans intervention humaine où la principale évolution par rapport à la robotique industrielle réside, par exemple, dans la suppression des barrières ou des grilles de sécurité. Les robots collaboratifs doivent alors être programmés et exécutent des tâches de manière autonome.

- À l'inverse, les solutions « cobots » nécessitent la présence de l'opérateur pour réaliser les tâches et visent à aider le travailleur en augmentant la force exercée ou en prenant en charge le poids de l'outil par exemple. Les « cobots » nécessitent ainsi la présence permanente de l'individu pour accomplir le travail.

Une autre classification propose de distinguer trois familles selon lesquelles peuvent être classés les différents types d'interaction homme-cobot (Tihay & Perrin, 2018):

- le partage d'espace de travail (cf. Figure 1): l'opérateur effectue des tâches distinctes de celles du cobot mais les deux sont amenés à partager un même espace de travail,

Figure 1 : Partage d'espace de travail

- la collaboration indirecte (cf. Figure 2) : l'opérateur travaille sur une même pièce avec le cobot mais leurs actions sont alternées,

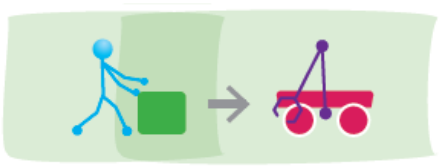


Figure 2 : Collaboration indirecte

- la collaboration directe (cf. Figure 3) : l'opérateur travaille simultanément avec le cobot à la réalisation d'une même pièce. Ce type de collaboration intègre le cobot considéré dans cette étude. L'opérateur guide le cobot, il ne manipule pas l'outil directement mais le terminal du cobot sur lequel est fixé l'outil. Le terminal développe ainsi un effort démultiplié par rapport à l'effort exercé par l'opérateur. Il est également muni de dispositifs spécifiques pour diminuer les vibrations.

Figure 3 : Collaboration directe

Les cobots en contact direct avec l'utilisateur comprennent aussi les robots d'assistance physique (RAP) destinés à aider physiquement un utilisateur à exécuter des tâches requises. Ils complètent ou augmentent les capacités personnelles de l'individu en le soulageant des tâches physiquement exigeantes (port de charge par exemple) (Atain-Kouadio & Sghaier, 2017). La présente étude concerne un robot d'assistance physique sans contention manipulé par l'opérateur (RAPsc-M appelé « cobot »). Sa spécificité réside dans le fait que l'outil est fixé à l'extrémité de son bras articulé est fixé l'outil ; l'opérateur ne manipule plus l'outil directement mais le terminal du cobot sur lequel est fixé l'outil, dans notre cas une meuleuse (cf. Figure 4).

Figure 4 : Robot d'assistance physique sans contention manipulé par l'opérateur (RB3D, 2014)

L'opérateur est alors soulagé du poids et des vibrations de l'outil (la meuleuse). De plus, par un dispositif capable de détecter de mouvement de l'opérateur (Atain-Kouadio et al., 2015), le terminal du cobot va amplifier l'effort exercé par l'opérateur ; ce dernier déploie ainsi une force moindre lors de l'usage du cobot.

2. Effets de l'utilisation d'un robot collaboratif sur la sécurité et la santé au travail

Il existe très peu de littérature relative à l'analyse de l'utilisation de ce cobot en situation réelle de travail et son impact sur la survenue de TMS. En étendant les lectures à des recherches en laboratoire sur la robotique collaborative de manière générale, les enjeux avancés par les concepteurs de cobot ont pu être explicités. Ces nouvelles situations associeraient alors « les compétences et l'intelligence de l'humain à la force et la robustesse du robot » (Schaller & Caetano, 2018, p. 95) et permettraient de revaloriser des postes de travail, d'améliorer les conditions de santé et de gagner en productivité (IHEST, 2018). Cette association aurait une influence positive à la fois (Peshkin & Colgate, 1999) :

- du point de vue ergonomique : moins de sollicitations physiques des opérateurs, déplacement des objets lourds et encombrants, prévention des accidents, aide pour l'opérateur sur le positionnement des objets et pour la réalisation de mouvements appropriés tout en préservant ses habilités,
- du point de vue de la productivité : mouvements réalisés plus rapidement, amélioration de la qualité et de la précision.

La principale préoccupation des concepteurs concerne tout d'abord la sécurité du fait de la présence d'Hommes et de cobots dans un même espace de travail (Charpentier & Sghaier, 2013). La norme NF EN ISO 10218-1 exige notamment que la sécurité des systèmes d'assistance physique guidés par l'opérateur soit assurée par un dispositif de validation à commande maintenue et d'un arrêt d'urgence.

Concernant la santé au travail, certains promoteurs axent leur communication sur la réduction des TMS. Cependant, aucune étude, à notre connaissance, ne démontre que ce type de cobot réduit réellement la survenue de TMS (et qu'il ne soit pas source de nouveaux risques professionnels). Une étude biomécanique menée en laboratoire montre que lors de l'utilisation d'un cobot, l'effort estimé par simulation peut être supérieur à celui calculé en l'absence d'assistance (Maurice et al., 2013). Les auteurs rappellent alors la nécessité de s'assurer que l'usage du cobot n'engendre pas d'efforts supplémentaires et ne cause pas de nouvelles situations à risque de développement de TMS (Maurice et al., 2017). De plus, certains retours d'expériences suite à l'usage d'un cobot montrent qu'en dépit d'une diminution du port de du poids de l'outil pour les opérateurs, de nouvelles problématiques apparaissent avec l'usage du cobot comme des risques de choc, de coincement ou encore l'adoption de postures contraignantes par les utilisateurs (Jocelyn et al., 2017).

D'autres éléments émergent également comme l'appréhension que peuvent ressentir les travailleurs par rapport au risque de contact avec le cobot, la crainte de perdre certains repères ou compétences, la peur d'une automatisation etc. ; ces risques psychosociaux questionnent. La charge mentale est également discutée en énonçant qu'une réduction de la charge physique pour l'opérateur ne doit pas engendrer de charge mentale supplémentaire ; par exemple, la nécessité de surveiller ces cobots pourrait accroître la charge mentale (Blaise et al., 2020). De plus, le dossier de l'INRS sur les nouvelles technologies d'assistance physique (INRS, 2015) insiste sur le fait que « la maîtrise du geste de travail » peut être affectée par l'assistance amenée par la technologie où l'opérateur doit modifier ses repères sensoriels pour s'adapter à la démultiplication des efforts par exemple, au risque de perdre une partie de l'expertise et du savoir-faire acquis précédemment. La charge cognitive de l'individu peut alors augmenter temporairement ou durablement pour maintenir son expertise professionnelle. Ainsi, on

comprend que l'introduction de nouvelles technologiques va changer le contenu et les repères du travail.

De plus, des changements organisationnels liés à l'intégration d'un cobot peuvent également entraîner des situations d'isolement si les collègues sont moins nombreux ou plus distants physiquement. L'acceptabilité de ces nouvelles technologies est alors recherchée. Le terme acceptabilité est défini comme « le pronostic d'usage dans lequel l'utilisateur est invité à établir une intention d'usage » (Vallery, Bobillier-Chaumon, Brangier, & Dubois, 2016, p. 17). Temporellement, elle correspond à la phase de conception de la technologie. L'apport est, tout d'abord, de comprendre les attitudes et les intentions lors de la conception pour chercher à « anticiper les facteurs de rejet ou d'adoption d'une technologie » (Vallery et al., 2016, p. 18). Puis, il convient de s'intéresser à l'acceptation située de la technologique au moment de la phase d'utilisation et d'appropriation de l'outil. L'intérêt est alors porté sur « l'expérience réelle, le vécu et les pratiques effectives des individus lors de l'usage en situation réelle » (Vallery et al., 2016, p. 18). Pour cela, les modèles de l'activité se révèlent déterminants afin de comprendre concrètement « les nouvelles pratiques (ou la transformation des anciennes, voire leur empêchement) […] liées ou induites » par l'usage de la technologique. Le regard est porté sur ce que « la technologie « permet/autorise de faire » ou « oblige à faire », mais aussi ce qu'elle « empêche de faire » ou « ne permet plus de faire comme avant » » (Bobillier Chaumon, 2016, p. 6). Bobillier-Chaumont (2013) définit quatre dimensions déterminantes de l'acceptation située des technologies :

- individuelle (ou personnelle) relative aux activités propres du salarié et notamment sur l'effet de la technologie comme facteur d'intensification ou d'efficience dans l'activité (notion de coût cognitif et émotionnel),
- organisationnelle (ou impersonnelle) qui implique le rapport des salariés avec l'organisation du travail, et notamment le contrôle exercé par la technologie sur leurs actions et initiatives,
- relationnelle (interpersonnelle) qui correspond aux activités collectives et collaboratives dans le travail, au fonctionnement quotidien des collectifs de travail et à la manière dont les outils peuvent affecter ces équipes, en les affaiblissant ou en les dégradant,

- professionnelle et identitaire (ou transpersonnelle) qui expriment la capacité des individus à faire reconnaître leurs savoir-faire, à conserver leurs règles de métier, à pouvoir exercer leur activité et leur pouvoir d'agir et/ou à les développer.

Enfin, des études menées en laboratoire mettent en avant que la durée totale de réalisation d'une tâche avec assistance d'un cobot augmenterait par rapport à celle sans assistance. Une étude a par exemple montré que la durée totale de réalisation d'une tâche d'assemblage de billes augmentait de 25% en situation de collaboration (Cherubini, Passama, Crosnier, Lasnier, & Fraisse, 2016). De même, lors d'un transfert de poids par l'usage d'un cobot, la durée de réalisation de la tâche est augmentée de 36% à 63% (Nussbaum, Chaffin, Stump, Baker, & Foulke, 2000). Par ailleurs, lors d'une tâche de vissage en situation d'assistance par un exosquelette robotisé, la durée de réalisation est plus longue de 12% par rapport à la même situation manuelle (Sylla, Bonnet, Colledani, & Fraisse, 2014). Cependant, une autre étude montre le contraire : basée sur une simulation numérique, elle montre que la tâche serait réalisée plus rapidement en tenant compte de mouvements aller-retour d'un point A à un point B (diminution de 10% à 20%) (Maurice et al., 2013).

Synthèse et conclusion du chapitre 1

Le passage du manuel à l'automatisation, marqué par la troisième révolution industrielle, n'a pas été aisé. Une des explications à cela porte sur la difficulté à reproduire la complexité des gestes professionnels nécessaires à ces activités. Face à ces difficultés d'automatisation, une solution alternative à la robotique industrielle concerne l'apport d'une robotique avec laquelle l'opérateur peut interagir sur son poste de travail : "la robotique collaborative". Cette dernière est un des moyens mis en œuvre dans la quatrième révolution industrielle : l'Industrie du futur ou Industrie 4.0. En France, cette révolution vise à replacer l'Homme au cœur de l'Industrie du futur où la technique lui permettra d'être déchargé des tâches pénibles et répétitives. Les robots d'assistance physique sont une des solutions envisagées à cet effet. Ces derniers sont destinés à aider physiquement le travailleur sans modifier son savoir-faire. Or, on pourrait penser que le travail change avec l'introduction d'un cobot.

La présente étude s'intéresse au robot d'assistance physique sans contention manipulé par l'opérateur (RAPsc-M nommé "cobot" dans la suite de cet écrit). Sa spécificité est qu'à l'extrémité de son bras articulé est fixé l'outil ; l'opérateur ne manipule plus l'outil directement mais le terminal du cobot sur lequel est fixé l'outil, dans notre cas une meuleuse. De part ce dispositif, l'opérateur serait soulagé du poids, des vibrations et des efforts de meulage sans rien modifier par ailleurs. Un des objectifs concernant son usage est de réduire la survenue de TMS. Mais l'introduction de cobot engendre une évolution des situations de travail qu'il faut pouvoir décrire et comprendre pour s'assurer de leur contribution en faveur de la santé et la performance des travailleurs.

Chapitre 2 : Étiologie des modèles de survenue des troubles musculo-squelettiques

1. Les TMS, une préoccupation majeure en matière de santé au travail

Les TMS sont des pathologies qui touchent l'appareil locomoteur dans son ensemble et peuvent ainsi concerner les membres supérieurs, les membres inférieurs ou encore le dos (Buckle & Devereux, 2002). Les TMS incluent un certain nombre de maladies telles que, par exemple, le syndrome du canal carpien, la tendinopathie de la coiffe des rotateurs, les épicondylites du coude etc. (Aptel et al., 2011). L'activité professionnelle peut jouer un rôle dans la survenue, le maintien voire l'aggravation de ces troubles (NIOSH, 1997; Roquelaure et al., 2006). Les TMS s'expriment de différentes manières avec des symptômes qui apparaissent souvent de manière progressive, ou parfois brutalement : la personne ressent de l'inconfort, de la raideur mais également de la maladresse ou encore une perte de force. Ces symptômes entraînent des douleurs et une capacité fonctionnelle réduite qui peuvent être accompagnées de situations de stress. Quelle que soit leur localisation, les TMS peuvent devenir irréversibles et entraîner un handicap durable. Afin que ces maladies ne deviennent pas chroniques, elles doivent être diagnostiquées et prises en charge précocement.

En France depuis 1973, certains TMS (par exemple, le syndrome du canal carpien) peuvent faire l'objet d'une reconnaissance en tant que maladies professionnelles. Cela permet d'une part, de faire reconnaître par la sécurité sociale le lien entre le travail et les troubles constatés et d'autre part, d'engager une indemnisation à verser à la victime. Cette reconnaissance se fait sous des conditions détaillées dans des tableaux de reconnaissance de maladie professionnelle (Delépine, Chapouthier-Guillon, Jacquin-Brisbart, Nolland, & Vidal, 2016). Le tableau 57 concerne les affections péri-articulaires provoquées par certains gestes et postures de travail au niveau des membres supérieurs et inférieurs, le 69 et le 79 portent respectivement sur les lésions dûes à des vibrations main-bras et sur les lésions chroniques du ménisque, le 97 et le 98 recensent les affections chroniques du rachis lombaire provoquées

respectivement par des vibrations corps entier et par des manutentions manuelles de charges lourdes.

Depuis plus de 20 ans, les TMS représentent la première maladie professionnelle reconnue en France mais aussi dans d'autres pays européens et concernent tous les secteurs d'activités. En France, les TMS concernent 88% des maladies professionnelles reconnues en 2019 et se localisent le plus fréquemment au niveau des poignets, des épaules et des coudes (*Rapport annuel 2019 de l'Assurance Maladie - Risques professionnels*, 2020). Bien qu'un palier s'est installé en 2016 et 2017, les TMS tendent à augmenter à nouveau depuis 2018 : en 2019, 40380 nouvelles victimes étaient comptabilisées (*Rapport annuel 2019 de l'Assurance Maladie - Risques professionnels*, 2020). Ces chiffres ne représenteraient en outre que la part visible de la problématique ; les TMS seraient fortement sous-déclarés (Rivière, Alvès, Smaili, Roquelaure, & Chatelot, 2021) par crainte de perdre son emploi, par méconnaissance des droits et des procédures ou encore par la complexité de ces dernières pour engager une reconnaissance en tant que maladie professionnelle etc. (Diricq, 2011).

Les conséquences de la survenue de TMS pour les personnes concernées peuvent être dramatiques en termes d'abord de douleurs ressenties mais également par les limitations fonctionnelles inhérentes pouvant se répercuter sur leur vie quotidienne : handicap, perte de l'emploi, problèmes familiaux etc. (Aptel & Aublet-Cuvelier, 2005). Les conséquences économiques sont également importantes. En 2019, les TMS représentaient en France, tous secteurs confondus, 38,1% des montants imputables au titre des principaux tableaux de maladies professionnelles (*Rapport annuel 2019 de l'Assurance Maladie - Risques professionnels*, 2020). La branche Accidents du Travail/Maladie Professionnelles (AT/MP) de la Sécurité sociale estime à près de 2 milliard d'euros de coût direct des TMS reconnus en tant que maladies professionnelles (CNAMTS, 2015). Ce montant se réfère aux prestations directement imputées à l'entreprise versées au titre des AT/MP. Les coûts indirects ne sont pas connus mais s'élèveraient, au minimum, à 2 à 4 fois le coût direct (Aptel et al., 2011). Ils se rapportent aux coûts salariaux, de production, administratifs et/ou de matériels etc.

2. De l'exposition aux facteurs de risque biomécanique à une dynamique multifactorielle d'apparition des TMS

Les TMS ont d'abord été définis comme résultant de l'exposition des salariés à des contraintes biomécaniques soutenues ou répétées sur des périodes plus ou moins longues qui dépassent la capacité du système musculo-squelettique (Silverstein et al., 1986). Ainsi, les TMS résultaient d'un déséquilibre entre, d'une part, les contraintes s'exerçant sur les tissus mous déterminées par une exposition à des efforts excessifs, des postures contraignantes et des mouvements répétés et, d'autre part, les capacités fonctionnelles de l'individu en lien avec ses facteurs personnels tels que le genre, l'âge, les antécédents traumatiques, certaines pathologies etc. La contrainte biomécanique s'explique par la combinaison d'efforts excessifs, de postures articulaires extrêmes, de la répétitivité des mouvements et de l'exposition aux vibrations (NIOSH, 1997). Ainsi, dans un modèle de survenue de TMS basé sur l'exposition aux facteurs de risque biomécanique, plus la contrainte biomécanique est élevée, plus l'articulation est sollicitée et plus le risque d'apparition d'un TMS est élevé.

Des études ont également montré que les TMS ne surviennent pas seulement dans des situations de travail requérant de fortes exigences physiques mais aussi lors d'un travail physique léger, de faible intensité, par exemple dans le secteur tertiaire (Carter & Banister, 1994; Sauter, Chapman, Knutson, & Anderson, 1987; Walsh, Varnes, Osmond, Styles, & Coggon, 1989). L'hypothèse des fibres de Cendrillon émerge et explique notamment la genèse de myalgies du trapèze chez des opérateurs travaillant sur écran (Hägg, 1991). Elle stipule qu'un travail statique de faible intensité s'accompagne d'un recrutement de mêmes fibres musculaires qui restent contractées en permanence créant ainsi des dommages structurels sur ces fibres (« ragged red fibers » ; (Larsson, Björk, Henriksson, Gerdle, & Lindman, 2000)) et entraînant la survenue de TMS.

Des TMS surviennent même lors d'un travail statique de faible intensité (Aptel & Vézina, 2008; Johansson et al., 2003) : par exemple, en manipulant des objets pesant quelques centaines de grammes. Ces études insistent alors sur la nécessité de replacer « le muscle dans

sa situation d'effecteur d'un système complexe et intégré, de nature psycho-cognitivo-sensori-motrice » (Aptel & Vézina, 2008, p. 9).

Les modèles de survenue des TMS évoluent et introduisent les facteurs psychosociaux. Les conséquences biologiques du stress sur la survenue ou l'aggravation des TMS sont explicitées (Aptel & Cnockaert, 2002). Il est alors démontré qu'en situation de stress, le système nerveux libère différentes substances affectant directement le système musculo-squelettique (cf. Figure 5). Le stress met en jeu quatre systèmes : le système nerveux central, le système nerveux végétatif, le système « endocrinien » et le système immunitaire.

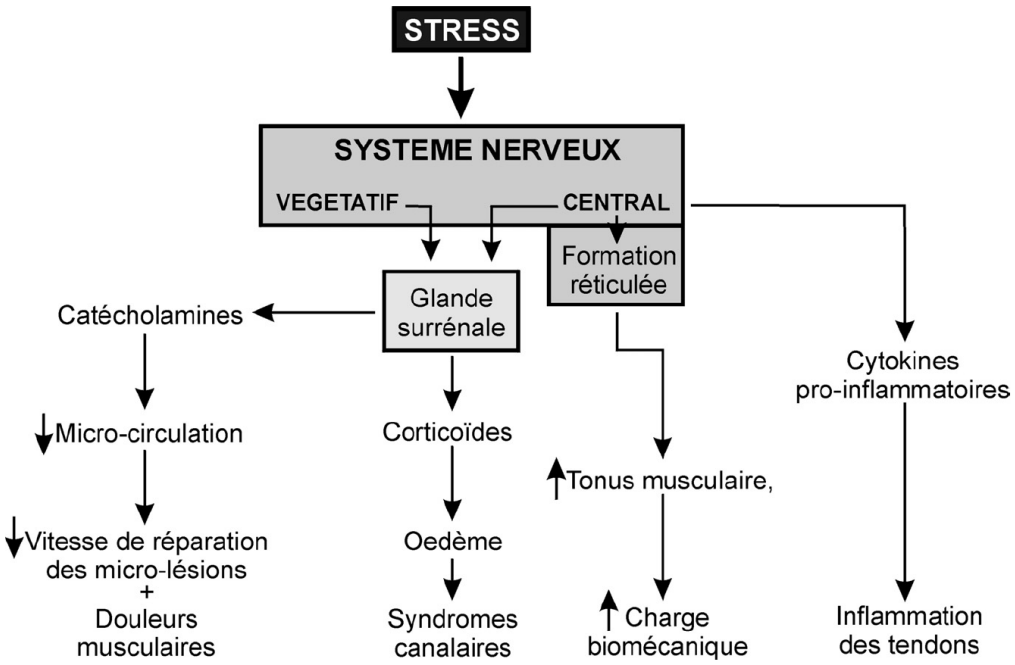


Figure 5 : Conséquences biologiques du stress sur la survenue ou l'aggravation des TMS (Aptel et Cnockaert, 2002)

La réciprocité des relations entre les symptômes de stress et la survenue de TMS est également évoquée (Leino, 1989) : le stress chronique peut être un facteur de risque de TMS et inversement, la survenue de TMS peut également générer ou aggraver un état de stress. Une étude a notamment montré que « l'appréhension de la non-qualité est une source de stress » (Denis, Gonella, & St-Vincent, 2016, p. 10).

Ainsi, la satisfaction au travail, la perception de la charge de travail, le caractère monotone du travail, l'autonomie au travail, les exigences émotionnelles (peur de l'accident par exemple) etc. viennent enrichir le débat sur la survenue des TMS (Aptel & Cnockaert, 2002; Bongers, de Winter, Kompier, & Hildebrandt, 1993; Gollac & Bodier, 2011; Leino, 1989; Roquelaure, 2018). Il est également démontré que le risque de survenue de TMS augmente aussi lorsque les travailleurs manquent de soutien ou de reconnaissance par leur hiérarchie (Dejours, 2003; Roquelaure, 2018). De même, les impacts sur le sens que donnent les individus à leur travail et la possibilité de faire un travail de qualité ont également été analysés ; ainsi si l'individu ne parvient plus à agir pour réaliser un travail bien fait, un travail qui ait du sens pour lui le risque de survenue de TMS augmente (Caroly, Coutarel, Daniellou, Escriva, & Roquelaure, 2008a; Clot, 2004; Gollac & Bodier, 2011; Petit & Dugué, 2013).

De plus, il est également démontré que différentes atteintes localisées aux poignets, aux coudes et aux épaules sont liées à certaines caractéristiques organisationnelles (juste à temps, flux tendu, dépendance organisationnelle…) (ANACT, INSERM, INRS, DARES, & CCMSA, 1996; Mac Donald, Härenstam, Warren, & Punnett, 2008). Ainsi, l'apparition de ces troubles constituerait aussi « le signe qu'un seuil a été franchi dans la sollicitation des individus au service de la production » (Bourgeois et al., 2000, p. 33) où la compréhension de la survenue des TMS se décale alors au niveau organisationnel de la situation de travail où « la méconnaissance de la variabilité gestuelle apparaît entretenir un système de pensée qui fait le lit des TMS » (Brunet & Riff, 2009, p. 17).

La compréhension de la survenue des TMS est donc impossible à évaluer systématiquement à partir de la seule description biomécanique des mouvements. L'étiologie de ces modèles permet de comprendre la multifactorialité des TMS (cf. Figure 6) en élargissant l'étendue de l'évaluation à des facteurs biomécaniques, individuels et psychosociaux et aux déterminants organisationnels et socio-économiques de la situation de travail (Aptel et al., 2011; Roquelaure, 2016; Stock, Nicolakakis, Messing, Turcot, & Raiq, 2013).

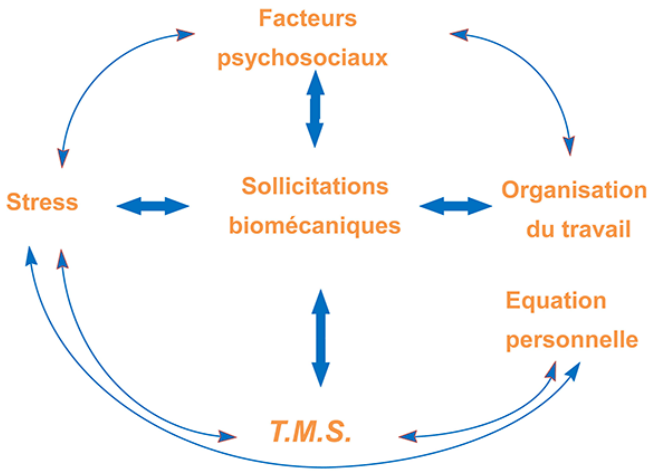


Figure 6 : Dynamique d'apparition des TMS (Aublet-Cuvelier, 1997 ; Aptel et al., 2011)

Le modèle de Stock (2013) montre que ces facteurs de risque ne peuvent être considérés indépendamment et qu'il est nécessaire, pour agir, de ne pas les isoler afin de mettre en évidence les déterminants de ces facteurs (cf. Figure 7).

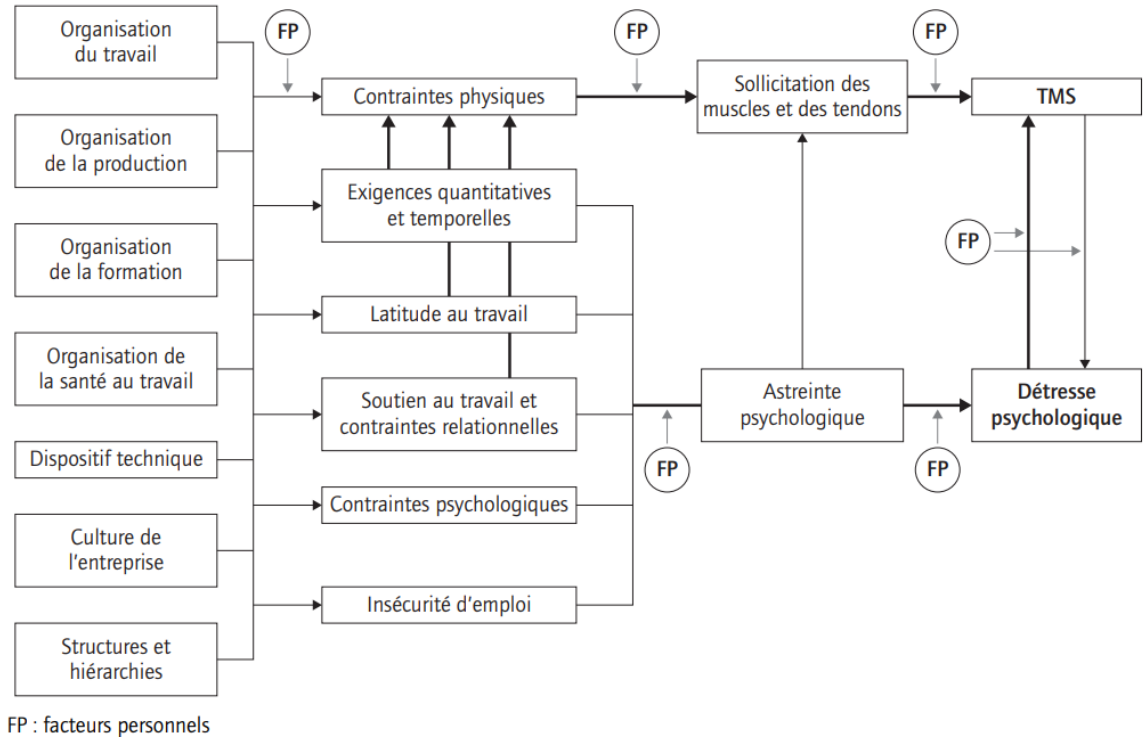


Figure 7 : Modèle de la genèse des TMS liés au travail (Stock et al., 2013)

Tappin nomme « facteurs contextuels » ces déterminants (Tappin, Bentley, & Vitalis, 2008). Ils permettent de caractériser l'exposition aux facteurs de risque biomécaniques et psychosociaux et font ainsi référence aussi bien à la conception du poste de travail et aux exigences du travail qu'aux facteurs économiques, culturels et politiques.

Ainsi, basées sur l'exposition du travailleur à des facteurs de risque, ces approches orientent la prévention des TMS vers la suppression ou la maîtrise de ces facteurs et aident les préventeurs à convaincre de la nécessité d'adopter un point de vue pluridisciplinaire.

3. De l'exposition multifactorielle à l'échec des régulations

Cependant les liens entre les facteurs de risque et la façon dont ils peuvent être régulés par les opérateurs en situation de travail, et leurs vécus, doivent aussi être appréhendés pour comprendre et agir en termes de prévention des TMS. Et ce, grâce à des approches constructives centrées sur la personne en activité de travail (Falzon, 2013; Guérin et al., 2006; St-Vincent et al., 2011; Vézina, 2001) où « les facteurs de risque sont étudiés de façon systématique en interaction avec les situations de travail et les caractéristiques du travailleur ou de la travailleuse » (Caroly, Simonet, & Vézina, 2015, p. 4). L'étude présentée dans cet écrit se situe dans ce courant, du côté de l'activité réelle, de « l'intelligence et du corps sensible » que mobilise le travailleur pour réussir sa tâche prescrite (Caroly et al., 2015, p. 4). Ainsi, tout système est en transformation et l'individu devra, par son activité, s'ajuster continuellement. Ce processus de régulation s'exprime dans l'activité par la mise en œuvre de modes opératoires et de stratégies permettant à l'individu de faire « face à la variabilité des exigences et des conditions du travail et face à sa propre variabilité (changement de son état interne) » (cf. Figure 8) (Vézina, 2001, p. 47).

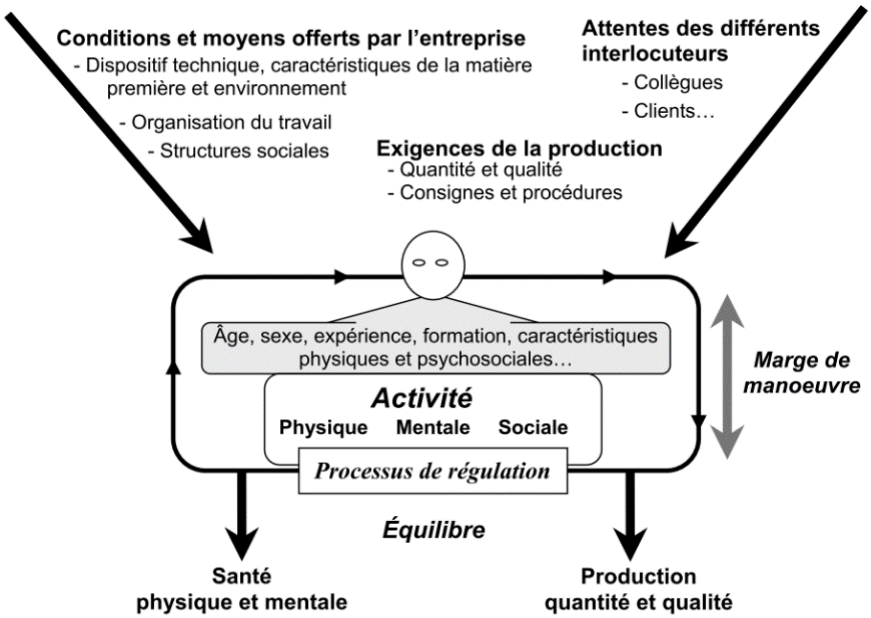


Figure 8 : Modèle de compréhension des situations de travail centrée sur la personne en activité (Vézina, 2001)

L'activité dépend de l'individu (conditions internes) qui la réalise et de la tâche (conditions externe). Leplat explique qu'il faut envisager ces conditions internes et externes de manière conjointe par « les caractéristiques de leur couplage » (1997, p. 5). Les effets de ce processus ou conséquences de l'activité agissent alors de façon rétroactive sur cette dernière en fonction des buts poursuivis d'une part par l'individu et d'autre part par ceux fixés par la tâche. Leplat propose ainsi de considérer deux types de boucles de régulation donnant « un caractère dynamique à toute activité » (Leplat, 1997, p. 5) (cf. Figure 9) : l'une, qualifiée d'externe, est centrée sur la tâche et l'autre, qualifiée d'interne, est centrée sur l'individu.

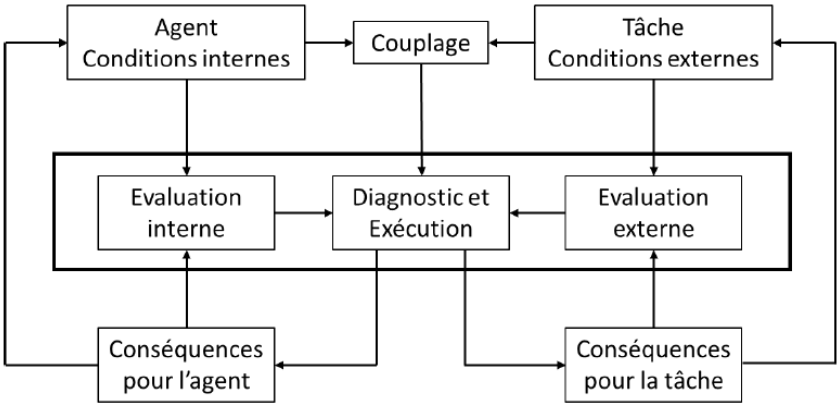


Figure 9 : Cadre général pour l'analyse de l'activité (Leplat, 2006)

S'intéresser au processus de régulation permet de comprendre le processus permanent d'ajustement de l'individu face aux variabilités de son milieu et de sa propre variabilité. Ainsi quand les stratégies développées ne permettent pas de maintenir l'équilibre entre santé et performance, le processus de régulation atteint ses limites et un compromis est fait ; « un compromis est une concession faite à l'équilibre entre le maintien de la santé et l'atteinte des objectifs du travail. Il peut avoir pour conséquence l'apparition d'un risque d'atteinte à la santé et/ou la possibilité de ne pas répondre aux exigences en termes de quantité et/ou de qualité du travail » (St-Vincent et al., 2011, p. 56).

Major (2011) propose de distinguer la « régulation » de la « stratégie » ou des « modalités de régulation » en définissant la notion de stratégie comme « des comportements, des savoir-faire, des attitudes que la personne élabore pour parvenir à maintenir l'équilibre entre ce qu'elle est et son environnement » (p. 50). Ces savoir-faire élaborés par les travailleurs sont définis par Ouellet et Vézina (2008) comme « la capacité d'un individu à mobiliser dans son activité un ensemble de savoirs lui permettant d'atteindre un objectif » se manifestant « dans l'activité à travers les gestes effectués » (Ouellet & Vézina, 2008, p. 5). Ainsi, les gestes professionnels élaborés par les opérateurs sont les meilleurs compromis trouvés par eux, à un moment donné. Si ce compromis est mis en défaut par un déséquilibre entre sa santé et sa production, cela peut conduire à l'apparition de TMS (Vézina, 2001).

St-Vincent (St-Vincent et al., 2011) propose également d'analyser les gestes professionnels des travailleurs pour comprendre les stratégies élaborées et les façons de faire pour réaliser leur activité de travail : « traduits en modes opératoires et en stratégies […] informent sur les régulations et sont en ce sens des révélateurs privilégiés de l'activité de travail » (St-Vincent et al., 2011, p. 253). Ces auteurs rappellent néanmoins que l'observation des gestes en situation de travail doit se coupler de verbalisation pour « en saisir le sens et l'intention » et ainsi montrer « la complexité des gestes nécessaires à la réalisation des tâches [qui est un] aspect souvent sous-estimé » (St-Vincent et al., 2011, p. 252).

Le geste professionnel est donc considéré comme le meilleur compromis trouvé par le travailleur à un moment donné (Bourgeois et al., 2006). Il est multidimensionnel (Bourgeois et al., 2006 ; Bourgeois & Hubault, 2005 ; Brunet, 2011 ; Chassaing, 2006 ; Vézina, 2001) et ne peut donc, tout comme les TMS, se réduire à son seul aspect biomécanique qui, à lui seul, « ne peut en saisir la complexité et les différentes facettes » (Caroly et al., 2008). Le geste professionnel peut ainsi être une ressource pour la prévention des TMS quand les moyens de le construire sont présents (Savescu, Simonet, Gaudez, & Fernandez, 2020; Simonet, 2011). Si ce n'est pas le cas, le geste se trouve alors « empêché » et ce geste, « qui ne se fait pas », devient « délétère » et peut conduire à des maladies professionnelles comme les TMS (Caroly et al., 2008 ; Dejours, 2003 ; Pezé, 1998).

Synthèse et conclusion du chapitre 2

Les TMS regroupent un ensemble de pathologies de l'appareil musculo-squelettique du membre supérieur, inférieur ou du dos. Compte tenu de leur coût humain, social et économique, leur prévention représente un enjeu majeur en santé au travail. Les modèles étiologiques de survenue de TMS ont d'abord mis en avant le rôle des facteurs biomécaniques associés ensuite aux facteurs psychosociaux et organisationnels. Sous l'influence d'approches fondées sur le concept d'activité prenant en compte le rôle actif de l'individu en situation de travail, d'autres approches explicatives de la survenue des TMS ont été proposées. Ces approches soutiennent une vision constructive visant à concilier une logique de réduction de l'exposition aux facteurs de risque avec le développement des régulations des individus en situation de travail. Ce processus de régulation s'exprime dans l'activité par la mise en œuvre de stratégies, de savoir-faire permettant à l'individu de faire « face à la variabilité des exigences et des conditions du travail et face à sa propre variabilité » (Vézina, 2001, p. 47). Les gestes professionnels élaborés par les travailleurs correspondent au meilleur compromis trouvé par eux à un moment donné. Un des enjeux de prévention des TMS réside dans la compréhension de la complexité de ces gestes professionnels et la conception de milieu en faveur de leur développement. Le concept du geste professionnel en ergonomie de l'activité permet de garder articulé l'ensemble de ses dimensions biomécanique, cognitive et psycho-sociale, qu'il faut prendre en compte, dans notre cas, pour agir en matière de prévention des TMS. Dans le chapitre suivant, la littérature sur cette notion de geste sera approfondie pour en faire ressortir certaines définitions et montrer l'apport de différentes disciplines à sa compréhension et son analyse.

Chapitre 3 : Analyse du geste professionnel et prévention des TMS

Comme nous l'avons vu dans le chapitre 1, l'introduction de cobots dans les situations de travail vise notamment à diminuer le risque de TMS principalement sous l'angle biomécanique. Or, les facteurs de risque de TMS, décrits dans le chapitre 2, sont également psychosociaux, organisationnels et individuels. De plus, un des enjeux de la prévention des TMS vise à laisser la possibilité aux individus d'élaborer leurs gestes professionnels dans toutes leurs dimensions pour faire face aux variabilités de la situation de travail et à leurs propres variabilités.

La littérature évoque différentes approches et définitions de la notion de geste. Dans cette partie, nous en avons sélectionné certaines afin de comprendre les apports de différentes disciplines à la notion de mouvement et de geste pour en faire ressortir la définition sur laquelle nous nous appuierons dans cette thèse.

1. Apport de la biomécanique à la compréhension du mouvement

La biomécanique permet de mieux comprendre le fonctionnement de l'appareil locomoteur grâce notamment à des analyses fines de la cinématique et de l'activité musculaire. Elle apporte alors des connaissances sur le mouvement en identifiant par exemple différentes façons de réaliser le même mouvement au travers des variabilités inter et intra-individuelles mesurées (Corbeil, Plamondon, & Denis, 2022).

D'un point de vue biomécanique, la composante fondamentale du geste est le mouvement, plus précisément le mouvement volontaire (Gaudez & Aptel, 2008). Ce dernier génère des forces internes qui se propagent le long de la chaîne corporelle jusqu'aux surfaces d'appui. Il est la résultante de la coordination de l'ensemble des segments corporels. Gaudez et Aptel (2008) réunissent les dimensions biomécanique et cognitive du geste sous l'entité du mouvement volontaire. La production du mouvement résulte de plus de facteurs intrinsèques, propres à l'individu, de nature anthropométrique, de facteurs éducatifs, culturels et sociaux et, de facteurs extrinsèques, pour la composante professionnelle, liés par exemple aux conditions d'apprentissage de la tâche, à la situation de travail mais aussi à ses déterminants

organisationnels (Gaudez & Aptel, 2008). Les variations de la production du mouvement, la variabilité motrice, peut en partie s'expliquer par le couplage de ces facteurs.

Les études en biomécanique permettent également d'illustrer la façon dont les professionnels utilisent les outils mis à leur disposition (par exemple les travaux de Roquelaure (1999) sur les sécateurs ou de Claudon et Guiguet (2003) sur les couteaux). La position des mains sur l'outil, l'orientation de l'outil, le nombre de coups portés, leur direction etc. sont décrits avec précision. Ces études permettent entre autres de donner « à des personnes non initiées, une visibilité sur la gestuelle [le mouvement] des opérateurs » (Brunet, 2011, p. 29). De même, une méthode d'évaluation et de quantification de l'activité gestuelle, basée sur une description des mouvements réalisés, a permis de mettre en évidence différentes stratégies de réalisation de la tâche (Malchaire et al., 2000; Roquelaure et al., 2001). Cependant, ces auteurs n'ont pu en rendre compte dans leurs grilles d'observations et aucune relation significative de type plainte de TMS n'a été révélée. Néanmoins, ils ne concluent pas à l'absence de lien mais soulèvent l'incapacité de la méthode à révéler ce type de relation : « aucune relation statistiquement significative n'a pu être mise en évidence entre les stratégies gestuelles et posturales et l'existence de plaintes musculo-squelettiques. À tout le moins, la typologie mise au point pour caractériser la technique de travail ne permet pas de mettre en évidence de stratégies posturales et gestuelles à risque accru de plaintes musculo-squelettiques. […] la typologie adoptée est sans doute trop générale pour mettre en évidence les stratégies et les compromis opératoires des opératrices. » (Malchaire et al., 2000, p. 28). Ces auteurs ont privilégié un recueil de données basées sur les paramètres observables de l'activité perceptivo-motrice mais suggèrent de les coupler à des entretiens avec les opérateurs afin d'obtenir davantage de renseignements sur leurs stratégies gestuelles [au sens de mouvement].

2. Apport de la clinique de l'activité à la compréhension du geste

La clinique de l'activité fait la distinction entre geste, mouvement et automatisme (Clot et al., 2007) : « entre le geste et le mouvement d'une part, et le geste et les automatismes d'autre part, il existe la même classe de rapports qu'entre l'action et respectivement l'activité et les opérations dans la théorie de l'activité de Léontiev (1984) » (Simonet, 2011, p. 47). Le

geste est alors appréhendé comme « une entité qui est indissolublement et simultanément un événement psychologique, physiologique et social » (Simonet, 2011, p. 47). Quant au mouvement il serait « la synthèse d'un geste et des régulations posturales nécessaires à porter ce geste » (Clot & Fernandez, 2005, p. 71). Les automatismes réalisent alors « la motricité opérationnelle du geste car celui-ci, conscient et dirigé vers son objet n'est possible qu'en mobilisant une gamme plus ou moins variées d'automatismes infra-conscients (Fernandez cité par Simonet, 2011, p.47). L'« analyse psychologique du mouvement » permet d'appréhender les TMS « du côté de l'hypo-sollicitation de l'activité du sujet » (Simonet, 2011, p.48).

La clinique de l'activité énonce que la dynamique entre ces trois niveaux peut conduire au développement du geste mais aussi à son sous-développement. C'est ce que montrent les travaux de Bernstein (cité par Simonet, 2011) sur la « répétition sans répétition » qui est un cercle vertueux en opposition au cercle vicieux de la « répétition à l'identique » qui, elle, entraîne « le sous-développement du geste par hypo-sollicitation du mouvement personnel et collectif » (p.48). C'est ainsi que Clot élargit la notion de geste à ce qui n'est pas réalisé : il parle alors de geste empêché. Ce dernier émerge quand l'opérateur, dans sa situation de travail, ne parvient plus à réaliser le geste qu'il souhaiterait (Clot, 2006). Le geste se retrouve alors enfermé. Ainsi, quand l'organisation ne laisse pas suffisamment de possibilités aux travailleurs de développer leur geste, le système devient contraint et l'opérateur répétera à l'identique un geste avec une hyper-sollicitation physique et une hypo-sollicitation de l'appropriation de son geste (Clot & Fernandez, 2005; Simonet, 2009). Le geste protecteur est alors celui issu de la confrontation à d'autres gestes possibles pour que l'opérateur dispose d'une sorte de gamme de gestes qu'il peut réaliser (Clot & Fernandez, 2005). Néanmoins, ces gestes « vidés de sens », « empêchés » (Clot & Fernandez, 2005) peuvent aussi être appréhendés comme des « zones de développement potentiel » (Clot, 2008, p. 54). La santé au travail est également considérée comme la possibilité pour l'individu d'« échafauder des possibilités inexplorées » (Clot, 2008, p. 54) pouvant être envisagée comme une voie de dépassement des TMS. « Il faudrait donc, pour prévenir les TMS, s'appuyer sur l'histoire des répétitions en multipliant les expériences gestuelles et les confrontations aux autres gestes possibles » (Clot & Fernandez, 2005, p. 75).

La dimension collective est aussi intégrée au geste dans la mesure où le geste ne vise pas seulement à être performant ou à limiter l'exposition à des contraintes ; il participe également à l'appartenance à un groupe, à un métier (Clot, 2006; Clot, Fernandez, & Scheller, 2007). On parle alors de gestes de métier comme une façon de tenir le genre professionnel. Ce dernier est défini comme une tradition et un savoir-faire partagé et reconnu par une profession où les gestes sont inscrits dans ce qui règle de façon tacite l'activité : « le genre professionnel, c'est-à-dire les "obligations" auxquelles parviennent, sans chercher à le faire mais sans pourtant pouvoir éviter de le faire, ceux qui travaillent pour arriver à travailler, souvent malgré tout, parfois malgré l'organisation prescrite du travail. C'est une sorte d'intercalaire social, un corps d'évaluations partagées qui règlent l'activité personnelle de façon tacite […] une sorte de mémoire mobilisée par l'action. Mémoire impersonnelle et collective qui donne sa contenance à l'activité en situation : manières de se tenir, manières de s'adresser, manières de commencer une activité et de la finir, manières de la conduire efficacement à son objet [ses manières] forment un répertoire d'actes convenus ou déplacés que l'histoire de ce milieu a retenus. » (Clot, Faïta, Fernandez, & Scheller, 2000, p. 2). Le style professionnel quant à lui affranchit l'individu du genre en le remaniant et correspond aux « retouches », aux « stylisations » du genre (Clot & Faïta, 2000).

Ainsi, une activité, même solitaire, est toujours adressée et cela contribue à la recherche du sens pouvant même aller jusqu'au « sacrifice du confort » ; c'est ce que Clot (2004) discute en prenant un exemple de De Keyser (1983) à propos de certains travailleurs souhaitant préserver leurs traditions collectives face à l'automatisation de leur poste : « La logique de leur comportement, dès qu'ils poursuivent cet objet, n'est plus une logique de l'épargne, comme le voudrait le schéma de régulation de la charge mentale, mais très souvent une logique de l'excès : les travailleurs en font plus qu'il ne faut, raffinent, rusent ou défient, dans le but semble-t-il d'affirmer une identité que la technologie ou la situation menace » (De Keyser, 1983, p.245 cité par Clot, 2004, p.324-325). Cette « disponibilité psychologique du collectif » (Clot, 2004, p.329) est désignée par la clinique de l'activité par le concept de « genre professionnel ». En mettant ainsi en dialogue (en « mouvement ») le geste réalisé entre les travailleurs, cela permet à chacun de le vivre « « une tête au-dessus » des manières personnelles de l'exécuter » (Simonet, 2009, p. 10). Ainsi, dans cette « turbine dialogique » au

sein du métier, la « fonction psychologique du collectif de travail » peut agir en faveur d'une prévention durable des TMS grâce au développement des « potentialités » des gestes réalisés (Simonet, 2009, p. 10).

3. Apport de la psychodynamique à la compréhension du geste

La psychodynamique du travail considère l'Homme comme acteur « d'une histoire qui a contribué à structurer sa personnalité ». Le geste peut alors rendre compte de la construction de l'identité de l'individu. Cette discipline a apporté des éléments importants pour comprendre le concept de geste professionnel. Pour Pezé (1998), les gestes réalisés durant le travail ne sont pas seulement des enchaînements musculaires. Ils sont aussi des actes d'expression de la posture psychique et sociale. En faisant le lien avec la survenue des TMS, Pezé explique que si un individu fait face à des conflits « sans issues » alors un processus de somatisation s'enclenche provoquant des désordres endocrino-métaboliques. Le maintien de l'équilibre somatique et psychologique dépend de deux voies : celle de l'activité mentale (mettre en image nos idées, nos sentiments, nos émotions…) et celle de l'activité sensori-motrice (autre voie de décharge de l'excitation comme par exemple griffonner pour réfléchir à un problème). Si ces deux voies sont mises hors d'état alors la voie de la somatisation sera empruntée. La somatisation est définie comme le processus par lequel un conflit, qui ne peut trouver d'issue mentale, déclenche dans le corps des désordres endocrino-métaboliques pouvant être le point de départ d'une pathologie de type TMS par exemple. Ainsi lorsque l'organisation du travail empêche l'utilisation des aptitudes psychiques ou motrices dans l'accomplissement des gestes au travail cela peut provoquer, à terme, l'apparition de TMS.

De même, Dejours (2003) évoque aussi le geste en lien avec la survenue des TMS et l'organisation du travail en distinguant la reconnaissance du geste réalisé en deux types : le jugement d'utilité formulé par l'extérieur via la hiérarchie, le client etc. et le jugement de beauté formulé par les pairs. L'individu a besoin de voir son travail, ses gestes professionnels, reconnus comme performants, utiles, singuliers, esthétiques par ses pairs (Pezé, 2002). Une des conditions d'appartenance à un collectif repose sur les « savoir-faire de prudence » (Dejours & Cru, 1983) en montrant l'importance de certaines tâches parfois considérées de

l'extérieur comme non productives, mais qui permettent de prévenir des blessures et des accidents, de réduire la fatigue en procurant un temps de récupération, d'assurer une qualité et une rapidité du travail.

Le geste est donc aussi porté par le sens et le jugement de valeur qui lui sont associés, la préservation ou la remise en cause des habiletés gestuelles, la (non) reconnaissance de l'utilité des salariés etc. Ainsi si l'organisation du travail prescrit des gestes répétitifs et monotones, cela appauvrit le sens du geste, altère l'image de soi, et à terme un processus de somatisation s'installe et peut provoquer notamment des TMS (Pezé, 1998). Passés sous silence d'une analyse, ces éléments peuvent rapidement être attribués à la « résistance au changement » alors qu'en « prônant un changement de gestes dans le travail, on bouleverse une modalité d'inscription du sujet dans la société, et au-delà on atteint jusqu'à la personne et son identité [puisque] l'on touche alors au noyau central de ce qui fait que chacun de nous se reconnait et est reconnu par les autres comme membre d'une communauté d'appartenance culturelle, sociale ou professionnelle. Voilà l'une des raisons principales pour lesquelles il est si difficile de modifier les gestes utilisés traditionnellement. » (Dejours et al., 1994, p. 2).

4. Apport de l'ergonomie de l'activité à la compréhension du geste

L'ergonomie de l'activité distingue mouvement et geste afin de souligner la place de la subjectivité dans la mobilisation du corps au travail (Bourgeois & Hubault, 2005). Cette discipline part du postulat que lorsque nous observons quelqu'un travailler, nous ne voyons que ce qui est visible alors qu'en réalité d'autres choses complexes se jouent. L'ergonomie de l'activité insiste sur le fait qu'il est utile d'accompagner l'analyse des mouvements au travail par l'analyse des gestes professionnels ; car ces derniers couvrent l'ensemble des dimensions de l'Homme au travail (Bourgeois & Hubault, 2005; Bourgeois et al., 2006; Vézina, 2001). Ainsi, selon Bourgeois et al. (2006), la distinction entre mouvement et geste renvoie à la conception que l'on se fait des activités humaines en situation de travail : « le mouvement fait partie du geste dans la mesure où il est sa partie visible. Il représente un élément de description mais lorsqu'il est coupé du geste, il n'a que peu de valeur interprétative » (p.153).

Leplat propose également de définir le geste comme étant « un mouvement humain auquel est attribuée une signification » (Leplat, 2013, p. 3). Ainsi « le mouvement d'un sujet prend le statut de geste quand il lui est attribué une signification [...] si l'on peut parler de mouvement d'un objet, on ne parlera jamais de geste d'un objet » (Leplat, 2013, p. 3). Le geste n'est pas observable ; ce qui l'est, c'est le mouvement auquel est attribuée la signification. C'est l'action dans laquelle il s'insère qui donne (ou non) au mouvement la qualité de geste. Coutarel (2015) discute la notion de geste répétitif qui lui apparaît « paradoxale : d'un côté, le qualificatif « répétitif » tend à réduire l'approche à une question de fréquence de mouvement ; de l'autre côté, les « gestes » révèlent à l'analyste du travail l'épaisseur de la mobilisation corporelle en situation de travail. » (p.209). Il décrit alors l'intérêt de comprendre les gestes répétitifs au travail pour « restituer au milieu professionnel des connaissances sur le travail réel, ses compromis, ses coûts, ses savoir-faire, ses ajustements, pour des situations de travail que l'on regarde bien souvent de haut parce que vues exclusivement comme sollicitantes et monotones […] les examiner sérieusement conduit aussi bien souvent à montrer des formes sous-estimées d'expertise qui permettent […] d'identifier des leviers complémentaires de prévention. » (Coutarel, 2015, pp. 209-210).

Par ailleurs, Chassaing différencie le geste, la gestuelle et le mouvement : « Le geste est situé « ici et maintenant » dans le contexte précis d'une action donnée, alors que les gestuelles s'analysent à un niveau de généralité et de structuration supérieure. Le geste peut ainsi être considéré comme la manifestation située de la gestuelle. Quant au mouvement, il représente la partie visible du geste puisqu'il prend principalement la forme de déplacements des segments corporels. » (Chassaing, 2010, p. 166). Cette notion de gestuelle a également été discutée par d'autres auteurs avec une conception davantage basée sur la notion de mouvement (Brunet & Riff, 2009) en énonçant que « puisque le geste se singularise par sa trace corporelle dans l'espace-temps, la variabilité gestuelle est entendue comme la « variabilité des formes des gestes » ayant permis d'exécuter une opération. » (p. 7). De plus, Chassaing montre que lorsque la cadence est accélérée par exemple, l'opérateur doit accentuer son rythme de travail ce qui génère d'une part « des douleurs et des fatigues musculaires et d'autre part, de l'énervement de la démotivation parce qu'il a conscience de se faire mal et qu'il n'a pas d'emprise sur sa façon de faire », sur ce « geste empêché » (Chassaing, 2010, p. 180). Elle met

aussi en évidence que dans ce genre de situation, il arrive que les opérateurs développent des « principes de bases en lien avec l'anticipation et/ou l'atténuation de la fatigue musculaire » où « les « empêchements » de gestes, en raison des contraintes de la situation, sont nocifs pour la santé des opérateurs, alors que les « évitements » leur confèrent davantage d'efficacité et d'efficience, et peuvent, eux, procurer du plaisir. » (Chassaing, 2006, p. 261). La construction de ces « principes de base » sont relatifs à une technique donnée et collectivement élaborée où les gestuelles sont liées à l'individu, à sa morphologie, à son âge et à son expérience.

Dans une visée de prévention des TMS, Vézina (2001) intègre le geste au sein de l'activité (cf. Figure 10). Dans sa proposition, l'aspect physique comprenant la dépense énergétique associée et l'hypersollicitation biomécanique (postures, composante statique et dynamique, composante temporelle, intensité…) est associé à l'aspect mental avec, entre autres, le recueil et le traitement d'information, la planification et la gestion et à l'aspect social avec des notions de communication et d'entraide… Cette approche soutient un mécanisme de promotion de la santé qui vise à concilier une logique de réduction des expositions aux facteurs de risque de TMS avec le développement de possibilités d'influence de l'opérateur sur sa situation de travail – au travers du geste qu'il a élaboré.

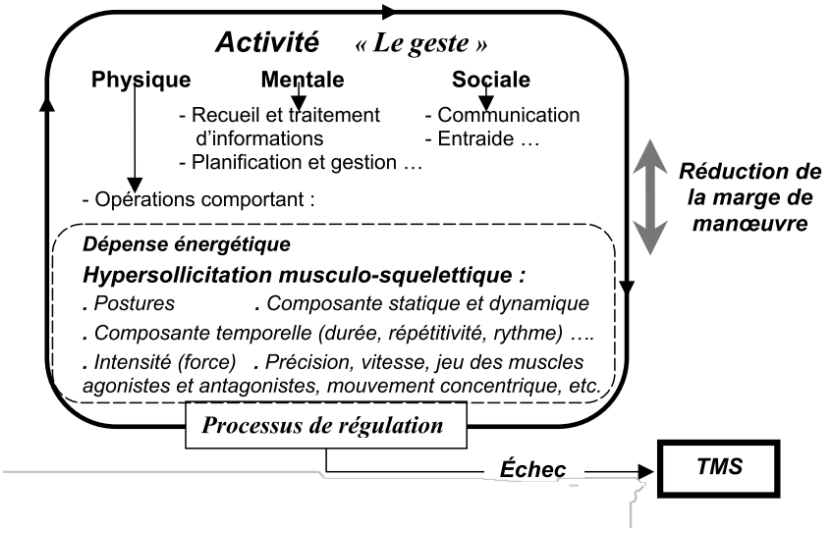


Figure 10 : Détail de la partie "activité" en lien avec les TMS (Vézina, 2001)

Le geste est également composé de plusieurs dimensions (Bourgeois & Hubault, 2005) : la dimension biomécanique, la dimension cognitive pour comprendre les intentions et les

motifs à l'origine du geste en incluant les sens (vision, audition, toucher, odorat, goût), la dimension psychologique avec la notion de ressources de l'opérateur (ingéniosité, créativité…) et de geste empêché, la dimension organisationnelle et celle économique. Bourgeois et Hubault (2005) définissent la dimension organisationnelle en faisant référence à la dépendance organisationnelle et aux exigences du marché comme pouvant impacter l'élaboration du geste. Ils abordent la dimension économique avec des notions de productivité en faisant référence au modèle de productivité taylorienne embrassant la performance des gestes uniquement en termes énergétiques ainsi que les modèles de valorisation économique du travail « qui réduisent le geste à un mouvement élémentaire réalisant une opération élémentaire » (Bourgeois & Hubault, 2005, p. 26). Chassaing (2006) reprend dans sa thèse les dimensions proposées par Bourgeois et Hubault (2005), en suppléant le terme psychologique par psychique et y rajoute les notions d'« empêchement » et d'« évitement » (Chassaing, 2006, p. 261). Le geste a aussi été analysé comme couvrant trois composantes (Bourgeois et al., 2006) : « biomécanique, cognitive et psychique qui permet d'élargir la problématique sur la singularité (un geste bien à soi…), la subjectivité (un geste étonnant ou incohérent, un beau geste…), la création et la réalisation (un geste d'acteur…). Il ouvre aussi sur autrui (un geste de compréhension…) et, permet d'être plus proche de la réalité du travail. » (Bourgeois et al., 2006, p. 153). Ainsi le mouvement est considéré comme faisant partie du geste : « Dans le geste, on retrouve non seulement les caractéristiques du mouvement avec l'amplitude, la force, la vitesse ou encore, l'accélération mais aussi les caractéristiques psychologiques avec la volonté, l'intention, l'émotion et les caractéristiques sociales » (Bourgeois et al., 2006, p.163).

Ainsi, s'il n'y a pas de consensus sur la définition du geste, ces auteurs s'accordent sur le fait que derrière cette notion se cache une grande complexité qui ne peut être réduite, tout comme les TMS, au seul aspect biomécanique qui, à lui seul, « ne peut en saisir la complexité et les différentes facettes » (Caroly et al., 2008, p. 103). De plus, des études pluridisciplinaires, notamment entre la biomécanique et la clinique d'activité se sont révélées utiles pour l'analyse des gestes des professionnels (Savescu & Simonet, 2020; Savescu et al., 2020). En effet, habituellement la variabilité des mouvements et postures des opérateurs s'envisage du point de vue des risques à maîtriser ; dans cette perspective pluridisciplinaire entre la biomécanique

et la clinique de l'activité, les données biomécaniques deviennent objets de discussion entre les professionnels avec l'objectif de leur faire « voir » autrement leur geste et ainsi le développer. Cette perspective permet de dépasser « le discours de fatalisme » face à la diversité des façons de faire se heurtant régulièrement à des discours du type « Chacun fait à sa manière et toutes les manières se valent, il est donc inutile d'en parler », « On fait la même chose » (Savescu et al., 2020, p. 22). Ces auteurs font référence à cette expression de « Tout le monde travaille pareil » déjà évoquée dans la littérature par Brunet et Riff (2009) comme étant un élément cristallisant le sentiment de fatalisme face aux TMS. Ainsi « en devenant objet de recherche, le geste canalise les apports des différentes disciplines scientifiques et […] évite l'écueil d'un découpage disciplinaire de l'activité. Le geste devient une « unité de base » dont les composantes ne peuvent être dissociées » (Brunet, 2011, p. 78).

Synthèse du chapitre 3 et définition retenue du geste professionnel dans cette thèse

Cette thèse s'intéresse à la prévention des TMS en passant par l'analyse du geste professionnel avec une vision qui combine les apports de diverses disciplines. Ainsi, dans notre recherche, le geste professionnel est considéré en suivant les travaux de Vézina (2001). Le geste se réalise dans l'activité où l'individu développe des régulations afin de maintenir un équilibre entre sa santé et sa performance. La définition du geste professionnel proposée emprunte également les travaux de Bourgeois et al. (2006) : le geste professionnel élaboré par le travailleur correspond au meilleur compromis trouvé par lui à un moment donné en lien avec les caractéristiques de la situation de travail et ses caractéristiques propres. Ainsi, nous considérons que le mouvement est une partie du geste dont les caractéristiques sont utiles pour juger de sa dangerosité mais que, couper du geste, il n'a que peu de valeur interprétative comme le montre le cadre théorique précédent : le geste est bien plus qu'une série de mouvements. Le geste professionnel se compose dans l'articulation de ses dimensions biomécanique, cognitive et psycho-sociale. Nous considérons que la survenue de TMS peut être dûe à l'impossibilité pour les individus d'ajuster leurs gestes professionnels aux caractéristiques de la situation de travail et aux caractéristiques propres de l'individu qui les réalise en maintenant un équilibre santé/performance. Ainsi, si l'individu ne parvient plus à élaborer le geste qu'il souhaite, ce dernier peut être atteint dans chacune ou toutes ses dimensions (biomécanique, cognitive et psycho-sociale) avec des conséquences néfastes sur la survenue des TMS. Il peut alors en résulter une hyper-sollicitation physique, une hyper-sollicitation sous l'effet de désordres endocrino-métaboliques (Pezé, 1998), une hypo-sollicitation du geste avec un geste atrophié du pouvoir d'agir sur la situation, empêché selon la définition de Clot (1999) pouvant conduire à l'apparition de TMS.

Chapitre 4 : Activité d'ébarbage et TMS

1. Secteur de la fonderie

En 2019, le secteur de la fonderie comprenait 451 établissements de production accueillant 36 886 salariés qui produisaient environ 2,2 millions de tonnes de produits avec un chiffre d'affaires de 6,7 milliards d'euros (Fédération-Forge-Fonderie, 2019). Les pièces produites peuvent peser de quelques grammes à quelques tonnes et sont destinées à des secteurs d'activité variés : automobile, travaux publics, machines agricoles…

Une fonderie se compose de différents ateliers caractérisant les différentes étapes du processus de fabrication d'une pièce : le modelage, le moulage, la fusion, le parachèvement et l'usinage (cf. Figure 11). Ainsi, des modèles en bois ou en polystyrène sont créés et acheminés à l'atelier de moulage où sont fabriqués, à partir de ces modèles, des moules en sable, en fosse ou en châssis. L'atelier de fusion crée ensuite la nuance de métal voulue qui est ensuite coulée dans le moule pour former la pièce. Des phases de refroidissement sont ensuite nécessaires (de quelques jours à plusieurs semaines) puis des phases de décochages pour démouler la pièce. L'atelier de parachèvement récupère ensuite la pièce et la traite par différentes activités. La logistique interne s'occupe ensuite du transport interne de la pièce soit pour l'expédier directement au client (souhaitant une pièce non usinée) soit pour l'accueillir dans l'atelier d'usinage pour des travaux de finition (fraisage, tournage, perçage...). Des services annexes : de maintenance, administratifs, de communication, de qualité hygiène sécurité et environnement de l'entreprise (QHSEE), de santé au travail, bureaux d'études et méthodes sont en support à ce processus de fabrication.

Figure 11 : Différents ateliers d'une fonderie illustrant le processus de fabrication d'une pièce

2. Activité d'ébarbage et survenue de TMS

Cette thèse concerne l'activité d'ébarbage réalisée au sein de l'atelier de parachèvement. Cet atelier a une place pivot dans le processus de fabrication des pièces. Il récupère les pièces sortant du four pour les parachever et les expédier à l'atelier d'usinage pour les derniers travaux de finition ou directement au client. Le parachèvement concerne différentes activités et notamment l'ébarbage. Celle-ci consiste à enlever le surplus de matière d'une pièce à travers différentes opérations : meulage, tronçonnage et polissage. Les ébarbeurs utilisent des machines portatives : ce sont des machines tenues à la main par l'utilisateur comprenant des pièces mécaniques en mouvement. Les meuleuses en font partie et entraînent en rotation un bloc cylindrique abrasif appelé meule. Elles pèsent en moyenne 5kg. Catégorisées parmi les machines les plus nuisantes et dangereuses (poids, bruit, effort…), Vasselin et Wioland (2007) montrent que les ébarbeurs utilisent ces outils plus de 50% de leur temps de travail.

Un inventaire « santé » (Atain Kouadio et al., 2004) met en lumière la problématique importante de survenue TMS au sein de cette activité. En effet, auprès des ébarbeurs de 25 fonderies de Haute-Marne, de Meuse et des Ardennes, cette étude constate que, sur les 391 personnes interrogées, 213 ont eu une incapacité temporaire de travail durant les douze derniers mois et 365 sur les sept derniers jours précédents l'interview. Ces incapacités sont directement liées à des TMS des membres supérieurs, inférieurs et du dos. Une problématique d'inaptitude au sein des fonderies est alors révélée. Ces fonderies connaissent également des difficultés à recruter de nouveaux ébarbeurs, faute de volontaires et même, dans certains cas, de personnels temporaires disposant des compétences fortes requises pour exercer ce métier.

De plus, l'ébarbage compte parmi les activités les plus éprouvantes physiquement et mentalement dans le secteur de la fonderie (Vasselin & Wioland, 2007). Les opérateurs émettent des plaintes de type TMS localisées principalement au niveau des épaules, des poignets et du dos et car leur travail demande une précision importante (Odum et al., 2014; Ramachandran et al., 1994; Vasselin & Wioland, 2007) . Ils connaissent différentes contraintes (Vasselin & Wioland, 2007) : liées à leur outil de travail du fait de son poids et des vibrations inhérentes, liées à l'environnement de travail (hauteur du plan de travail non réglable, état de

vétusté du sol, incompatibilité entre les dimensions des pièces travaillées et celles du plan de travail) qui engendre l'adoption de postures contraignantes. L'ambiance physique peut parfois avoir un niveau de luminosité insuffisant et un niveau sonore élevé (entre 85 et 95 db(A) jusqu'à 100 à 110 db(A)) ainsi que des températures extrêmes en été et en hiver. À cela s'ajoute l'influence du contexte économique ; pour survivre à la mondialisation des échanges commerciaux, la production se tourne vers des pièces de plus en plus complexes nécessitant des techniques de noyautage pouvant provoquer l'apparition de bavures plus nombreuses. Ces dernières doivent être éliminées accroissant alors la pénibilité du travail des ébarbeurs. Face à ces éléments, les ébarbeurs mettent en place différentes stratégies pour maintenir la charge de travail à un niveau acceptable sans dégradation de la performance, pour gagner du temps, pour faire face aux aléas, se créer des espaces de « temps » pour le collectif, ou encore s'économiser physiquement en travaillant en binôme afin d'équilibrer le travail (Vasselin & Wioland, 2007).

Synthèse de conclusion chapitre 4

L'atelier de parachèvement a une place centrale dans le processus de fabrication d'une pièce en fonderie : une fois parachevée, la pièce sera soit expédiée directement au client soit acheminée à l'atelier suivant : l'atelier d'usinage. L'activité d'ébarbage est réalisée au sein de l'atelier parachèvement. Les ébarbeurs récupèrent les pièces sortant de l'atelier de fusion et vont les traiter afin d'enlever les aspérités, les défauts présents sur les pièces. La difficulté actuelle des fonderies est de recruter des ébarbeurs disposant des compétences fortes requises ; l'ébarbage nécessite un savoir-faire important pour manier la meuleuse. Cette activité est l'une des plus éprouvantes physiquement et mentalement du secteur de la fonderie. Les ébarbeurs connaissent des TMS localisés principalement au niveau des poignets, des épaules et du dos. De plus, cette activité est concernée par différentes contraintes liées au poids et aux vibrations inhérentes aux meuleuses, l'adoption de postures contraignantes, une ambiance physique avec parfois un manque de luminosité, un niveau sonore élevé et des températures extrêmes en hiver comme en été. Les ébarbeurs ne restent pas passifs face à cette situation à risque mais cherchent au contraire à mettre en place des stratégies afin de se maintenir en santé tout en étant performants.

Partie 2 : Contexte de l'étude, problématique et méthodologie

Le cadre théorique a présenté les enjeux de la prévention des TMS au regard du geste professionnel et du secteur de la fonderie et de l'activité d'ébarbage. Cette seconde partie décrite ci-après vise tout d'abord à présenter le contexte de l'étude à travers la présentation de l'entreprise, l'organisation de l'ébarbage et l'historique du développement et de l'introduction du cobot pour réduire les TMS. Nous comprendrons que les difficultés d'utilisation du cobot peuvent notamment s'expliquer par une vision essentiellement biomécanique des TMS à l'origine du projet d'introduction du cobot. Le contexte de l'étude nous amène ensuite, à partir de la revue de littérature, à problématiser notre recherche sur les besoins de comprendre l'évolution du geste professionnel dans chacune de ses dimensions et les articulations entre celles-ci avec l'usage du cobot par rapport au meulage traditionnellement manuel. Des hypothèses de recherche sont ensuite formulées.

Chapitre 5 : Contexte de l'étude

1. Présentation de l'entreprise et de l'atelier parachèvement

La fonderie dans laquelle cette étude se réalise a été fondée en 1831 et est spécialisée dans la conception et la fabrication de pièces métalliques sur mesure de grande dimension pour des marchés divers. Sa spécificité réside dans la fabrication de pièces de très petites séries voire unitaires.

L'atelier de parachèvement a une place centrale dans le processus de fabrication des pièces. Les pièces sont acheminées en sortant de l'atelier de fusion pour y être traitées par différentes activités notamment celle d'ébarbage (cf. Figure 12).

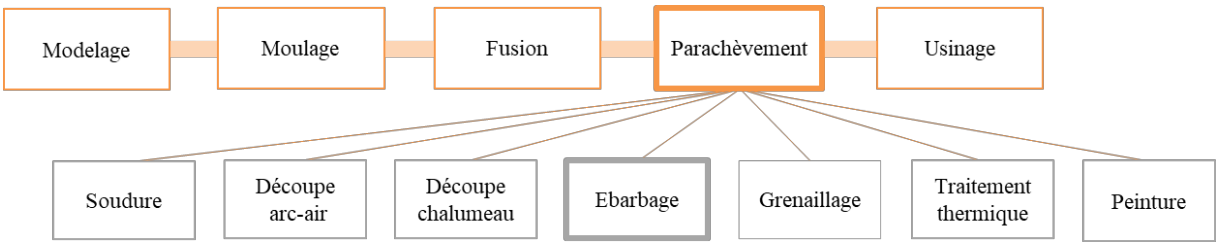


Figure 12 : Processus de fabrication d'une pièce (partie haute de gauche à droite) avec les différentes activités du parachèvement (partie basse)

Une fois parachevée, la pièce est acheminée à l'atelier d'usinage pour des derniers travaux de finition (perçage, fraisage…) ou elle est directement expédiée au client si ce dernier la souhaite « non-usinée ». L'activité d'ébarbage permet d'enlever tous les défauts résiduels sur les pièces. Elle est réalisée selon le degré de finition de la pièce demandé par le client, c'est-à-dire selon l'aspect visuel des surfaces meulées demandé.

2. Organisation de l'ébarbage

Sept ébarbeurs sont répartis en deux équipes (matin et après-midi) avec respectivement trois et quatre opérateurs. Ces derniers travaillent dans un grand atelier pouvant être ouvert sur l'extérieur et qui fait également office de lieu de stockage des pièces prêtes à être ébarbées ou finies d'être ébarbées. L'atelier dispose d'un pont roulant afin d'acheminer les pièces vers l'extérieur qu'ils partagent avec les travailleurs s'occupant des fours thermiques situés à l'autre extrémité de l'atelier de parachèvement.

Les ébarbeurs suivent une forme de travail posté en 2x8, c'est-à-dire que l'équipe du matin et celle de l'après-midi se succèdent par roulement de 8h consécutives. Elles sont alternantes et changent donc de tranches horaires toutes les semaines : chaque équipe est par exemple du matin une semaine sur deux. L'équipe en poste le matin travaille du lundi au jeudi de 4h45 à 12h45 et le vendredi de 5h à 11h45 et celle de l'après-midi travaille du lundi au jeudi de 12h45 à 20h45 et le vendredi de 11h45 à 17h45. De plus, les ébarbeurs sont payés à l'heure et non à la pièce.

Les supérieurs hiérarchiques immédiats des ébarbeurs sont les agents de maîtrise. Ils sont au nombre de deux et suivent cette même organisation temporelle de travail en changeant cependant de tranches horaires toutes les deux semaines, contrairement aux ébarbeurs qui changent chaque semaine. Un chef de service supervise l'ensemble de l'atelier de parachèvement : le responsable de l'atelier de parachèvement.

Les ébarbeurs ont pour travail prescrit de parachever les pièces. Pour cela, ils reçoivent des pièces et les manipulent à l'aide du pont roulant. Ils doivent ensuite ébarber les surfaces en fonction des spécifications d'état de surface demandées par le client. Les ébarbeurs peuvent alors se référer à une « caractérisation d'état de surface » contenant plusieurs échantillons présentant différents aspects visuels de surface après meulage. Ils contrôlent ensuite visuellement ou par ressuage[1] la « santé » de la pièce sous la responsabilité du contrôleur de fabrication parachèvement qui effectue d'autres contrôles (de dureté, de magnétoscopie…). Il est fréquent que le contrôleur demande aux ébarbeurs de meuler à nouveau certaines zones en fonction des résultats de ses contrôles.

Concernant leur équipement de travail (cf. Figure 13), les ébarbeurs se vêtent d'un habit de travail comprenant une blouse et un pantalon, des chaussures de sécurité et des gants. Ils sont également équipés d'un casque intégral ventilé avec une unité de filtration (moteurs et filtres) ceinturée autour de la taille et rattachée au casque par un tube placé dans le dos du travailleur. Ils portent également des bouchons d'oreille anti-bruit.

[1] Le contrôle par ressuage est une méthode de contrôle non destructif permettant de mettre en évidence des discontinuités internes de la pièce (fissure, crique…).

Figure 13 : Illustration des équipements des ébarbeurs

Concernant leurs outils de travail (cf. Figure 14), ils utilisent des meuleuses pesant en moyenne 5kg. Ces meuleuses « manuelles », nommées traditionnelles dans la suite de cet écrit, disposent d'un manche, sur lequel la gâchette de sécurité est positionnée ainsi qu'une poignée auxiliaire. Un disque à meuler est fixé à l'avant de l'outil accompagné d'un carter de protection.

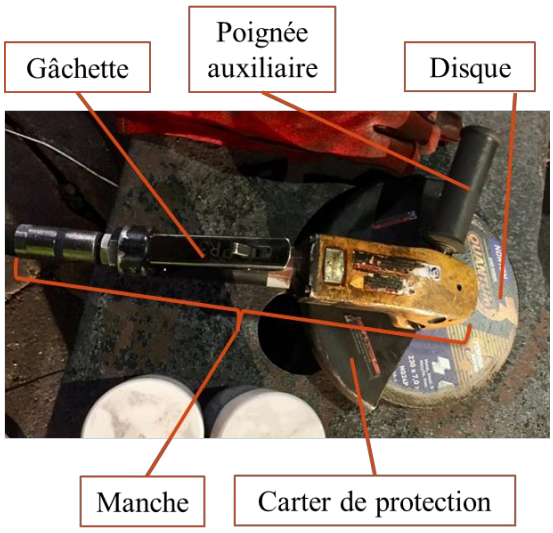


Figure 14 : Illustration des composantes de la meuleuse traditionnelle

3. Historique du développement et de l'introduction du cobot dans l'activité d'ébarbage

L'activité d'ébarbage de cette entreprise est concernée par une problématique importante de survenue de TMS (poignets, épaules et dos). Dans un objectif de prévention des TMS, cette entreprise, en échangeant avec un concepteur de cobot, s'est orientée vers une solution de robotique collaborative afin de soulager les ébarbeurs du poids et des vibrations de la meuleuse et de l'effort inhérent au meulage. Elle a participé au développement d'un robot d'assistance physique sans contention manipulé par l'opérateur (RAPscM appelé ici « cobot ») (cf. Figure 15). Un des premiers développés de la sorte en France, la spécificité de ce cobot réside dans le fait que la meuleuse est fixée à l'extrémité de son bras articulé.

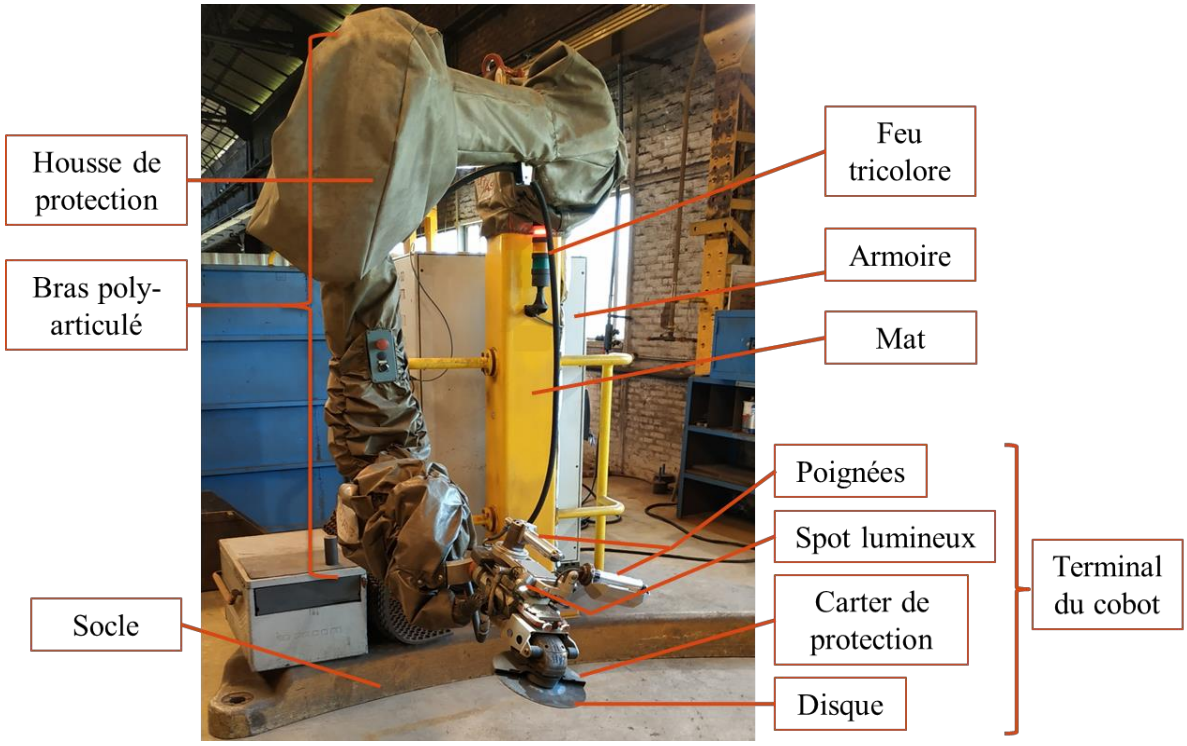


Figure 15 : Illustration des composantes du cobot

Le poids du cobot, du socle et du mat atteint 5 tonnes. Ce cobot dispose d'un bras poly-articulé composé de 7 articulations se situant sous la housse de protection. Une balise lumineuse est présente sur le mat du cobot, ce feu tricolore fournit des informations sur l'état de fonctionnement du cobot : vert – le cobot est en fonction, orange – une action (calibration

de l'outil, vérification du capteur d'effort…) est nécessaire pour mettre en fonctionnement le cobot, rouge – le cobot est à l'arrêt. Le terminal du cobot est équipé de deux poignées fixées sur un dispositif incluant un capteur d'effort. Ce dernier permet de soulager l'effort inhérent au meulage en détectant l'effort exercé par le travailleur qui est amplifié par le cobot. De plus, les poignées du terminal incluent, dans la partie inférieure, les gâchettes de sécurité. L'appui maintenu des deux gâchettes (une sous chaque poignée) autorise le fonctionnement du cobot, le relâchement de la pression sur l'une ou l'autre de ces gâchettes force l'arrêt de son fonctionnement. Le terminal du cobot est également équipé de spots lumineux. Enfin, la meuleuse, composée d'un disque à meuler et d'un carter de protection, est fixée sur le terminal du cobot. L'individu est alors déchargé du poids de la meuleuse ; car pris en charge par le terminal du cobot. Ce dernier est également équipé d'un dispositif antivibratoire pour diminuer les vibrations émises par la mise en mouvement du disque de la meuleuse.

Le postulat initialement formulé par l'entreprise et le concepteur était qu'en diminuant les sollicitations biomécaniques des ébarbeurs (effort et vibrations) le risque de survenue de TMS serait réduit sans rien modifier par ailleurs : en conservant le savoir-faire et l'expertise des ébarbeurs. Introduit dans l'activité d'ébarbage fin 2012 (cf. Annexe 1), le développement du cobot était initialement prévu pour un type de pièces spécifiques que nous nommerons pièce « plates » et dont la production était la plus importante pour l'entreprise à l'époque. Cependant, peu de temps après son introduction, le marché a changé et l'entreprise ne fabriquait plus autant de pièces « plates » qu'auparavant. Le cobot a alors subi des modifications (changement du dispositif de fixation de la meuleuse, évolutions technologiques…) pour s'adapter aux nouveaux types de pièces majoritaires : les pièces « courbes ». Néanmoins quelques problèmes techniques liés au fonctionnement du cobot gênaient les opérateurs (déplacement, longueur du bras articulé, maniabilité…) et son utilisation a commencé à s'essouffler. Des pannes du cobot ont renforcé cet essoufflement avec des périodes sans utilisation, le temps des réparations pouvant atteindre plusieurs mois. Au début de cette étude (2018-2019), le cobot était en panne. Il a fallu quelques mois pour le réparer et nous supposions qu'une fois réparé le cobot allait être utilisé « quotidiennement ». Or, cela n'a pas été le cas, le cobot était très peu utilisé par les travailleurs. L'entreprise

souhaitait alors comprendre pourquoi ce dispositif visant à améliorer les conditions de travail des ébarbeurs s'avérait moins utilisé qu'initialement envisagé.

Nous avons réalisé une analyse rétrospective de l'historique du projet de développement et d'introduction du cobot (Schoose et al., 2020) basée sur une étude de documents retraçant le projet et 13 entretiens semi-directifs avec les différentes parties prenantes de ce projet : les sept ébarbeurs, le directeur qualité, hygiène, sécurité, environnement et maîtrise de l'énergie (QHSEE), le responsable de production, le responsable de l'atelier parachèvement, les deux agents de maîtrise et le correspondant du concepteur. Cette analyse a montré que le projet a été initié avec une vision partielle des TMS centrée uniquement sur la dimension biomécanique réduite au poids et aux vibrations de l'outil et à l'effort inhérent au meulage.

Cette analyse rétrospective a également montré que les effets sur la quantité et la qualité du meulage réalisé ont été sous-estimés. L'encadrement, les agents de maîtrise et les ébarbeurs eux-mêmes pensaient initialement que l'usage du cobot n'impacterait pas la production en termes de quantité au-delà d'une période d'apprentissage de quelques mois. Cette période d'apprentissage comprenait une formation sur le fonctionnement du cobot. Or, les ébarbeurs expliquent avoir pris en main le cobot seuls, sur « le tas ». L'un d'entre eux (E1) a cependant participé aux premières étapes de développement du cobot chez le concepteur. Il s'est avéré qu'après quelques mois d'utilisation du cobot, le temps de travail ait cependant augmenté lors de l'usage du cobot. Une des explications, apportée par les ébarbeurs, concerne le rayon d'action du bras articulé du cobot qui ne leur permet pas d'atteindre l'ensemble des zones des pièces meulées (rappelons que ces dernières sont de grandes dimensions), ils ont alors besoin de déplacer plusieurs fois le cobot pour réaliser une pièce. À cela s'ajoute, son déplacement qui n'est pas aisé et nécessite l'utilisation (et la disponibilité) du pont roulant. De même, la qualité du travail réalisée avec le cobot a été discutée : les ébarbeurs et un de leur agent de maitrise évoquaient un meulage réalisé avec l'usage du cobot plus « grossier » par rapport à celui réalisé avec la meuleuse traditionnelle. Un membre de l'encadrement précisait que la pièce n'était pas aussi « belle » que lors du meulage traditionnel mais qu'elle pouvait convenir aux exigences de production. Un autre membre de l'encadrement n'évoquait pas d'éléments particuliers sur la qualité en la considérant identique avec ou sans l'usage du cobot

puisque : « *elle est [toujours] faite par l'opérateur [car] toute la partie visualisation c'est lui qui l'a encore.* ».

De plus, les ébarbeurs émettent des plaintes vis-à-vis des douleurs ressenties lors de l'usage du cobot : celles déjà présentes lors du meulage traditionnel seraient ressenties comme exacerbées lors de l'usage du cobot. Enfin, de manière générale, ils évoquent également que leur travail n'est plus le même, qu'il a changé en profondeur.

Compte tenu de notre revue de littérature, la faible utilisation du cobot pourrait s'expliquer par la non prise en compte de l'ensemble des dimensions du geste professionnel, l'inadéquation entre les évolutions du marché et la technologie proposée et la difficulté pour les opérateurs à tenir les buts de leur activité en termes de santé et de performance.

Synthèse et conclusion du chapitre 5

Dans un objectif de prévention des TMS, l'entreprise dans laquelle est réalisée cette étude s'est orientée vers une solution de robotique collaborative visant à soulager les ébarbeurs de l'effort inhérent au meulage et du poids et des vibrations de la meuleuse traditionnelle. Elle a participé au développement d'un robot d'assistance physique sans contention manipulé par l'opérateur (RAPscM appelé ici « cobot »). Un des premiers développés de la sorte en France, la spécificité de ce cobot réside dans le fait que la meuleuse est fixée à l'extrémité de son bras articulé. L'opérateur ne manipule plus la meuleuse directement mais le terminal du cobot sur lequel elle est fixée. La volonté de cette entreprise était, dans un objectif de prévention des TMS, de diminuer les sollicitations biomécaniques des ébarbeurs tout en préservant leur savoir-faire. Introduit dans l'activité d'ébarbage fin 2012, le cobot est actuellement peu utilisé. Au cours d'entretiens semi-directifs avec les ébarbeurs et l'encadrement, différents éléments ont émergé pouvant, en partie, expliquer la situation actuelle de faible utilisation du cobot. L'ensemble des acteurs du projet souhaite véritablement comprendre pourquoi ce dispositif visant à améliorer les conditions de travail des individus est moins utilisé qu'initialement envisagé. Compte tenu de notre revue de littérature, l'analyse de l'évolution du geste professionnel entre le meulage traditionnel et le meulage avec l'usage du cobot se révèle pertinente pour comprendre les difficultés exprimées par les travailleurs pour tenir les buts de leur activité en termes de santé et de performance.

Chapitre 6 : Problématique et hypothèses de recherche

1. Problématique

Le contexte de robotique collaborative engendre une évolution du travail, une mutation en profondeur qu'il faut pouvoir décrire et comprendre pour s'assurer que les évolutions futures seront en faveur de la santé et de la performance des travailleurs. Un enjeu pour la prévention des TMS est de concevoir des milieux favorables au développement du geste professionnel dans l'articulation de ses dimensions biomécanique, cognitive et psycho-sociale (Bourgeois & Hubault, 2005; Bourgeois et al., 2006; Caroly et al., 2008b). Le cas étudié dans cette thèse concerne l'activité de meulage traditionnel (utilisation d'une meuleuse traditionnelle) et l'activité de meulage avec usage du cobot. Ce cobot est un cas particulier des cobots de type « collaboration directe » : sa spécificité réside dans le fait que la meuleuse est fixée à l'extrémité de son bras articulé. L'ébarbeur ne manipule plus la meuleuse directement mais le terminal du cobot sur lequel elle est fixée.

Dans la littérature, les nouvelles situations de travail incluant un cobot sont encore souvent au stade de projet et s'avèrent très complexes à concevoir et à mettre en œuvre car celles-ci posent de nouvelles questions en termes de santé et de sécurité pour laquelle la recherche doit investir. Dans notre cas, la conception du cobot dans une visée de prévention des TMS, a cherché à diminuer les sollicitations biomécaniques du travailleur (effort de meulage et vibrations) en supposant que cela ne modifierait rien par ailleurs dans son activité.

L'effet de l'introduction du cobot sur le risque de survenue des TMS dans la littérature s'est majoritairement concentré sur une approche de réduction des facteurs de risque posturaux et en matière d'effort. Cette approche montre néanmoins des limites, notamment dans la prise en compte de l'ensemble des dimensions de l'activité de travail. En effet, l'ergonomie de l'activité considère que la survenue de TMS peut également être dûe à l'impossibilité pour les individus d'ajuster leurs gestes professionnels aux variabilités des situations de travail et à leurs caractéristiques propres. Il s'agit alors, dans un contexte de robotique collaborative, d'orienter la prévention vers l'analyse de l'évolution de l'articulation

des dimensions biomécanique, cognitive et psycho-sociale du geste professionnel des opérateurs entre une activité « traditionnelle » (utilisant une meuleuse traditionnelle) et cette même activité avec l'usage du cobot. La dimension biomécanique concerne l'analyse du mouvement avec les déplacements des segments corporels, l'angulation etc. (Luttmann et al., 2003; NIOSH, 1997; Silverstein et al., 1986). La dimension cognitive se réfère au recueil et au traitement des informations perçues par le travailleur (Hoc & Amalberti, 1999; Sperandio, 1983). La dimension psycho-sociale vise à comprendre comment l'opérateur ressent et vit son activité de travail (Gollac & Bodier, 2011; Van Belleghem, De Gasparo, & Gaillard, 2013).

Pour la prévention des TMS, il est important de « ne pas réduire l'analyse de l'activité aux mouvements » (Vézina, 2001, p. 48) et de considérer le geste comme « un compromis entre les objectifs, la tâche, les moyens de travail et les caractéristiques individuelles de celui qui les réalise […] qui rend compte de l'activité de la personne » (Bourgeois et al., 2006, pp. 163-164). Si l'individu ne parvient plus à élaborer le geste qu'il souhaite, ce dernier peut être atteint dans chacune ou toutes ses dimensions (biomécanique, cognitive et psycho-sociale) et peut résulter en une hyper-sollicitation physique, une hyper-sollicitation sous l'effet de désordres endocrino-métabolique, une hypo-sollicitation du geste avec un geste atrophié du pouvoir d'agir sur la situation, empêché pouvant conduire à l'apparition de TMS. Il est donc indispensable d'admettre la singularité individuelle des gestes et le caractère dynamique de leur construction afin que les actions visées par les gestes soient d'autant plus performantes (Bourgeois et al., 2006). Les gestes sont alors « situés », « réfléchis », « choisis », «adaptés » de sorte qu'ils perdent leur efficience dès que la situation les contraint dans un format standardisé (Bourgeois et al., 2006; Chassaing, 2006). Au vu du cadre théorique précèdent et pour répondre à la préoccupation de l'entreprise, l'usage du cobot doit soutenir une évolution du geste professionnel non délétère dans l'ensemble de ses dimensions (biomécanique, cognitive et psycho-sociale) et dans l'articulation de celles-ci pour limiter le risque de survenue de TMS. L'usage du cobot ne se limite pas à l'outil, la situation de travail à son importance pour l'élaboration du geste.

Cette problématique conduit à des hypothèses interdépendantes. Bien que les dimensions biomécanique, cognitive et psycho-sociale soient convoquées simultanément dans

le geste élaboré, il convient dans l'analyse de cette étude de les dissocier dans un premier temps et d'analyser l'évolution de chacun d'entre elles, pour ensuite comprendre et faire la démonstration de l'évolution de l'articulation des dimensions du geste professionnel. Ainsi, la première hypothèse porte sur l'analyse de l'évolution de la dimension biomécanique du geste lors de l'usage du cobot. La seconde concerne l'évolution de la dimension cognitive du geste. La troisième s'intéresse à l'évolution de la dimension psycho-sociale du geste. Enfin, la quatrième hypothèse cherche à comprendre l'évolution de l'articulation des dimensions biomécanique, cognitive et psycho-sociale du geste professionnel lors de l'usage du cobot. Pour cela nous nous appuierons sur l'analyse de l'évolution des gestes professionnels des ébarbeurs entre l'activité de meulage traditionnel et celle assistée par le cobot.

2. Modèle du geste

Pour répondre à cette problématique, nous nous appuyons sur un modèle du geste professionnel réalisé sur la base de la littérature existante (Bourgeois & Hubault, 2005; Bourgeois et al., 2006; Chassaing, 2006; Coutarel, Chambon, Clavel, & coll., 2016; Vézina, 2001) (cf. Figure 16).

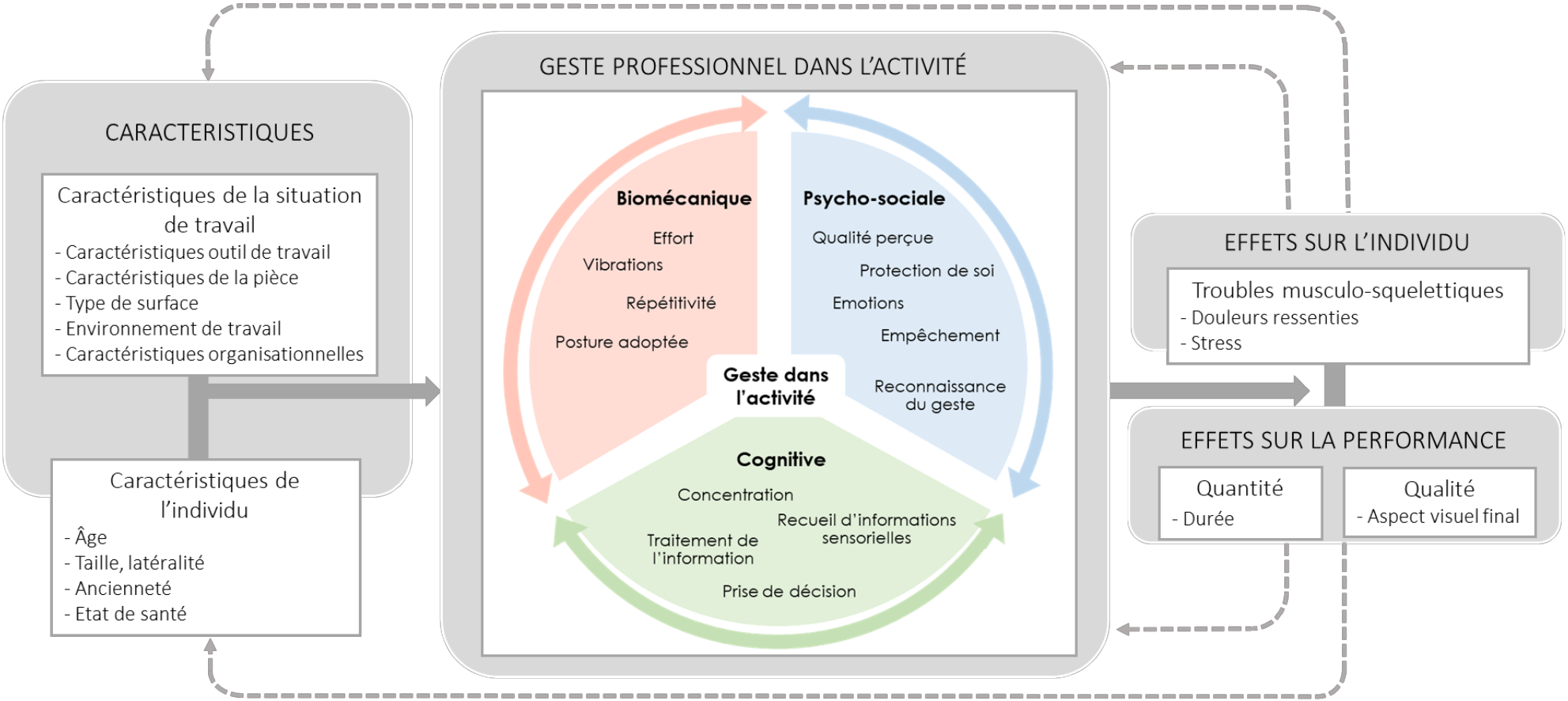


Figure 16 : Modélisation du geste professionnel au sein de l'activité

Le geste professionnel se réalise dans un contexte qui renvoie aux caractéristiques de la situation de travail avec, les caractéristiques de l'outil de travail, de la pièce, le type de surface, l'environnement de travail et l'organisation du travail et aux caractéristiques individuelles de celui qui réalise le geste. En effet, l'âge, la taille, l'ancienneté et l'état de santé sont également importants dans la construction du geste professionnel. Le geste professionnel élaboré par le travailleur se réalise alors afin de maintenir sa santé et/ou sa performance. Dans notre cas, la santé concerne la survenue des TMS que nous mettons en lien avec les douleurs ressenties par les ébarbeurs à la suite des gestes réalisés avec et sans usage du cobot et la notion de stress ressenti. Concernant la performance, elle se distingue en termes de quantité à produire définie par la durée du geste réalisé et de qualité du meulage en fonction de l'aspect visuel final du meulage réalisé. Le geste, au sein de l'activité, se compose de trois dimensions : biomécanique, cognitive et psycho-sociale. Bien que convoquées simultanément dans l'activité, nous les distinguons pour mieux les comprendre et les articuler. Dans notre modélisation du geste, les différentes dimensions sont définies comme telles :

Dimension biomécanique du geste professionnel

Comme le rappelle Gaudez et Aptel, il est « essentiel de comprendre les bases des phénomènes physiologiques et biomécaniques qui sous-tendent l'exécution du mouvement pour ensuite mieux appréhender le geste réalisé » (2008, p. 386). Ainsi « par sa construction multidisciplinaire, l'ergonomie est normalement bien équipée pour distinguer dans la démarche d'analyse du geste, ce qui est d'ordre stratégique pour l'opérateur (toujours lié à la singularité de la situation et à son dénouement) et ce qui est de l'ordre de la mise en œuvre de cette stratégie par lui, et que l'on peut décrire par ses caractéristiques biomécaniques. » (Bourgeois & Hubault, 2005, p. 27). La dimension biomécanique concerne l'analyse du mouvement incluant dans cette étude les postures adoptées par les opérateurs, l'effort et les vibrations ressentis ainsi que la répétitivité des mouvements effectués avec l'outil de travail (Luttmann et al., 2003; NIOSH, 1997; Silverstein et al., 1986).

Dimension cognitive du geste professionnel

La dimension cognitive se réfère au recueil et au traitement des informations perçues et vise à expliquer comment l'opérateur organise et décompose son activité de travail. En effet, « des intentions et des motifs sont à l'origine du geste. Cette activité cognitive de l'opérateur a pour but de faire face aux évènements de la situation en ajustant ses actions et ses modes opératoires. […] Il a recours pour cela aux sens, à la mémoire, à l'expérience, et à sa représentation de la situation. » (Chassaing, 2006, p. 259). C'est cette dimension cognitive du geste qui fait de ce dernier un « processus permanent d'appréciation de la situation par l'opérateur et d'ajustement de ses modes opératoires. » (Bourgeois et al., 2006, p. 24). La dimension cognitive est ainsi composée dans cette étude de la concentration (Sperandio, 1983), du recueil des informations sensorielles, du traitement d'information et de la prise de décision (Hoc & Amalberti, 1999; Richard, 1990).

Dimension psycho-sociale du geste professionnel

La dimension psycho-sociale concerne l'interaction de la composante psychologique et sociale du geste et vise à comprendre comment l'opérateur ressent et vit son activité de travail (Gollac & Bodier, 2011; Van Belleghem et al., 2013). En effet le geste « porte la marque de l'opérateur, il est le signe de sa créativité, de son ingéniosité, mobilisées pour faire face aux contraintes de la situation. […] L'opérateur met ainsi en œuvre un geste adéquat à la situation et à lui-même [qui] lui procure du plaisir [et qui] participe à la construction de son bien-être et la protection de sa santé mentale et psychique. » (Chassaing, 2006, p. 260). La dimension psycho-sociale du geste, dans notre conception, correspond au sens du geste pour l'individu (Clot, 2004; Morin & Aranha, 2007). Il prend en compte la qualité du travail perçue par les travailleurs (Petit & Dugué, 2013), la protection de soi, l'empêchement (Clot, 1999), les émotions ressenties (Böhle & Milkau, 1998; Van De Weerdt, 2003) et la reconnaissance du geste (Dejours, 2003) par soi vis-à-vis d'autrui.

3. Hypothèses

Hypothèse générale : **L'usage du cobot a des conséquences sur l'articulation de l'ensemble des dimensions du geste professionnel. L'analyse de l'évolution du geste professionnel est nécessaire pour comprendre les effets de l'usage du cobot et identifier les caractéristiques de la situation de travail à transformer dans une perspective de prévention des TMS.**

Nous proposons quatre hypothèses en lien avec le contexte de cette étude et le cadre théorique sur lequel nous nous appuyons. Tout d'abord, nous cherchons à comprendre les conséquences de l'usage du cobot sur la dimension biomécanique, cognitive et psycho-sociale du geste indépendamment les unes des autres (hypothèses 1, 2 et 3). Cette analyse nous permet de rentrer plus dans le détail des évolutions de chaque dimension et de leurs composantes afin de mieux comprendre leur articulation. Ce premier pas nous amène ensuite à formuler une hypothèse pour comprendre l'évolution du geste dans l'ensemble de ses dimensions au sein de l'activité de meulage avec le cobot (hypothèse 4).

Hypothèse 1 : **L'attention focalisée initialement sur l'effort lié au port de l'outil et sur les vibrations lors de l'introduction du cobot a sous-estimé l'influence de celui-ci sur d'autres composantes de la dimension biomécanique du geste professionnel.**

Nous considérons que la dimension biomécanique est plus large que les composantes effort et vibrations et nous y intégrons également la répétitivité des mouvements et les postures adoptées par les travailleurs. Cette première hypothèse cherche à comprendre comment évolue la dimension biomécanique du geste professionnel entre le meulage traditionnel et le meulage assisté par le cobot.

Les questionnements sous-jacents à cette hypothèse sont les suivants :

1.1 Comment l'effort global ressenti par les ébarbeurs évolue avec l'usage du cobot ?

1.2 Comment les vibrations ressenties évoluent avec l'usage du cobot ?

1.3 Comment la répétitivité des mouvements des ébarbeurs évolue avec l'usage du cobot ?

1.4 Comment les postures adoptées par les ébarbeurs évoluent-elles avec l'usage du cobot ?

Hypothèse 2 : **Le geste professionnel évolue également dans sa dimension cognitive lors de l'usage du cobot.**

Cette seconde hypothèse suppose que l'usage du cobot fait évoluer la dimension cognitive du geste et nous cherchons à comprendre cette évolution.

Les questionnements sous-jacents à cette hypothèse sont les suivants :

2.1 Comment la concentration estimée par les ébarbeurs évolue avec l'usage du cobot ?

2.2 Comment le recueil des informations sensorielles évolue avec l'usage du cobot ?

2.3 Comment le traitement d'information et les prises de décision évoluent avec l'usage du cobot ?

Hypothèse 3 : **L'usage du cobot influence également la dimension psycho-sociale du geste professionnel.**

Cette troisième hypothèse s'intéresse à l'évolution de la dimension psycho-sociale du geste entre le meulage traditionnel et le meulage assisté par le cobot. Nous supposons que cette dimension évolue également, comme les autres dimensions, et nous cherchons à comprendre comment.

Les questionnements sous-jacents à cette hypothèse sont les suivants :

3.1 Comment la qualité perçue par les ébarbeurs évolue avec l'usage du cobot ?

3.2 Comment la protection de soi évolue avec l'usage du cobot ?

3.3 Comment l'empêchement évolue avec l'usage du cobot ?

3.4 Comment les émotions ressenties par les ébarbeurs évoluent avec l'usage du cobot ?

3.5 Comment la reconnaissance du geste évolue avec l'usage du cobot ?

Hypothèse 4 : **L'analyse du geste dans l'articulation des dimensions biomécanique, cognitive et psycho-sociale permet d'apporter des connaissances complémentaires sur les effets de l'usage du cobot. Ces connaissances permettent d'identifier une diversité de caractéristiques à prendre en compte pour agir en matière de prévention des TMS lors l'usage d'un cobot.**

Cette hypothèse s'intéresse à l'analyse articulée des dimensions biomécanique, cognitive et psycho-sociale du geste professionnel et à ce qu'elle permet de comprendre des effets pour

la santé et la performance des individus et des éléments de la situation de travail à transformer pour la prévention des TMS.

Les questionnements sous-jacents à cette hypothèse sont les suivants :

4.1 - L'articulation de la dimension biomécanique avec les autres dimensions du geste professionnel permet-elle de mieux comprendre l'évolution du geste dans l'activité avec un cobot ?

4.2 - L'articulation de la dimension cognitive avec les autres dimensions du geste professionnel permet-elle de mieux comprendre l'évolution du geste dans l'activité avec un cobot ?

4.3 - L'articulation de la dimension psycho-sociale avec les autres dimensions du geste professionnel permet-elle de mieux comprendre l'évolution du geste dans l'activité avec un cobot ?

4.4 – Quelles caractéristiques de la situation de travail expliquent l'évolution du geste professionnel dans toutes ses dimensions ?

Chapitre 7 : Méthodologie

Nous avons présenté dans le chapitre 6 la problématique de recherche, le modèle théorique ainsi que les hypothèses de recherche. Ce chapitre 7 a pour objectif de présenter la méthodologie déployée pour rendre compte de l'évolution de l'articulation des dimensions biomécanique, cognitive et psycho-sociale entre le geste réalisé avec la meuleuse traditionnelle (geste traditionnel) et le geste réalisé avec le cobot (geste cobot). Compte tenu de notre hypothèse générale sur le fait que l'usage du cobot a des conséquences sur l'articulation de l'ensemble des dimensions du geste professionnel, le premier objectif de la méthodologie est d'identifier des gestes au sein desquels analyser l'ensemble des dimensions biomécanique, cognitive et psycho-sociale au travers d'observations et d'entretiens avec les ébarbeurs. Puis, pour comprendre l'évolution de l'articulation de ces dimensions entre les gestes traditionnels et les gestes cobot, nous nous appuyons sur une méthodologie semi-déductive. Le recueil et l'analyse des données sur chacune des dimensions des gestes sont guidés, sans les limiter, par des catégories du modèle théorique (cf. cadre théorique et partie 2 du chapitre 6) et les données issues du terrain font émerger des éléments enrichissants nos présupposés théoriques et l'analyse et l'interprétation des données.

Ainsi, dans un premier temps, les caractéristiques individuelles des ébarbeurs qui ont participé à cette étude sont détaillées. La partie suivante présente les gestes identifiés pour l'analyse. Le recueil et la mise en forme des données sur les gestes sont ensuite décrits. La méthodologie se clôture par le détail de l'analyse des données pour chacune des dimensions des gestes et de l'analyse de leur articulation.

1. Participants

L'étude a été menée dans une fonderie avec la participation volontaire de cinq ébarbeurs : une présentation des objectifs de l'étude a été réalisée avant le début de celle-ci et un consentement libre et éclairé a été obtenu. Au travers d'entretiens semi-directifs (cf. Annexe 2) avec les cinq ébarbeurs (environ 1h d'entretien/ébarbeur), les caractéristiques individuelles de ces derniers ont été renseignées (cf. Tableau 1).

Tableau 1 : Caractéristiques individuelles des ébarbeurs volontaires

		E1	E2	E3	E5	E7
Age (année)		47	36	56	58	49
Ancienneté dans l'entreprise (année)		17	12	12	23	14
Ancienneté en tant qu'ébarbeur (année)	Meulage traditionnel	17	12	12	18	26
	Meulage assisté par le cobot	environ 2 ans				
Taille (mètre)		1,80	1,80	1,70	1,68	1,86
Latéralité (D = droitier)		D	D	D	D	D
Etat de santé (localisation des douleurs ressenties)		Dos et épaules	Pas de douleurs	Dos, épaules et poignets	Dos et coudes	Dos

Les ébarbeurs ayant participé à cette étude avaient en moyenne 49 ans, 16 ans d'ancienneté au sein de cette entreprise, 17 ans d'ancienneté en tant qu'ébarbeur (meulage traditionnel) et environ 2 ans d'ancienneté pour le meulage assisté par le cobot. De taille moyenne 1 mètre 77, ils étaient tous droitiers. De plus, lors de ces premiers entretiens, leur état de santé a été recueilli au travers d'un schéma corporel afin de localiser les éventuelles douleurs ressenties avant le meulage. Les ébarbeurs avaient tous des troubles de santé avérés en matière de TMS à l'exception de l'ébarbeur E2. Ils ressentaient des douleurs au niveau du dos (E1, E3, E5 et E7), des épaules (E1 et E3), des coudes (E5) et des poignets (E3).

2. Identification des gestes

Dans un premier temps, nous avons cherché à identifier les gestes dans l'activité de meulage traditionnel et avec cobot. Pour cela, cette étude a débuté par des observations ouvertes de l'activité de meulage traditionnel et de l'activité de meulage avec usage du cobot. Les observations ouvertes permettaient de se laisser étonner par des façons de faire, d'utiliser l'outil etc. Un total de 10 jours d'observations ouvertes de l'activité de meulage traditionnel (3 jours pour les 5 ébarbeurs) et de 2 jours de l'activité de meulage avec usage du cobot (environ 3 heures pour les 5 ébarbeurs) a été réalisé. Les conditions du terrain n'ont pas permis de faire plus d'observations ouvertes de l'activité de meulage avec usage du cobot. Ceci s'explique par ailleurs par le contexte de cette étude (cf. chapitre 5) : au début de celle-ci, le cobot était en

panne. Une fois réparé, nous supposions que le cobot serait utilisé quotidiennement. Cela n'a pas été le cas, le cobot était très peu utilisé.

L'activité de meulage dépend notamment des caractéristiques des pièces. Nous avons fait le choix de nous focaliser sur une typologie de pièces que nous avons nommées « courbes » pour cette étude (cf. Figure 17). Bien que cette entreprise fabrique des pièces unitaires, une constante peut être retrouvée pour certaines caractéristiques notamment l'orientation des surfaces (surfaces planes horizontales et verticales).

Figure 17 : Illustration d'une pièce courbe

Une analyse a posteriori des observations a permis de comprendre les différentes orientations de surfaces meulées avec et sans usage du cobot. Nous nous sommes alors aperçus que toutes les orientations de surfaces ne pouvaient pas être meulées avec le cobot (cf. Tableau 2).

Tableau 2 : Découpage de l'activité de meulage traditionnel et assisté par le cobot

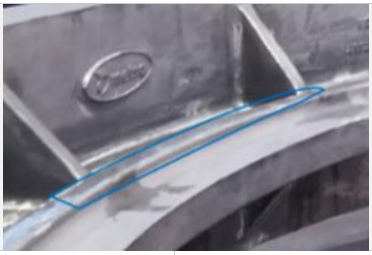
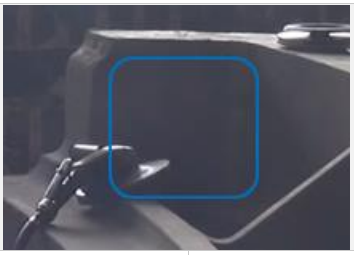
Légende : Complètement meulée / Partiellement meulée / Ne pouvant être meulée

Type de surface	Orientation de la surface	Traditionnel	Cobot
Surface plane d'environ 40 cm de long (+/- 10cm) x 50 cm de large (+/- 10cm)	Horizontale		
	Verticale		
Surface plane d'environ 60 cm de long (+/- 40cm) x 7 cm de large (+/- 2cm)	Horizontale		
	Inclinée par rapport à l'horizontale		
	Verticale		
Surface arrondie d'environ 40 cm de long (+/- 10cm) x 15 cm de large (+/- 10cm)	Horizontale		
	Verticale		

De plus, au vu du contexte de cette étude, l'identification des gestes a également tenu compte de la problématique à l'origine du projet de développement et d'introduction du cobot : le poids de la meuleuse et l'effort de meulage. Ainsi, les entretiens semi-directifs évoqués précédemment, avec les 5 ébarbeurs (environ 1h/ébarbeurs) (cf. Annexe 2), nous ont permis de comprendre que, pour meuler les surfaces verticales (surface plane d'environ 40 cm de long±10cm x 50cm de large±10 cm) les ébarbeurs devaient porter le poids de la meuleuse ce qui rend le meulage de ces surfaces très éprouvant physiquement. À l'inverse, pour meuler les surfaces horizontales (surface plane d'environ 60cm de long±40cm x 7cm de large±2cm), les opérateurs ont expliqué que comme la meuleuse était en appui contre la surface, le poids de celle-ci était moindre. Par ailleurs, lors de ces entretiens et ceux réalisés lors de l'analyse rétrospective du projet (cf. chapitre 5 partie 3), les ébarbeurs ont évoqué éprouver plus de difficultés à meuler avec le cobot les surfaces verticales que les surfaces horizontales.

À l'issue, nous avons donc identifié les gestes de meulage de surface verticale (surface plane d'environ 40 cm de long±10cm x 50cm de large±10 cm) et de surface horizontale (surface plane d'environ 60cm de long±40cm x 7cm de large±2cm). Les gestes concernent les moments où le travailleur posait la meuleuse en état de fonctionnement sur la surface pour enlever la matière. En renouvelant les observations (systématiques cf. partie suivante), les moments où l'opérateur meulait une surface verticale et horizontale avec et sans usage du cobot ont été extraits des vidéos afin de procéder à l'analyse des dimensions des gestes sur lesquels nous les avons ensuite faits verbaliser (cf. parties suivantes). La durée moyenne des gestes a été mesurée sur la base des vidéos réalisées lors du meulage traditionnel et lors de l'usage du cobot (cf. Tableau 3). Cette durée concerne la moyenne d'un geste pour 5 ébarbeurs lors de l'usage du cobot et la moyenne d'un geste pour 4 ébarbeurs lors du geste traditionnel (geste de meulage d'une surface verticale et geste de meulage d'une surface horizontale). Suite à une longue absence de l'ébarbeur E1, nous n'avons pas pu observer et analyser ses gestes traditionnels.

Tableau 3 : Présentation des gestes

	Gestes de meulage d'une surface horizontale		Gestes de meulage d'une surface verticale	
Dimensions de la surface	60cm (+/- 10cm) de long et 7cm (+/- 2cm) de large		40cm (+/- 10cm) de long et 50cm (+/- 10cm) de large	
Plan de la surface	Horizontal		Vertical	
Illustration				
Durée moyenne des gestes	Geste traditionnel : 1min27sec (de 49sec à 2min11sec)	Geste cobot : 1min37sec (de 16sec à 3min)	Geste traditionnel : 3min22sec (de 1min14sec à 5min19sec)	Geste cobot : 2min19sec (de 23sec à 4min5sec)

3. Recueil et mise en forme des données sur les gestes

Le tableau suivant synthétise les modes de recueil mobilisés pour chaque ébarbeur (cf. Tableau 4).

Tableau 4 : Modes de recueil de données sur les gestes

		E1	E2 E3 E5 E7	Total
Observations systématiques	Traditionnel		1j	4j
	Cobot	1h30	3h	13h30
Entretiens au poste de travail + échelles visuelles analogiques (EVA)	Traditionnel		2x1h	8 entretiens représentant un volume de 8h
	Cobot	2x30min/1h (sans EVA)	2x1h	10 entretiens représentant un volume de 9-10h
Entretiens d'auto-confrontation individuelle consécutifs aux observations	Traditionnel		1h	4 entretiens représentant un volume de 4h
	Cobot		1h	4 entretiens représentant un volume de 4h
Entretiens d'auto-confrontation individuelle a posteriori	Traditionnel + Cobot		1h30/2h	4 entretiens représentant un volume de 6h-8h

Le recueil de données a concerné 4 ébarbeurs (E2, E3, E5 et E7) pour les gestes traditionnels et 5 ébarbeurs (E1, E2, E3, E5 et E7) pour les gestes cobot. Pour l'opérateur E1, comme cela a été dit auparavant, seules les méthodes de recueil suivantes ont été appliquées :

- observations systématiques des gestes cobot,
- entretiens au poste de travail lors des gestes cobot mais sans utilisation d'échelles visuelles analogiques.

Ainsi, pour cet ébarbeur l'évolution entre les gestes traditionnels et les gestes cobot n'a pas pu être analysée. Néanmoins, il nous a semblé pertinent d'inclure les données recueillies lors des observations de ses gestes cobot et des quelques échanges avec cet opérateur dans l'analyse du fait de sa vision « différente » de l'usage du cobot par rapport à ses collègues.

Les données ont donc été recueillies au travers de divers modes de recueil qui sont complémentaires et itératifs (cf. Figure 18). La triangulation des modes de recueil de données permet d'améliorer la validité interne des résultats produits.

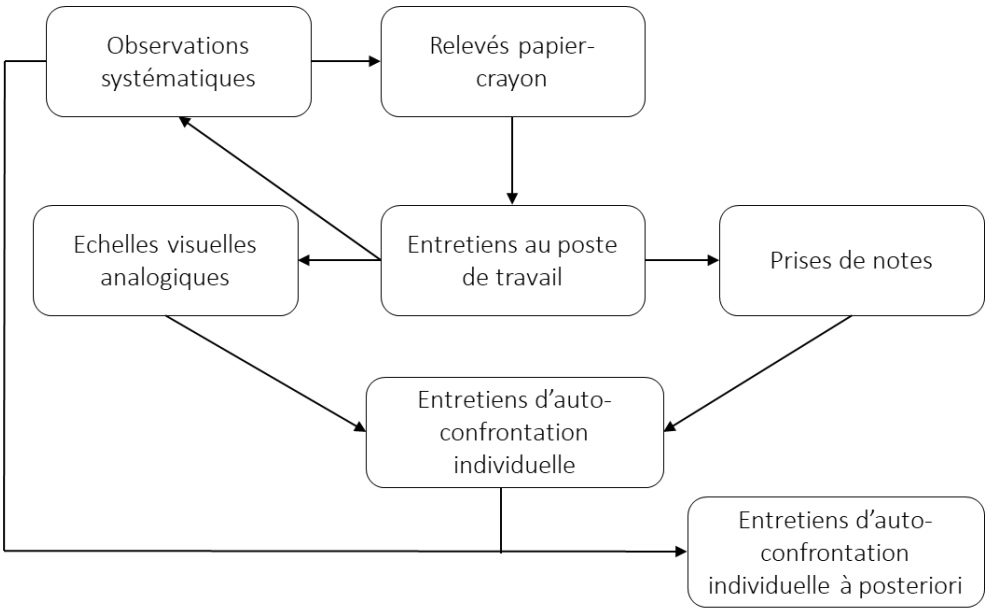


Figure 18 : Modes de recueil de données

3.1 Observations systématiques

Des observations vidéo et audio-enregistrées ont été réalisées à l'aide de trois caméras (une centrée sur l'opérateur et son outil de travail, une filmant le travailleur de dos et une autre le filmant de profil afin d'éviter les erreurs de parallaxe) et se sont accompagnées de relevés papier-crayon. Les observations systématiques permettaient de se centrer sur des détails précis, sur des observables déterminés suite aux observations ouvertes précédentes et aux échanges avec les ébarbeurs. Les observables choisis sont les suivants :

- l'inclinaison du disque par rapport à la surface (0°-30°, 30°-60° ou 60°-90°) (cf. Figure 19),

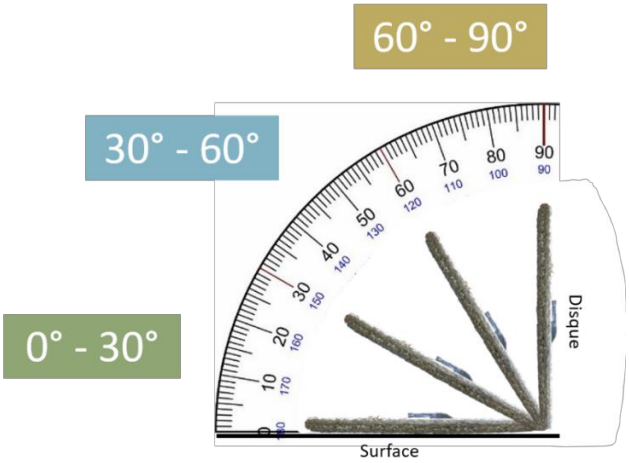


Figure 19 : Inclinaison du disque par rapport à la surface

- les directions des mouvements effectués avec l'outil de travail (alternatif haut bas, alternatif gauche droite, vers le haut, vers la droite…) (cf. Figure 20),

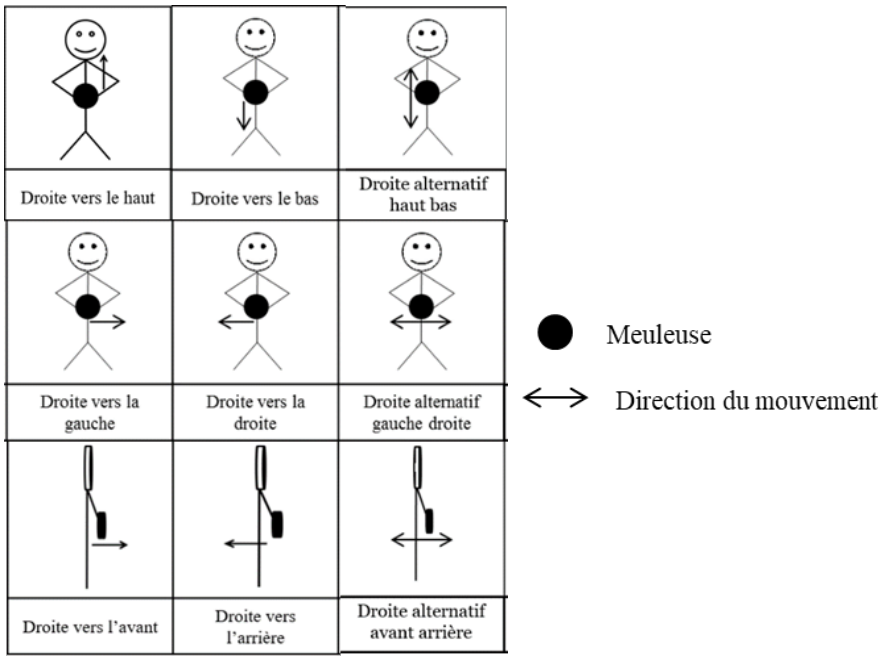


Figure 20 : Direction des mouvements réalisés avec l'outil de travail

- la position de l'opérateur par rapport à la pièce (cf. Figure 21)

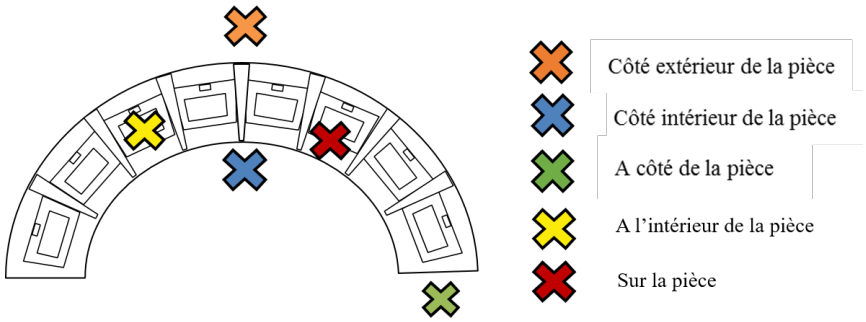


Figure 21 : Position de l'opérateur par rapport à la pièce

- la position des mains sur l'outil de travail (cf. Figure 22)

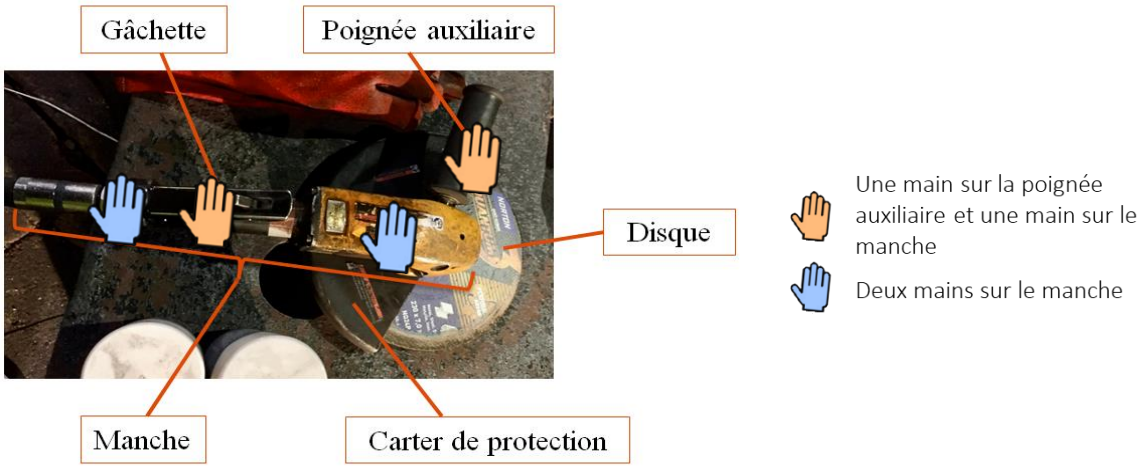


Figure 22 : Position des mains sur l'outil de travail

- l'orientation de la meuleuse par rapport à l'opérateur (cf. Figure 23)

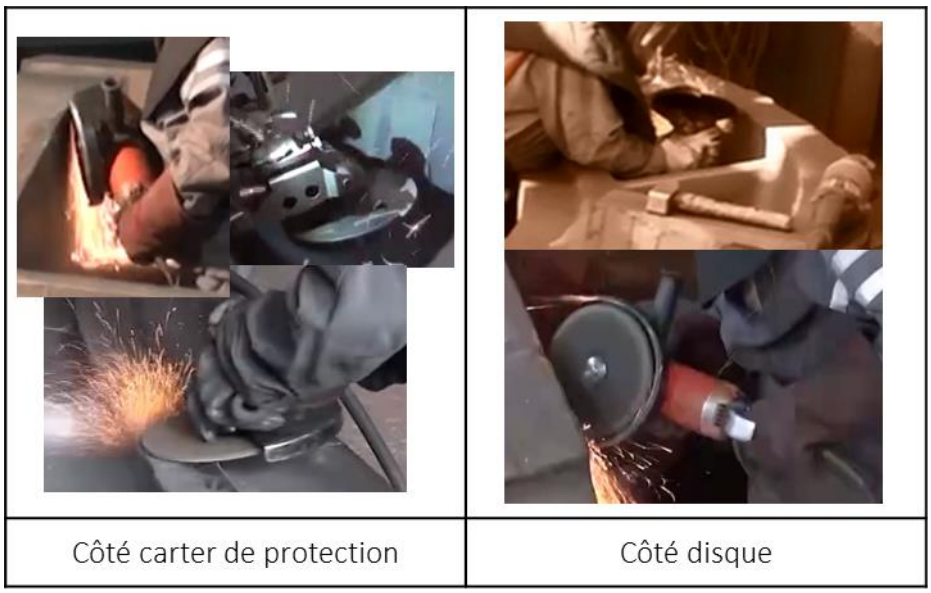


Figure 23 : Orientation de la meuleuse par rapport à l'opérateur

Une analyse a posteriori (post-codage via le logiciel Captiv™) reprenant les modes opératoires ci-dessus a été réalisée sur la base des extraits des vidéos concernant les gestes sur lesquels nous avons ensuite fait verbaliser les ébarbeurs donnant lieu à des chroniques d'activité.

3.2 Entretiens au poste de travail

Les observations ont été entrecoupées d'entretiens au poste de travail (cf. Annexe 3) afin de faire verbaliser les ébarbeurs sur leur façon de faire ; les éléments précédemment cités étaient discutés avec les ébarbeurs afin de recueillir « à chaud » le « comment » et le « pourquoi » de leur façon de faire. Deux entretiens audio et vidéo-enregistrés par opérateurs d'environ 1h lors des gestes traditionnels et lors des gestes cobot ont été réalisés. Ils étaient outillés d'un schéma corporel pour recueillir et localiser les éventuelles douleurs inhérentes au geste réalisé et d'échelles visuelles analogiques (EVA). Ces dernières ont permis de recueillir l'estimation des opérateurs sur différentes composantes des trois dimensions du geste : l'effort global ressenti et le niveau de vibration ressenti pour la dimension biomécanique, le niveau de concentration estimé pour la dimension cognitive et la qualité perçue et les émotions

ressenties pour la dimension psycho-sociale. Au-delà de recueillir une estimation quantifiée sur ces composantes, l'intérêt d'utiliser ces échelles était de remobiliser ensuite ces estimations lors des entretiens suivants pour amener les opérateurs à expliciter leur geste. Les estimations sur les différentes échelles ont été dépouillées manuellement.

3.3 Entretien d'auto-confrontation individuelle consécutif aux observations

À l'issue des observations, un entretien d'auto-confrontation individuelle audio et vidéo-enregistré d'une durée entre 1h pour chaque ébarbeur a été réalisé dans une salle annexe de l'atelier. Ces entretiens ont été outillés des relevés papier-crayon des observations, des prises de notes des entretiens au poste de travail et des estimations faites sur les EVA afin d'expliciter leur façon de faire et leur ressenti. L'objectif de ces premiers entretiens d'auto-confrontation individuelle était de recueillir des données sur chacune des dimensions des gestes traditionnels et des gestes cobot distinctement. En effet, les premières étapes de la méthodologie décrites jusqu'à présent (observations systématiques, entretiens au poste de travail, entretiens d'auto-confrontation individuelle consécutifs aux observations) concernaient exclusivement soit les gestes traditionnels soit les gestes cobot.

3.4 Entretien d'auto-confrontation individuelle a posteriori

Un deuxième entretien d'auto-confrontation individuelle audio et vidéo-enregistré a ensuite été réalisé a posteriori différé d'environ 2 semaines en regroupant cette fois au sein du même entretien les gestes traditionnels et les gestes cobot afin de les faire verbaliser sur l'évolution de leur façon de faire. L'objectif était d'articuler les données recueillies sur chacune des dimensions du geste et de mettre en évidence les évolutions. Ainsi un entretien par ébarbeur a été réalisé pendant une durée comprise entre 1h30 et 2h. Le support de ces entretiens était constitué des extraits vidéos correspondants aux gestes ainsi que d'une partie des chroniques d'activité (inclinaison du disque, mouvements effectués avec l'outil et positionnement des mains) afin de faciliter la verbalisation des ébarbeurs (cf. Figure 24). Ces entretiens étaient outillés d'un guide d'entretiens (cf. Annexe 4) s'appuyant sur les extraits vidéos et reprenant un certain nombre d'éléments sur lesquels revenir avec le travailleur.

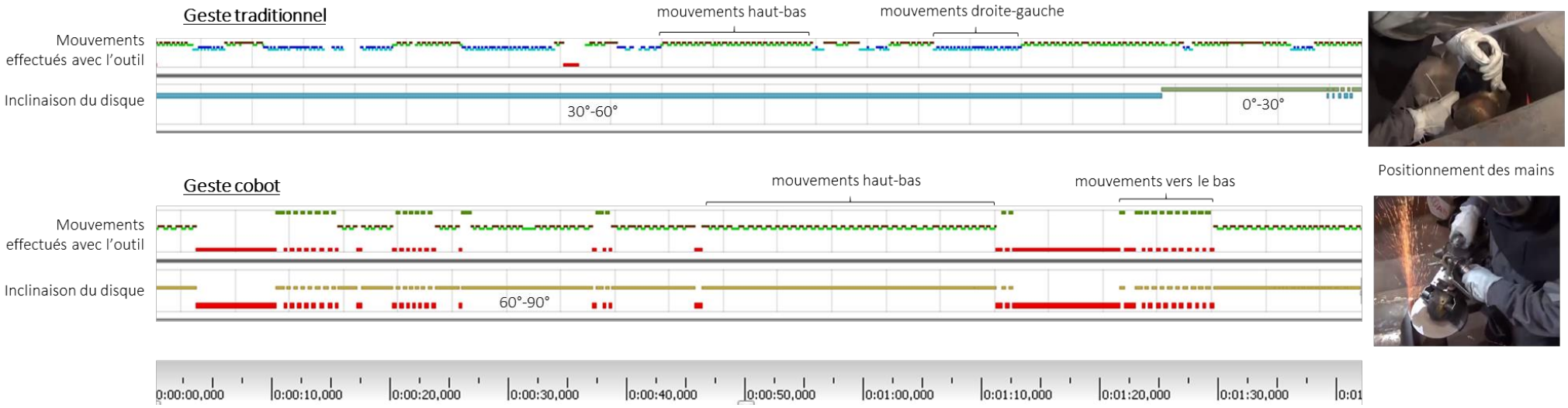


Figure 24 : Exemple de chronique d'activité support de l'entretien d'auto-confrontation individuelle a posteriori

L'ensemble des entretiens précédents ont été retranscrits intégralement. Par ailleurs, les ébarbeurs n'avaient pas tous le même niveau de maîtrise de la langue française. En échangeant régulièrement avec eux, il a été possible de mieux se comprendre à l'aide de schémas, dessins voire mimes. Pour les besoins de retranscription des entretiens, notamment les verbatim insérés dans ce manuscrit, certaines phrases ont pu être remodelées sans en changer le sens. Nous avons par exemple inséré certains mots de liaison pour faciliter la compréhension du verbatim. La forme uniquement a pu être légèrement retouchée mais jamais le fond.

4. Analyse des gestes

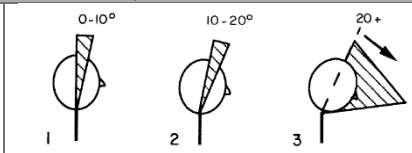
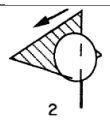
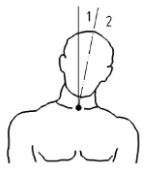
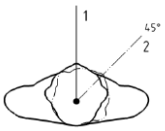
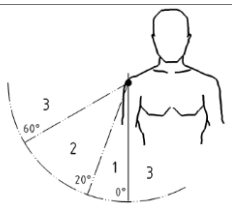
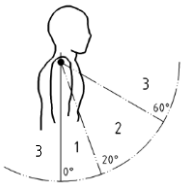
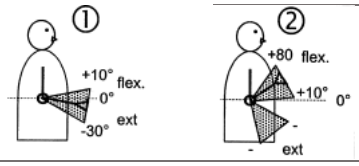
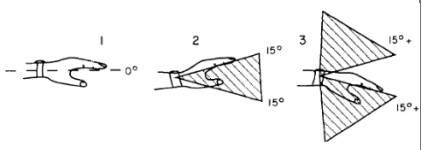
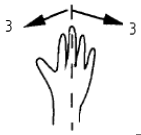
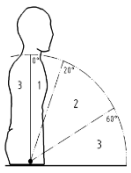
L'analyse des données a été guidée, sans les limiter, par une catégorisation prédéterminée élaborée sur la base du modèle théorique proposé en partie 2 du chapitre 6 (cf. Figure 16). Cependant, l'analyse n'était pas limitée à cette catégorisation et a été menée de façon à laisser la possibilité de préciser les catégories préexistantes et de faire émerger, en fonction des données recueillies, de nouvelles catégories.

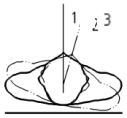
La méthodologie propre à l'analyse de chacune des dimensions du geste puis à leur articulation est présentée dans les parties suivantes.

4.1. Dimension biomécanique

La composante posture adoptée a été analysée en s'appuyant sur la norme européenne NF EN 1005-4 (AFNOR, 2008) ou sur l'outil RULA (McAtamney & Nigel Corlett, 1993) pour déterminer les zones articulaires de confort ou à risque de développement de TMS (cf. Tableau 5).

Tableau 5 : Outil de description des postures selon les zones articulaires de confort et à risque de développement de TMS

Segment	Mouvement	Plan	Description	
Cou	Flexion (0° = la verticale)	Sagittal	(1) 0° à 10° (2) 10° à 20° (3) > 20°	
	Extension (0° = la verticale)		(2) > 0°	
	Flexion latérale (0° = la verticale)	Frontal	(1) 0° à 10° (2) > 10°	
	Torsion (0° = l'horizontale)	Transversal	(1) 0° à 45° (2) > 45°	
Epaule	Abduction	Frontal	(1) 0° à 20° (2) 20° à 60° (3) > 60°	
	Adduction		(3) > 0°	
	Antépulsion	Sagittal	(1) 0° à 20° (2) 20° à 60° (3) > 60°	
	Rétropulsion		(3) > 0°	
Coude (0° = avant-bras à l'horizontale)	Flexion	Sagittal	(1) 0° à 10° (2) 10° à 80°	
	Extension		(1) 0° à 30° (2) 30° à 80°	
Poignet (0° = main dans l'axe de l'avant-bras)	Extension	Sagittal	(1) 0° (2) 0 à 15° (3) > 15°	
	Flexion		(1) 0° (2) 0 à 15° (3) > 15°	
	Abduction	Frontal	(3) > 0°	
	Adduction		(3) > 0°	
Tronc (0° = la verticale)	Flexion	Frontal	(1) 0° à 20° (2) 20° à 60° (3) > 60°	
	Extension		(3) > 0°	

	Flexion latérale	Sagittal	(1) 0° à 10° (3) > 10°	
	Rotation	Transversal	(1) 0° à 10° (3) > 10°	

Notes : (1) zones articulaires acceptables, (2) zones articulaires non recommandées, (3) zones articulaires devant être évitées

L'analyse des postures, réalisée en post-codage des observations filmées (sous le logiciel Captiv™ cf. Annexe 5) a concerné les articulations suivantes : cou, tronc, épaules, coudes et poignets. Ce post codage a permis d'obtenir le pourcentage de temps total passé dans les zones de confort ou à risque de développement de TMS ((1) zones articulaires acceptables, (2) zones articulaires non recommandées, (3) zones articulaires devant être évitées) selon l'articulation analysée. Les moments où l'articulation considérée ne se situait dans aucune de ces zones étaient codés « OFF » : par exemple, lorsque le tronc était codé en 100% du temps en flexion, l'extension était codée OFF. De plus, certaines régions anatomiques n'étaient pas visibles lors des observations du fait de l'architecture des pièces, du positionnement de l'opérateur ou encore de leur EPI : ces moments étaient codés « non visible » lors du post-codage. Dès lors que le pourcentage de temps total passé en « non visible » était supérieur à 90 % les données n'étaient pas considérées. Une analyse descriptive des postures a ensuite été réalisée afin de renseigner l'évolution des postures, articulation par articulation, selon l'opérateur, la surface et l'outil utilisé.

Les composantes effort et vibrations ont été analysées, pour chaque geste, selon l'évaluation estimée par les ébarbeurs sur les EVA de 1 à 7 (Meyer, 2014; Varghese, Saha, & Atreya, 1994) ; pour l'effort global ressenti : 1 = très très faible, 2 = très faible, 3 = faible, 4 = modéré, 5 = un peu dur, 6 = très dur, 7 = très très dur ; pour le niveau de vibrations ressenti : 1 = très très faible, 2 = très faible, 3 = faible, 4 = modéré, 5 = un peu élevé, 6 = très élevé, 7 = très très élevé.

La composante répétitivité a été analysée par un post-codage des vidéos (sous le logiciel Captiv™) visant à identifier chaque changement de direction des mouvements de l'outil de travail (vers la droite, la gauche, le haut, le bas, l'avant, l'arrière) afin de les comptabiliser pour chaque opérateur lors des gestes traditionnels et lors des gestes cobot. Ainsi, la répétitivité a été définie par le nombre moyen de changements de direction de mouvements réalisés avec l'outil de travail par les ébarbeurs en une minute.

Enfin, le contenu de l'ensemble des entretiens a été analysé (sous le logiciel Nvivo™ cf. Annexe 6) afin de rechercher dans le discours des opérateurs la dimension biomécanique des gestes (cf. Tableau 6). Le codage des entretiens a débuté avec une trame de sous-catégories et de sous-sous catégories issus du modèle théorique. Cette trame a, de manière inductive, été enrichie par des éléments émergents (sous-catégories en italique dans le tableau) qui sont présentés dans les résultats.

Tableau 6 : Grille de codage de la dimension biomécanique

Catégorie	Sous-catégorie	Sous-sous catégorie	Description	Exemple de codage
Dimension biomécanique	Effort	Global	Effort global évoqué	« là c'est physique hein ! »
		Poids	Effort lié au port de l'outil	« faut la porter la meule »
		Appui	*Effort à exercer pour appuyer sur l'outil*	*« faut appuyer hein pour retirer de la matière »*
		Maintien	*Effort lié au maintien des poignées de l'outil*	*« il faut toujours appuyer [mime mains fermées sur poignées]. Tu peux pas faire comme tu veux là, t'es obligé d'appuyer [sur les boutons sous les poignées] »*
		Retenue	*Effort en lien avec le fait de retenir le terminal du cobot*	*« j'essaie de le retenir en même temps »*
		Positionnement	*Effort lié au positionnement du terminal du cobot*	*« on est toujours obligé de tirer sur le bras pour revenir même endroit »*
	Vibrations		Vibrations ressenties	« t'as les secousses, t'as toutes les vibrations qui remontent »
	Répétitivité		Changements de direction et d'amplitude de mouvements effectués avec l'outil	« Des fois comme ça [mime mouvement droite-gauche] des fois comme ça [mime mouvement haut-bas] » « là je vais doucement »
	Postures		Postures adoptées	« c'est les épaules qui travaillent tu sens aux épaules. Au début t'es comme ça [épaules en antépulsion] »

4.2. Dimension cognitive

La composante concentration de la dimension cognitive (Sperandio, 1983) a été analysée, pour chaque ébarbeur, selon l'évaluation estimée sur l'EVA de 1 à 7 : 1 = très très faible, 2 = très faible, 3 = faible, 4 = modéré, 5 = un peu élevé, 6 = très élevé, 7 = très très élevé.

L'ensemble des entretiens a ensuite été codé (sous le logiciel Nvivo™) afin d'analyser leur contenu et de recueillir des données sur la dimension cognitive des gestes (cf. Tableau 7). Le codage des entretiens a débuté avec une trame de sous-catégories et de sous-sous catégories issus du modèle théorique. Cette trame a, de manière inductive, été enrichie par des éléments émergents (sous-catégories en italique dans le tableau) qui seront présentés dans les résultats.

Tableau 7 : Grille de codage de la dimension cognitive

Catégorie	Sous-catégorie	Sous-sous catégorie	Description	Exemple de codage
Dimension cognitive	Concentration		Concentration estimée et focalisations de la concentration	« faut que tu sois bien concentré » « en plus t'es concentré parce qu'il faut que ce soit droit »
	Recueil d'informations sensorielles	Visuelles	Informations visuelles nécessaires à la réalisation du geste et possibilité de les recueillir	« [on regarde] Les pavés [défaut], on suit les pavés, on suit les bosses quoi »
		Tactiles	Informations tactiles nécessaires à la réalisation du geste et possibilité de les recueillir	« après tu peux toucher avec la main »
	Traitement d'information et prise de décision	*Mouvements à réaliser*	*Traitement d'information et décisions vis-à-vis des mouvements à réaliser avec l'outil au cours ou a posteriori de la réalisation du geste*	*« Je retire comme ça [mime mouvement haut bas] je suis ça [contour du défaut] […] après je rattrape comme ça [mime mouvement droite gauche], c'est bien droit partout »*
		Rythme de travail	*Traitement d'information et décisions vis-à-vis du rythme de travail au cours ou a posteriori de la réalisation du geste*	*« faut y aller gentiment […] il faut faire tout doucement »*
		Positionnement des mains sur l'outil	*Traitement d'information et décisions prises vis-à-vis du positionnement des mains au cours ou a posteriori de la réalisation du geste*	*« tu peux mieux la manœuvrer […] tu la tiens par le moteur [2 mains sur le manche] »*
		Effort à exercer sur l'outil	*Traitement d'information et décisions prises vis-à-vis de l'effort à exercer sur l'outil au cours ou a posteriori de la réalisation du geste*	*« Là faut que t'appuies là pour avoir…[…] la matière »*
		Qualité à atteindre	*Traitement d'information et décisions prises vis-à-vis de la qualité à atteindre au cours ou a posteriori de la réalisation du geste*	*« c'est pas propre […] faut repasser à la main derrière »*
		Architecture du bras du cobot	*Traitement d'information et décisions prises vis-à-vis de l'architecture du bras du cobot au cours ou a posteriori de la réalisation du geste*	*« si le bras est un peu tordu, ça va repartir un peu en biais donc il faut le ramener »*

4.3. Dimension psycho-sociale

Le sens donné au geste par l'individu est constitué de la qualité obtenue perçue, de la protection de soi perçue, des empêchements, des émotions ressenties et de la reconnaissance du geste pour l'individu vis-à-vis d'autrui (collègues et hiérarchie).

La composante qualité perçue a été analysée, pour chacun des gestes, selon l'évaluation estimée par les ébarbeurs sur l'EVA de 1 à 7 : 1 = très très peu satisfaisante, 2 = très peu satisfaisante, 3 = peu satisfaisante, 4 = modéré, 5 = un peu satisfaisante, 6 = très satisfaisante, 7 = très très satisfaisante. Pour recueillir les émotions ressenties, une échelle de 1 à 7 a également été utilisée (Van De Weerdt, 2003) : 1 = très très négative, 2 = très négative, 3 = un peu négative, 4 = émotion neutre, 5 = positive, 6 = très positive, 7 = très très positive.

Les entretiens ont été post-codés (sous le logiciel Nvivo™) afin d'analyser leur contenu et de recueillir des données sur l'ensemble des composantes de la dimension psycho-sociale (cf. Tableau 8) : qualité du travail, protection de soi, empêchement, émotions et reconnaissance du geste. La grille de codage a été enrichie d'éléments émergents (sous-catégories en italique dans le tableau) qui seront présentés dans les résultats.

Tableau 8 : Grille de codage de la dimension psycho-sociale

Catégorie	Sous-catégorie	Sous-sous catégorie	Description	Exemple de codage
Dimension psycho-sociale	Qualité du travail		Qualité du travail obtenue et critères de qualité	« y a encore des crans […] c'est pas bien plat ! » « Quand y'a pas de bosse »
	Protection de soi	*Se soulager des douleurs*	*Pouvoir agir pour se soulager des douleurs ressenties*	*« Faut que je les [mains] bouge, que je les tourne, […] parce que tu sais, j'ai mal là »*
		Eviter postures contraignantes	*Pouvoir agir pour éviter d'adopter des postures qu'ils jugent contraignantes*	*« Faut mieux être assis ça fait moins d'effort pour le dos quoi »*
		Eviter accident	*Pouvoir agir pour éviter la survenue d'accident*	*« le disque il peut péter et partir en lambeaux ! […] tu dois bien les sentir quand ils viennent sur ton corps »*
	Empêchement		Empêchement évoqué	« t'es empêché complètement et le cobot on peut pas le mettre à l'envers complétement tu vois on peut pas le mettre comme ça [<30°] tu vois là c'est impossible »
	Emotions		Emotions ressenties et type d'émotions	« Moi, quand je travaille avec ça [cobot], j'ai peur… »
	Reconnaissance du geste		Reconnaissance du geste perçue par les ébarbeurs vis-à-vis des collègues et de la hiérarchie	« Quand le chef il passe, peut être qu'il dit rien mais il se dit « Oh il a bien avancé » par exemple, il peut penser ça et moi je suis content ! »

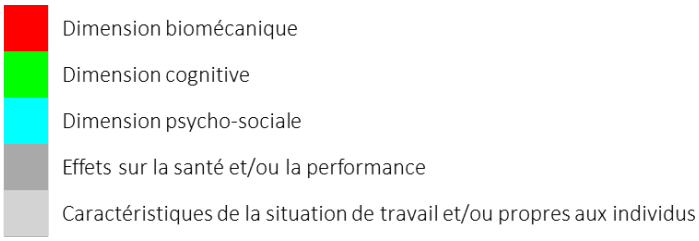
4.4. Articulation des dimensions

Après avoir codé et analysé chacune des dimensions biomécanique, cognitive et psycho-sociale du geste, l'objectif était de les articuler et de mettre en évidence les évolutions entre les gestes traditionnels et les gestes cobot. L'ensemble des entretiens ayant été codé, une analyse de leur contenu (logiciel NVivo™) a, dans un premier temps, mis en évidence l'articulation des dimensions au sein des gestes. Une fois l'analyse de l'articulation des dimensions des gestes réalisée au sein de chaque geste, la mise en évidence des similitudes et des divergences a permis de comprendre l'évolution de l'articulation des dimensions entre les gestes traditionnels et les gestes cobot. De plus, les caractéristiques de la situation de travail et/ou propres aux individus ainsi que les effets sur la santé et/ou la performance en lien avec l'évolution de l'articulation des dimensions analysée ont également été codés afin de les identifier.

Voici un exemple d'analyse du contenu des entretiens :

Geste traditionnel de meulage d'une surface verticale :

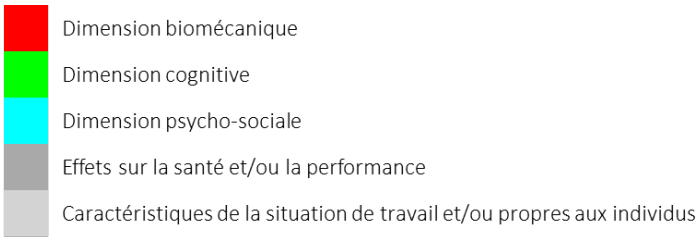
Légende :



« Clara – c'est la zone la plus compliquée à faire ? E7 – Ouais la plus casse pied […] là c'est physique hein ! *(effort global)* […] Y'a que tu portes et pis là faut que t'appuies là pour avoir… Bah t'as bien vu hein ? On en a enlevé de la matière là. *(effort d'appui)* […] en fait le début est dur parce que c'est épais comme ça [montre épaisseur entre ses doigts] et après quand tu veux rattraper tu colles la meule. Tu bloques ta meule. Regarde comme ça [prend la meuleuse en main]. Je la mets pas en route t'inquiète. Tu bloques ta meule comme ça [mouvement de haut en bas] ! *(TTT et décision)* Parce que euh…au début c'est les épaules qui travaillent tu sens aux épaules. Au début t'es comme ça [épaules en antépulsion] *(posture)* parce qu'il faut que tu forces pour meuler l'épaisseur mais sinon tu la maintiens. *(effort)* Après je te dis c'est les positions ! Tu t'aides ! Tu fais le mouvement quoi. *(protection de soi)* […] Clara – Là tu sens que t'es mieux au niveau du dos ? E7 – Ah bah oui, moi c'est ce qui compte en premier hein, j'ai pas envie de rentrer le soir et d'avoir mal au dos, non non. […] c'est la santé avant hein. Tu fais notre boulot, tu fais ton boulot mais tu te protèges aussi quoi.[…] pis même tu sais il peut t'arriver une connerie quand même hein. Tu sais t'as beau tenir, la meule elle peut partir. Y'a toujours danger ! *(protection de soi)* Faut toujours être concentré […] en plus t'es concentré parce qu'il faut que ce soit droit *(concentration)* […] d'abord faut casser, euh, la forme du pavé [le défaut sur la surface] pour rattraper l'épaisseur, pour être droit tu vois ? T'as le pavé qui est comme ça, qui est carré et t'as les bordures qui dépassent *(informations visuelles)* […] je rattrape et après je tourne la meule t'as vu. Tu vois là [mime mouvements haut-bas] je suis en train de casser l'épaisseur qu'y a et après je rattrape [mouvements droite-gauche] pour que ce soit droit […] *(TTT et décision)* […] Clara – Pour enlever la grosse épaisseur tu fais des mouvements de droite à gauche et haut bas *(répétitivité)* les deux ? E7 – Voilà, pour que ce soit parallèle quoi […] pour que ce soit droit. *(TTT et décision)* Parce que y'a des perçages normalement ici [SV] *(caractéristiques surface)* et euh…il faut que ce soit, pour l'assemblage, faut que ce soit droit, impeccable parce que c'est pour l'assemblage quand ils vont mettre euh…parce que c'est usiné jusqu'ici normalement et après j'ai un perçage *(qualité perçue)* ! Clara – Pour rassembler la couronne ? E7 – Oui parce que c'est pas usiné tout, voilà ici là c'est usiné et là c'est percé là pour les attacher *(caractéristiques surface)* […] Clara – Et t'aurais pu faire que des mouvements haut-bas ? E7 – Non, non. Clara – Qu'est-ce qui se passe si tu fais que des mouvements haut-bas ? E7 – Oh bah tu peux pas, c'est pas droit ! Bah sinon tu fais ça hein [mime des vagues avec sa main] ! Tu rattrapes pas droit. *(TTT et décision)* Il faut que ce soit droit, impeccable! *(qualité perçue)* C'est vrai que quand tu suis ça [chronique d'activité] c'est vrai que ça fait bizarre [rire] c'est une habitude de travail ! Moi j'ai une habitude de travail…ouais c'est une habitude [rire]. Ouais c'est un réflexe, c'est un travail. *(ancienneté)* […] Clara – Tu as des douleurs en faisant ça ? E7 – Bah si tu veux on les sent quand même mais comme j'ai l'habitude si tu veux j'y pense pas… Mais j'ai quand même la douleur hein je te le dis tout de suite ! *(douleurs)* »

Geste cobot de meulage d'une surface verticale :

Légende :



« E7 – T'as intérêt à être concentré là, t'as intérêt, parce que si tu rentres dedans tu peux creuser aussi et même faut faire gaffe parce que tu peux péter le disque tu peux… *(concentration)* […] surtout sur les trucs comme ça [surface verticale] *(caractéristique surface)* surtout quand tu meules comme ça, le disque il peut péter et partir en lambeau ! *(TTT info)* […] tu dois bien les sentir quand ils viennent sur ton corps *(protection de soi)*! Clara – Donc là il faut faire attention à pas casser le disque ? E7– Oui, surtout à pas forcer et en plus quand tu pousses avec la meule ça peut arriver si tu forces comme un…idiot *(effort de retenue)* On peut rentrer dans la pièce je te dis c'est dangereux hein *(émotion)*! Regarde là je meule comme ça *(posture)* [montre l'écran] j'essaie de le retenir en même temps *(effort de retenue)*. Parce que tu le lâches là, il te rentre dedans hein *(TTT info)*! Là je tiens à deux mains, t'as vu là [rire], là je tiens là ! *(effort de retenue)* ! Et pis t'as bien vu là je vais doucement *(répétitivité)* sinon tu rentres dedans, tu coupes la pièce […] Bah oui celui qui a pas l'habitude, il rentre dans la pièce hein… *(TTT info)* Clara – Parce que tu sens que tu as plus de puissance là ? E7 – Oh bah attends la meule là alors là je vais te dire.. *(caractéristiques cobot)* […] Clara – Tu risquais de rentrer dans la pièce c'est ça ? E7 – Ouais c'est dangereux *(émotion)* là bah je t'ai dit surtout avec le cobot, tu fais pas gaffe : tu niques la pièce tout de suite hein, ça coupe vite fait […] Faut faire gaffe quand même, *(concentration)* faut se méfier hein *(émotion)*. Clara – Plus avec le cobot qu'à la main ? E7 – Ouais bah oui le cobot il est…si si faut faire gaffe *(concentration)* Si tu veux là [inclinaison 60-90] avec le cobot c'est super bien pour faire ça *(TTT info)*. Clara – Ah oui ? E7 – Ah oui oui ! Moi j'aime bien […] là je sais que ça m'aiderait bien tu vois, là je sais que ça m'avancerait bien le boulot *(émotion) […]* Clara – pas besoin de repasser à la main après ? E7 – Si si […] Parce que là j'ai simplement enlevé ça les trucs comme ça *(TTT info)* [épaisseur du défaut] mais après sinon à la main *(décision)*… bah tu peux pas le faire avec celle meule là *(empêchement)* [cobot].. Là c'est pour dégrossir, impeccable *(qualité perçue)* et après tu finis à la main *(décision)* Clara – Parce que là en fait il manque une étape où tu lisses l'ensemble non ? Ebarbeur 7 – Voilà […] là t'es empêché complètement et le cobot on peut pas le mettre à l'envers complétement tu vois on peut pas le mettre comme ça [<30°] tu vois là c'est impossible il va bloquer là *(empêchement)*. […] Cette partie-là [surface verticale] *(caractéristique surface)* tu peux faire que comme ça [haut en bas disque perpendiculaire] *(caractéristiques cobot)* tu peux pas euh…tu peux pas tourner la meule regarde *(empêchement)* [essaie de tourner le terminal] tu peux pas faire comme avec la meule c'est pour ça que je te disais sur la meule à main on la retourne à l'envers [0°-30°] pour descendre [égaliser la surface] *(TTT info) […]* Clara – Et tu aurais pu faire des mouvements droite gauche avec le cobot ? Ebarbeur 7 – Hum…non pas là […] faut tourner carrément la meule et nan nan, c'est ça le problème c'est pas la meule elle-même c'est le bras *(empêchement)*, tu sais parce que tu vas lâcher [la pression sur les boutons des poignées du terminal] au bout d'un moment quand t'es carrément tourner comme ça… *(effort de maintien)* […] Fin ça dépend…à l'extérieur d'une pièce oui mais là-dedans *(caractéristique pièce)* non tu peux pas *(empêchement)* parce que déjà t'as pas de place *(caractéristique pièce)* et tu sais je t'avais déjà dit, une fois il m'a décollé hein ! Il a failli m'arracher le bras, tu peux demander à E4, E4 il a eu le coup hein ! *(expérience presque accident)* Clara – T'as un peu d'appréhension quand tu travailles avec ? E7 – Ouais au début non mais après quand il déconnait je me méfiais quand même *(émotions)*. »

« Clara – D'accord et pour la qualité ? E7 – Bah il faut repasser *(décision)* [touche] *(informations tactiles)* Oh ! Y'a des crans ! Faut repasser un peu *(qualité perçue)*, faut repasser comme ça [droite gauche disque parallèle] pour… *(TTT info)* Clara – Pour lisser l'ensemble. »

« Clara – Et là au niveau des douleurs ? E7 – C'est ça tout l'avant bras [touche du poignet jusqu'au coude] tu le sens…c'est parce que à ce niveau là [poignée] *(douleurs)* t'es obligé d'appuyer tout le temps là… *(effort de maintien)* donc t'as les nerfs euh…t'as le…[touche poignet] j'allais dire le carpien, parce que je me suis fait opéré du carpien c'est pour ça que moi j'ai du mal. *(état de santé)* Mais euh…t'es toujours en…en appui si tu préfères donc bon voilà quoi. *(effort de maintien)* »

Synthèse et conclusion du chapitre 7

Pour comprendre l'évolution de l'articulation des dimensions entre les gestes traditionnels et les gestes cobot, nous nous sommes appuyés sur une méthodologie semi-déductive. Le recueil et l'analyse des données ont été guidés, sans les limiter, par des catégories du modèle théorique et les données issues du terrain ont fait émerger des éléments enrichissants nos présupposés théoriques et l'analyse et l'interprétation des données. Cette étude a porté sur 5 ébarbeurs volontaires. Leurs caractéristiques individuelles ont été renseignées à partir d'entretiens semi-directifs. Une analyse à partir d'observations ouvertes et d'entretiens semi-directifs portant sur l'activité de meulage avec et sans usage du cobot a permis d'identifier les gestes de meulage de surfaces verticales et de surfaces horizontales à analyser. Les données sur les gestes ont été recueillies au travers de différentes méthodes complémentaires et itératives : des observations systématiques, des entretiens au poste de travail, des échelles visuelles analogiques, des entretiens d'auto-confrontation individuelle consécutifs aux observations et des entretiens d'auto-confrontation individuelle a posteriori. Les gestes traditionnels et avec usage du cobot ont fait l'objet d'une analyse à partir de ces différents modes de recueil et d'un codage des données recueillies. Ce codage visait tout d'abord à analyser le contenu de l'ensemble des entretiens afin de comprendre l'évolution de chacune des dimensions des gestes. Les analyses de l'évolution des dimensions biomécanique, cognitive et psycho-sociale des gestes ont ensuite été regroupées pour analyser l'évolution de l'articulation des dimensions avec et sans usage du cobot.

Partie 3 : Résultats

La thèse défendue dans ce travail soutient que l'usage du cobot a des conséquences sur l'articulation de l'ensemble des dimensions du geste professionnel. L'analyse de l'évolution du geste professionnel est nécessaire pour comprendre les effets de l'usage du cobot et identifier les caractéristiques de la situation de travail à transformer dans une perspective de prévention des TMS.

Afin de mieux comprendre l'évolution de l'articulation des dimensions, le premier chapitre (chapitre 8) des résultats porte sur l'analyse descriptive de l'évolution des modes opératoires. Le chapitre 9 décrit ensuite l'évolution de chacune des dimensions biomécanique, cognitive et psychosociale des gestes. Ces dernières, prises indépendamment les unes des autres, sont décomposées selon les composantes évoquées dans le modèle théorique sur lequel s'appuie cette thèse (cf. figure 16). Ces composantes sont ensuite analysées dans le chapitre 10 au sein des gestes professionnels, c'est-à-dire articulées entre elles. Il se compose de trois parties ; chacune d'elles présente un exemple d'articulation en partant de l'une des dimensions au sein des gestes. Ces trois exemples ont été choisis au regard de la problématique et pour leur pertinence du point de vue de la prévention des TMS. Les effets sur l'individu et sur la performance sont exposés. Les caractéristiques de la situation de travail et des opérateurs expliquant l'évolution des gestes sont également décrits au fil de l'analyse. Des synthèses à la fin de ces trois parties sont proposées.

Enfin une synthèse globale des résultats reprend le modèle théorique de cette thèse. Ce dernier sera précisé selon les évolutions mises en évidence et en récapitulant les caractéristiques de la situation de travail et les caractéristiques propres aux individus mises en exergue par l'analyse des gestes.

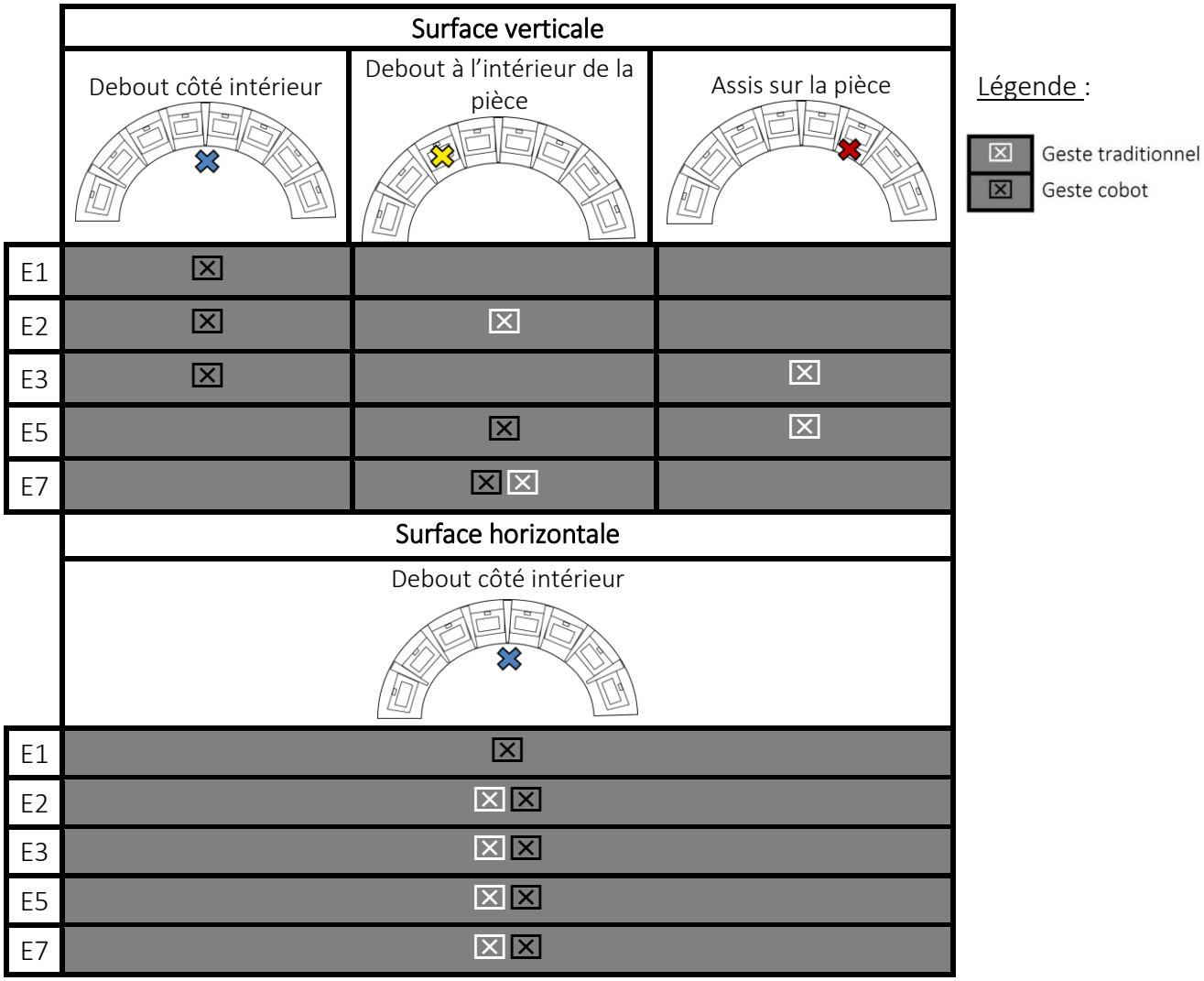
Chapitre 8 : Analyse descriptive de l'évolution des modes opératoires

Cette partie décrit les modes opératoires élaborés par les ébarbeurs lors des gestes traditionnels et lors des gestes cobot : la position du corps entier de l'opérateur par rapport à la pièce, la position des mains sur l'outil, l'orientation de la meuleuse par rapport à l'opérateur, l'inclinaison du disque par rapport à la surface et les mouvements réalisés avec l'outil de travail.

1. Position de l'opérateur par rapport à la pièce

Lors du geste traditionnel de meulage d'une surface verticale (SV), il a été observé que deux ébarbeurs (E2 et E7) se positionnent debout à l'intérieur de la pièce et deux autres (E3 et E5) sont assis sur la pièce pour réaliser le geste (cf. Tableau 9). Lors du geste cobot de meulage d'une SV, trois ébarbeurs (E1, E2 et E3) se placent debout côté intérieur de la pièce et deux autres (E5 et E7) se positionnent debout à l'intérieur de la pièce. Ainsi, trois ébarbeurs (E2, E3 et E5) modifient leur positionnement avec l'usage du cobot et un ébarbeur (E7) garde le même positionnement. Pour le meulage d'une surface horizontale (SH), que ce soit lors du geste traditionnel ou lors du geste cobot, l'ensemble des ébarbeurs se positionne debout côté intérieur de la pièce (cf. Tableau 9).

Tableau 9 : Position de l'opérateur par rapport à la pièce



2. Position des mains sur l'outil de travail

Lors du geste traditionnel de meulage d'une SV, il a été observé que deux ébarbeurs (E2 et E3) positionnent leurs mains sur l'outil soit avec la main droite sur le manche et la main gauche sur la poignée auxiliaire soit avec les deux mains sur le manche (cf. Tableau 10). Un ébarbeur (E7) garde la main droite sur le manche et la main gauche sur la poignée auxiliaire durant son geste, tandis qu'un autre (E5) place ses deux mains sur le manche durant la totalité de son geste traditionnel. Lors du geste cobot de meulage d'une SV, l'ensemble des ébarbeurs place une main sur chaque poignée du terminal du cobot. De plus, lors du meulage d'une SH, que ce soit lors du geste traditionnel ou lors du geste cobot, l'ensemble des opérateurs positionne la main droite sur le manche et la main gauche sur la poignée auxiliaire.

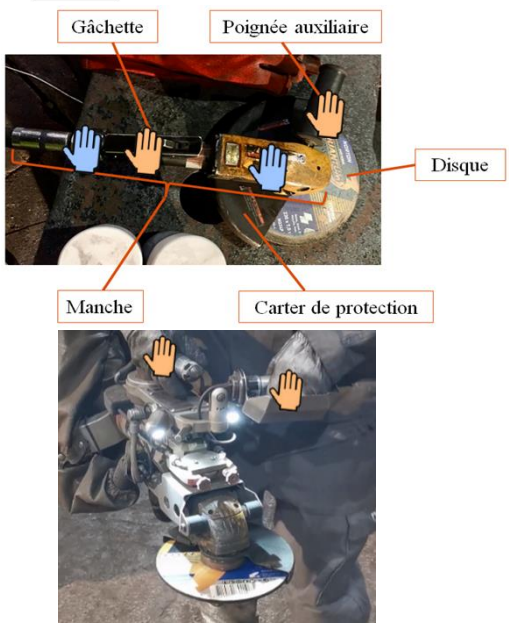
Tableau 10 : Position des mains sur l'outil de travail

	Surface verticale	
	Main droite sur le manche Main gauche sur la poignée auxiliaire	Deux mains sur le manche
E1	☒	
E2	☒ ☒	☒
E3	☒ ☒	☒
E5	☒	☒
E7	☒ ☒	☒
	Surface horizontale	
	Main droite sur le manche Main gauche sur la poignée auxiliaire	Deux mains sur le manche
E1	☒	
E2	☒ ☒	
E3	☒ ☒	
E5	☒ ☒	
E7	☒ ☒	

Légende :

☒ Geste traditionnel

☒ Geste cobot



Une main sur la poignée auxiliaire et une main sur le manche

Deux mains sur le manche

3. Orientation de la meuleuse par rapport à l'opérateur

Lors du geste traditionnel de meulage d'une SV, les ébarbeurs orientent la meuleuse « côté disque » ou « côté carter de protection » par rapport à eux et ils l'orientent uniquement « côté carter de protection » lors du meulage d'une SH (cf. Tableau 11). Lors du geste cobot, que ce soit de meulage d'une SV ou d'une SH, il a été observé que la meuleuse est orientée « côté carter de protection » par rapport aux opérateurs.

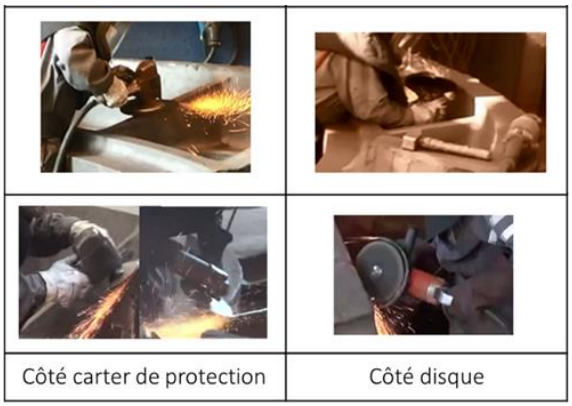
Tableau 11 : Orientation de la meuleuse par rapport à l'opérateur

	Surface verticale	
	Côté carter de protection	Côté disque
E1	☒	
E2	☒ ☒	☒
E3	☒ ☒	☒
E5	☒ ☒	☒
E7	☒ ☒	
	Surface horizontale	
	Côté carter de protection	Côté disque
E1	☒	
E2	☒ ☒	
E3	☒ ☒	
E5	☒ ☒	
E7	☒ ☒	

Légende :

☒ Geste traditionnel

☒ Geste cobot



4. Inclinaison du disque par rapport à la surface

Lors du geste traditionnel de meulage d'une SV, il a été observé que les ébarbeurs alternent des inclinaisons du disque entre 0° et 90° par rapport à la surface (cf. Tableau 12). Lors du geste cobot de meulage d'une SV, l'inclinaison du disque se situe entre 30° et 90° par rapport à la surface. Ainsi, deux ébarbeurs (E2 et E3) inclinent le disque entre 60° et 90° lors de l'usage du cobot tandis que lors du geste traditionnel l'inclinaison du disque varie entre 0° et 90°. De même, deux autres ébarbeurs (E5 et E7) inclinent le disque entre 30° et 90° lors du geste cobot, tandis que lors du geste traditionnel, le disque est incliné entre 0° et 90°. Lors du geste traditionnel de meulage d'une SH, le disque de la meuleuse est incliné entre 0° et 60° par rapport à la surface (cf. Tableau 12). Lors du geste cobot de meulage d'une SH, les ébarbeurs inclinent le disque entre 0° et 30° par rapport à la surface meulée. Ainsi trois ébarbeurs (E2, E5 et E7) inclinent le disque entre 0° et 30° lors du geste cobot tandis qu'ils l'inclinent entre 0° et 60° lors du geste traditionnel.

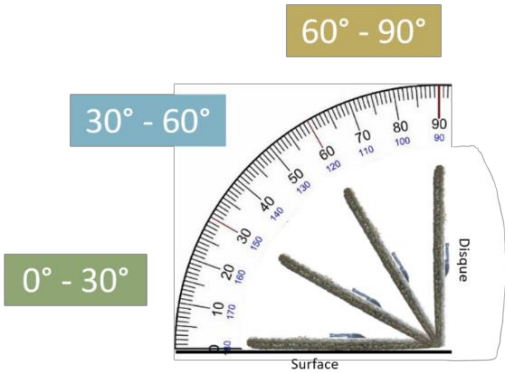
Tableau 12 : Inclinaison du disque par rapport à la surface

	Surface verticale		
	0°-30°	30°-60°	60°-90°
E1		☒	☒
E2	☒	☒	☒☒
E3	☒	☒	☒☒
E5	☒	☒☒	☒☒
E7	☒	☒☒	☒☒
	Surface horizontale		
	0°-30°	30°-60°	60°-90°
E1	☒		
E2	☒☒	☒	
E3	☒☒		
E5	☒☒	☒	
E7	☒☒	☒	

Légende :

☒ Geste traditionnel

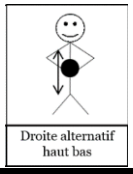
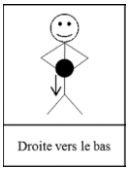
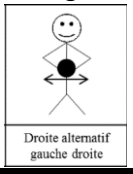
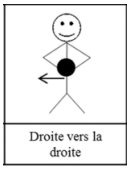
☒ Geste cobot



5. Mouvements réalisés avec l'outil de travail

Lors du geste traditionnel de meulage d'une SV, les ébarbeurs effectuent des mouvements alternatifs dans des directions différentes (haut-bas et droite-gauche) (cf. Tableau 13). Lors du geste cobot de meulage d'une SV, les mouvements avec l'outil sont à la fois réalisés dans une direction unique (vers le bas, vers la droite) et dans des directions alternatives (haut-bas et droite-gauche). Ainsi, quatre ébarbeurs (E2, E3, E5 et E7) réalisent des mouvements alternatifs (haut-bas et droite-gauche) lors du geste traditionnel alors qu'ils réalisent des mouvements dans une direction unique (vers le bas ou vers la droite) lors du geste cobot. Au cours du geste traditionnel de meulage d'une SH, les ébarbeurs réalisent des mouvements d'amplitudes différentes avec la meuleuse alors que, lors du geste cobot, les mouvements réalisés sont d'amplitude constante (cf. Tableau 13).

Tableau 13 : Mouvements réalisés avec l'outil de travail

	Surface verticale			
	Alternatif haut-bas 	Vers le bas 	Alternatif droite-gauche 	Vers la droite 
E1			☒	☒
E2	☒		☒ ☒	☒
E3	☒ ☒	☒	☒	
E5	☒ ☒	☒	☒	
E7	☒ ☒	☒	☒	

	Surface horizontale	
	Mouvements d'amplitudes différentes	Mouvements d'amplitudes constantes
E1		☒
E2	☒	☒
E3	☒	☒
E5	☒	☒
E7	☒	☒

Légende :

☒ Geste traditionnel

☒ Geste cobot

Synthèse

Cette première partie a décrit les modes opératoires élaborés par les ébarbeurs lors des gestes traditionnels et lors des gestes cobot. Il s'avère que le positionnement de l'opérateur par rapport à la pièce diffère pour trois ébarbeurs lors du meulage d'une SV avec l'usage du cobot mais reste identique pour le meulage d'une SH. De plus, le positionnement des mains sur l'outil varie également pour le geste de meulage d'une SV. Lors de l'usage du cobot, les ébarbeurs ne positionnent plus leurs deux mains sur le manche de l'outil contrairement au geste traditionnel. De même, pour l'orientation de la meuleuse par rapport à l'opérateur, lors du geste cobot de meulage d'une SV l'orientation « côté disque » n'a pas été observée. L'inclinaison du disque par rapport à la surface évolue aussi avec l'usage du cobot : elle se révèle plus limitée et est comprise entre 30° et 90° tandis que le disque est incliné entre 0° et 90° lors du geste traditionnel. Enfin les mouvements réalisés avec l'outil se modifient également : il a été observé que les ébarbeurs réalisent des mouvements dans une direction unique lors du geste cobot de meulage d'une SV.

Chapitre 9 : Évolution des dimensions du geste professionnel

1. Évolution des composantes de la dimension biomécanique

Cette partie présente l'évolution de la dimension biomécanique entre les gestes traditionnels et les gestes cobot. Il est question de l'évolution de l'effort global ressenti, du niveau de vibration ressenti, de la répétitivité et des postures adoptées entre les gestes traditionnels et les gestes cobot.

1.1 Évolution de l'effort global ressenti

De manière générale, l'effort perçu par les ébarbeurs est plus élevé lors des gestes traditionnels. En effet ils estiment ressentir des efforts modérés à très très durs (en moyenne de 4,5±2,1 à 6,5±0,6) lors des gestes traditionnels tandis qu'ils ressentent des efforts faibles à un peu durs (de 3±1,6 à 5±1,4) lors des gestes cobot (cf. Figure 25). Toutefois, cette différence au niveau de l'effort global ressenti reste faible entre les gestes traditionnels et les gestes cobot (nous reviendrons sur ce que l'articulation des dimensions nous permet de comprendre de ces résultats dans la partie 1 du chapitre 10).

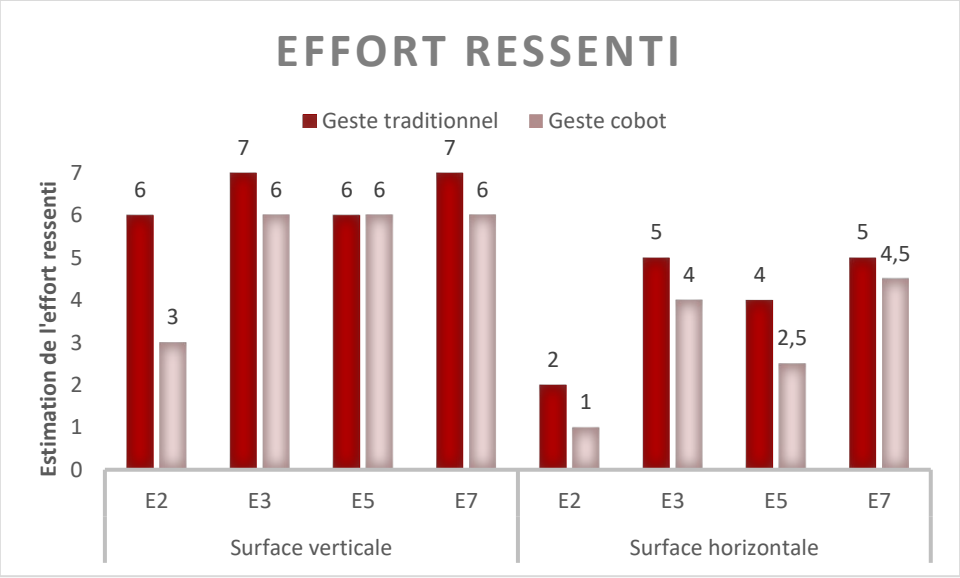


Figure 25 : Estimation de l'effort ressenti par les ébarbeurs (E) selon le geste réalisé (traditionnel vs cobot) et la surface travaillée (verticale et horizontale)

Lors du geste traditionnel de meulage d'une SV, tous les ébarbeurs s'accordent sur le fait que cette surface est la plus compliquée à meuler du point de vue de l'effort : *« E7 - c'est la plus casse pied […] là c'est physique hein ! »* (extrait d'entretiens). En effet, cette surface étant verticale, les ébarbeurs doivent maintenir la meuleuse à hauteur pour lutter contre la gravité et exercer un effort d'appui suivant une direction perpendiculaire à la direction de la force gravitationnelle pour meuler le surplus de matière de cette surface (cf. Figure 26).

Figure 26 : Ébarbeur meulant une surface verticale lors du geste traditionnel

À l'inverse, la surface horizontale est considérée par l'ensemble des ébarbeurs comme la plus simple à meuler du point de vue de l'effort : *«* E3 – *quand tu meules où c'est à plat [SH], c'est toujours plus facile. »* (extrait d'entretiens). En effet, cette surface étant horizontale, la meuleuse est en appui sur la surface et ils n'ont pas à la maintenir en hauteur comme pour la surface verticale (cf. Figure 27). L'effort de port de l'outil diminue ainsi que l'effort d'appui à exercer sur la meuleuse car ils utilisent le poids de la meuleuse : *«* E3 – *Je la laisse dessus [la meuleuse] T'as vu ? […] C'est pour ça qu'y a moins d'effort à mettre que là [montre SV] parce que je la laisse dessus, je laisse la meule et euh…c'est lourd [la meuleuse] donc hop ça part tout seul ! », «* E5 – *Comme on pose la meule, on a seulement qu'à pousser quoi pas besoin de la tenir, de la maintenir en hauteur. On a seulement qu'à pousser quoi […] y'a quand même moins d'effort à donner.* Clara – *Parce que tu la portes pas ?* E5 – *Bah non là on la laisse glisser c'est tout. »* (extraits d'entretiens).

Figure 27 : Ébarbeur meulant une surface horizontale lors du geste traditionnel

Lors du geste cobot de meulage d'une SV, les ébarbeurs n'ont plus le poids de l'outil à porter – l'effort lié au port de l'outil est diminué car le poids est pris en charge par le cobot – et ils ont moins d'effort à exercer sur l'outil – le cobot amplifie l'effort exercé par le travailleur : « E5 – *c'est sûr qu'on a peut-être moins d'efforts à appuyer* », « E1 – *avec le cobot c'est lui [qui porte]* », « E2 – *Moins lourd oui […] avec le cobot t'as pas à porter* » (extraits d'entretiens). De plus, les ébarbeurs estiment ressentir moins d'effort global lors du geste cobot de meulage d'une SH que d'une SV (cf. Figure 28).

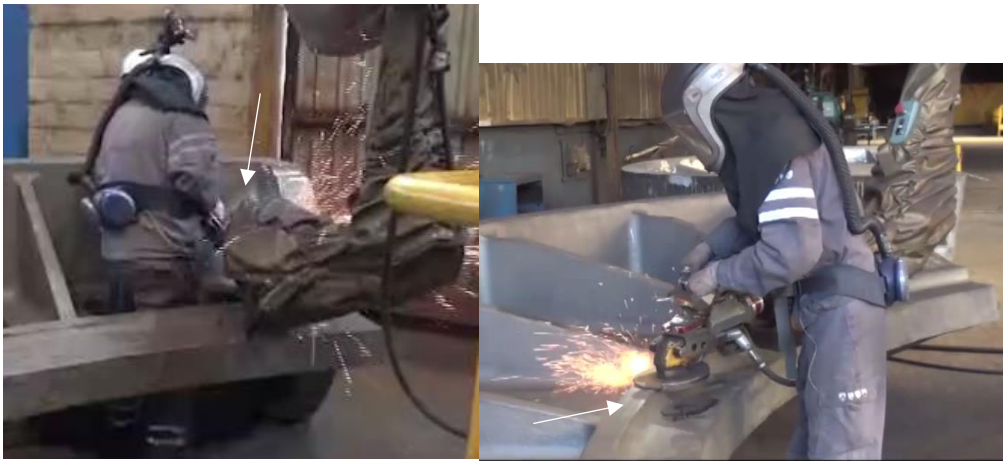


Figure 28 : Ébarbeur meulant une surface verticale (à gauche) et horizontale (à droite) lors du geste cobot

1.2 Évolution des vibrations ressenties lors de l'usage du cobot

Concernant le niveau de vibrations ressenties, les ébarbeurs estiment ressentir plus de vibrations lors des gestes traditionnels. En effet, le niveau de vibrations ressenti est estimé comme un peu élevé à très élevé (en moyenne de 5,5±1,7 à 6±0) tandis que lors des gestes cobot, les ébarbeurs l'estiment de très faible à modéré (de 2,1±0,9 à 4,1±2,5) (cf. Figure 29). Le terminal du cobot est en effet doté d'un système antivibratoire expliquant cette diminution des vibrations ressenties.

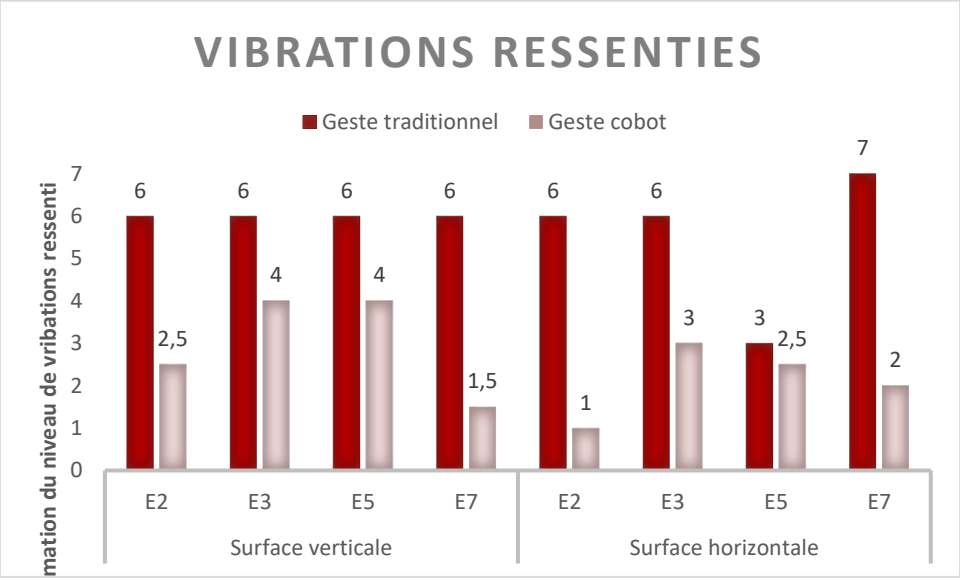


Figure 29 : Estimation des vibrations ressenties par les ébarbeurs (E) selon le geste réalisé (traditionnel vs cobot) et la surface travaillée (verticale et horizontale)

1.3 Évolution de la répétitivité des mouvements effectués par les ébarbeurs

La répétitivité – définie par le nombre moyen de changements de direction des mouvements réalisés avec l'outil de travail par les ébarbeurs en une minute – diminue lors des gestes cobot quel que soit le type de surface meulée. En effet, lors du geste traditionnel de meulage d'une SV, ils réalisent 235,75±6,1 mouvements tandis qu'ils effectuent 85,4±65,6 mouvements lors du geste cobot. Pour la SH, ils effectuent 177±62,9 mouvements lors du geste traditionnel et 56,2±24,5 mouvements lors du geste cobot (cf. Figure 30). De plus, il a été

observé que les ébarbeurs réalisent davantage de mouvements pour meuler la SV. Il y a ainsi plus de répétitivité lors du meulage de cette surface quel que soit le geste analysé.

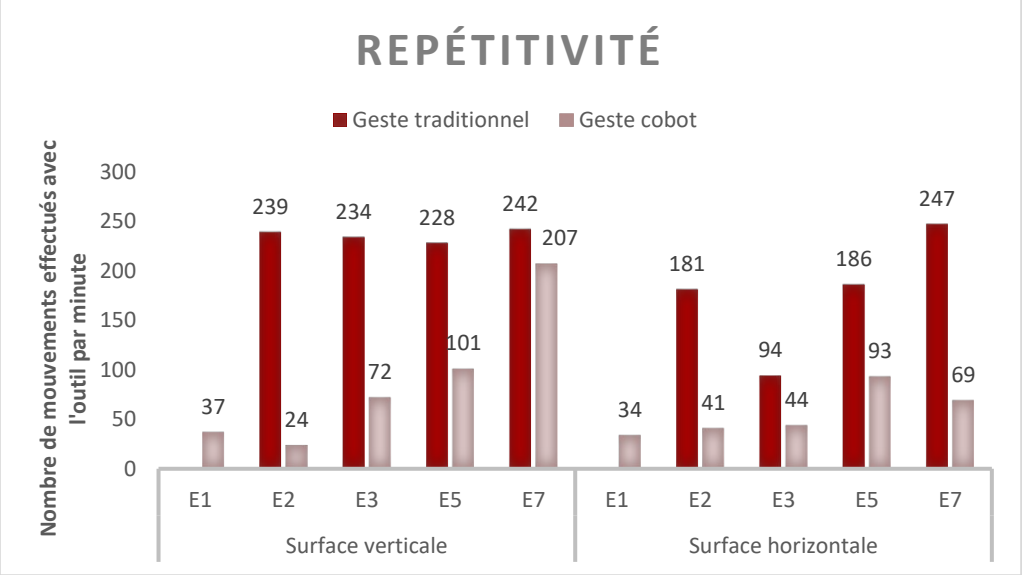


Figure 30 : Répétitivité des mouvements effectués par les ébarbeurs (E) avec l'outil de travail par minute selon le geste réalisé (traditionnel vs cobot) et la surface travaillée (verticale et horizontale)

De plus, on observe également que la direction et l'amplitude des mouvements (cf. partie 1.5 du chapitre 8) varient entre les gestes traditionnels et les gestes cobot (cf. Tableau 14).

Tableau 14 : Directions et amplitudes des mouvements réalisés lors des gestes traditionnels et lors des gestes cobot

<table>
<tr><td></td><td colspan="2">SURFACE VERTICALE</td></tr>
<tr><td></td><td>Geste traditionnel</td><td>Geste cobot</td></tr>
<tr><td>E2</td><td rowspan="4">Alternance de mouvements haut bas et droite gauche</td><td>Alternance de mouvements vers la droite et droite gauche</td></tr>
<tr><td>E3</td><td rowspan="3">Alternance de mouvements vers le bas et haut bas</td></tr>
<tr><td>E5</td></tr>
<tr><td>E7</td></tr>
<tr><td>E1</td><td>Non observé</td><td>Alternance de mouvements droite vers la droite et droite gauche</td></tr>
<tr><td></td><td colspan="2">SURFACE HORIZONTALE</td></tr>
<tr><td></td><td>Geste traditionnel</td><td>Geste cobot</td></tr>
<tr><td>E2</td><td rowspan="4">Alternance de mouvements d'amplitude différente</td><td rowspan="5">Alternance de mouvements d'amplitude constante</td></tr>
<tr><td>E3</td></tr>
<tr><td>E5</td></tr>
<tr><td>E7</td></tr>
<tr><td>E1</td><td>Non observé</td></tr>
</table>

Lors du geste traditionnel de meulage d'une SV, les ébarbeurs alternent différentes directions de mouvements et pour la SH, différentes amplitudes de mouvements. Lors du geste cobot, il a été observé que les ébarbeurs effectuent des mouvements dans une direction unique ainsi que des mouvements alternatifs. De même lors du geste cobot de meulage d'une SH, ils alternent des mouvements d'amplitude constante (nous reviendrons sur ce que l'articulation des dimensions nous permet de comprendre de ces résultats dans la partie 3 du chapitre 10).

1.4 Évolution des postures adoptées par les ébarbeurs lors de l'usage du cobot

L'analyse descriptive des postures adoptées par les ébarbeurs montre qu'il existe une variabilité interindividuelle importante que ce soit lors des gestes traditionnels ou lors des gestes cobot (cf. Annexes 7 à 11). De plus, les postures adoptées lors des gestes cobot varient fortement selon l'opérateur, l'articulation observée et la surface travaillée. Cette partie s'intéresse à l'évolution des postures adoptées par le cou, le tronc, les épaules, les coudes et les poignets. Les résultats décrits se réfèrent aux zones articulaires de confort ou à risque de développement de TMS (cf. partie 4.1 du chapitre 7) et concernent uniquement les postures mobilisées dans les analyses présentées dans le chapitre 10.

Flexion du cou :

De manière générale, lors de l'usage du cobot, la flexion du cou (>20°) est plus sollicitée ou sollicitée à l'identique par rapport aux gestes traditionnels (cf. Tableau 15).

Lors du geste cobot de meulage d'une SV, le temps passé avec le cou fléchi est plus élevé pour deux ébarbeurs (E3 et E5), ne change pas pour un ébarbeur (E7) et est diminué pour un ébarbeur (E2) par rapport au geste traditionnel. E1 a également le cou en flexion lors du geste cobot de meulage d'une SV.

Lors du geste cobot de meulage d'une SH, le temps passé avec le cou fléchi est identique pour trois ébarbeurs (E3, E5 et E7) et plus élevé pour un opérateur (E2) par rapport au geste traditionnel. Quant à E1, il a également le cou en flexion lors du geste cobot de meulage d'une SH.

Tableau 15 : Flexion du cou lors des gestes traditionnels et lors des gestes cobot

E1	E2		E3		E5		E7	
Cobot	Traditionnel	Cobot	Traditionnel	Cobot	Traditionnel	Cobot	Traditionnel	Cobot
SURFACE VERTICALE								
100% >20°	3% 0°-10° 28% 10°20° 69% >20°	100% 10°-20°	68% 10°-20° 32% >20°	100% >20°	27% 10°-20° 73% >20°	100% >20°	100% >20°	100% >20°
SURFACE HORIZONTALE								
2% 0°-20° 98% >20°	40% 10°-20° 60% >20°	100% >20°	100% >20°	100% >20°	100% >20°	100% >20°	100% >20°	100% >20°

Légende :

Moins sollicité
Sollicitation identique
Plus sollicité

Notes : 0°-10° = zone articulation acceptable (1) ; 10°-20° = zone articulaire non recommandée (2) ; >20° = zone articulaire devant être évitée (3)

Torsion du cou :

De manière générale, lors des gestes cobot et lors des gestes traditionnels, le cou n'est pas ou peu en torsion que ce soit pour le meulage d'une SV ou d'une SH (cf. Tableau 16).

Néanmoins, durant les gestes cobot, il a été observé que les ébarbeurs vont parfois solliciter le cou en torsion (>45°) droite ou gauche pendant un faible pourcentage du temps.

Tableau 16 : Torsion du cou lors des gestes traditionnels et lors des gestes cobot

	E1	E2		E3		E5		E7	
	Cobot	Traditionnel	Cobot	Traditionnel	Cobot	Traditionnel	Cobot	Traditionnel	Cobot
	SURFACE VERTICALE								
Torsion droite	100% 0°-45°	40% 0°-45° 60% off	100% off	100% off	100% off	100% 0°-45°	1% >45° 99% off	66% 0°-45°	2% >45° 98% off
Torsion gauche	100% off	100% off	100% off	100% off	12% 0°-45° 88% off	100% off	100% off	100% off	100% off
	SURFACE HORIZONTALE								
Torsion droite	67% 0°-45° 33% off	100% off	100% off	1% 0°-45° 1% >45°	100% off	100% off	100% off	100% off	100% off
Torsion gauche	1% 0°-45° 2% >45° 97% off	100% off	100% off	100% off	100% off	100% off	100% off	78% 0°-45° 22% off	100% 0°-45°

Légende :

	Moins sollicité
	Sollicitation identique
	Plus sollicité
off	Ne se situe pas dans cette posture

Notes : 0°-45° = zone articulation acceptable (1) ;
>45° = zone articulaire non recommandée (2)

Flexion du tronc :

De manière générale, lors de l'usage du cobot, la flexion du tronc (20°-60°) est plus ou moins prononcée par rapport aux gestes traditionnels (cf. Tableau 17).

Lors du geste cobot de meulage d'une SV, le temps passé avec le tronc fléchi diminue pour deux ébarbeurs (E3 et E5) et est plus élevé pour deux autres ébarbeurs (E2 et E7) par rapport au geste traditionnel.

Lors du geste cobot de meulage d'une SH, le temps passé avec le tronc fléchi (20°-60°) diminue pour deux ébarbeurs (E3 et E7), est identique pour un ébarbeur (E2) et est plus élevé pour un opérateur (E5) par rapport au geste traditionnel.

Quant à l'ébarbeur E1, il a le tronc en flexion pendant le geste cobot de meulage d'une SV (20°-60°) et d'une SH (0°-20°).

Tableau 17 : Flexion du tronc lors des gestes traditionnels et lors des gestes cobot

E1	E2		E3		E5		E7	
Cobot	Traditionnel	Cobot	Traditionnel	Cobot	Traditionnel	Cobot	Traditionnel	Cobot
SURFACE VERTICALE								
100% 20°-60°	10% 0°-20° 90% 20°-60°	100% 20°-60°	100% 20°-60°	46% 0°-20° 54% 20°-60°	73% 0°-20° 27% 20°-60°	99% 0°-20° 1% 20°-60°	32% 0°-20° 68% 20°-60°	100% 20°-60°
SURFACE HORIZONTALE								
100% 0°-20°	100% 20°-60°	100% 20°-60°	1% 0°-20° 99% 20°-60°	100% 0°-20°	100% 0°-20°	28% 0°-20° 72% 20°-60°	100% 20°-60°	59% 0°-20° 41% 20°-60°

Légende :

	Moins sollicité
	Sollicitation identique
	Plus sollicité
off	Ne se situe pas dans cette posture

Notes : 0°-20° = zone articulation acceptable (1) ; 20°-60° = zone articulaire non recommandée (2) ; >60° = zone articulaire devant être évitée (3)

Abduction des épaules :

De manière générale, lors de l'usage du cobot les épaules sont plus sollicitées en abduction (20°-60° et >60°) par rapport aux gestes traditionnels (cf. Tableau 18).

Lors du geste cobot de meulage d'une SV, il a été observé que le temps passé en abduction de l'épaule droite est plus élevé pour deux ébarbeurs (E2 et E7) et est diminué pour un ébarbeur (E3) par rapport au geste traditionnel.

Lors du geste cobot de meulage d'une SH, l'ensemble des ébarbeurs (E2, E3, E5 et E7) sollicite davantage leurs épaules en abduction par rapport au geste traditionnel.

L'ébarbeur E1, lors du geste cobot de meulage d'une SV, sollicite son épaule droite en abduction (20°-60°) et gauche (0°-20°). Lors du meulage d'une SH, ses épaules sont également en abduction (20°-60° et >60°).

Tableau 18 : Abduction des épaules lors des gestes traditionnels et lors des gestes cobot

	E1	E2		E3		E5		E7	
	Cobot	Trad.	Cobot	Trad.	Cobot	Trad.	Cobot	Trad.	Cobot
	SURFACE VERTICALE								
Epaule droite	100% 20°-60°	100% 0°-20°	100% 20°-60°	54% 20° - 60° 5% >60° 41% off	47% 0°-20° 53% 20°-60°	100% NV	100% 20°-60°	100% 0°-20°	10% 0°-20° 80% 20°-60° 10% >60°
Epaule gauche	100% 0°20°	25% 0°-20° 75% 20°-60°	100% off	100% NV	3% 0°-20° 60% 20°-60° 37% >60°	41% 0°-20° 40% 20°-60° 2% >60° 17% off	100% NV	75% 0°-20° 25% 20°-60°	44% 0°-20° 47% 20°-60° 8% >60° 1% off
	SURFACE HORIZONTALE								
Epaule droite	68% 20°-60° 32% >60°	50% 0°-20° 50% 20°-60°	100% 20°-60°	86% 0°-20° 6% 20°-60° 8% off	82% 20°-60° 18% NV	9% 0°-20° 91% 20°-60° 16% off	73% 20°-60° 27% >60°	81% 0°-20° 19% 20°-60°	14% 0°-20° 86% 20°-60°
Epaule gauche	63% 0°-20° 28% 20°-60° 9% off	85% 0°-20° 6% 20°-60° 9% off	50% 0°-20° 50% 20°-60°	66% 0°-20° 7% 20°-60° 27% off	100% 20°-60°	57% 0°-20° 27% 20°-60°	100% 20°-60°	19% 0°-20° 81% 20°-60°	100% 20°-60°

Légende :

	Moins sollicité
	Sollicitation identique
	Plus sollicité
off	Ne se situe pas dans cette posture
NV	Articulation non-visible

Notes : 0°-20° = zone articulation acceptable (1) ; 20°-60° = zone articulaire non recommandée (2) ; >60° = zone articulaire devant être évitée (3)

Flexion/extension des coudes :

Lors du meulage d'une SV, les coudes étant peu visibles nous n'avons pas pu observer l'évolution de leur posture (cf. Tableau 19). Pour le meulage d'une SH, on constate, de manière générale, que les coudes sont davantage sollicités en flexion lors du geste cobot tandis qu'ils le sont davantage en extension lors du geste traditionnel (cf. Tableau 19).

Lors du geste cobot de meulage d'une SH, le temps passé avec les coudes en flexion est plus élevé pour les quatre ébarbeurs (E2, E3, E5 et E7) par rapport au geste traditionnel, à l'exception de E2, pour lequel le coude droit est moins sollicité en flexion lors du geste cobot. A l'inverse, lors du geste traditionnel, les coudes sont sollicités en extension pour l'ensemble des ébarbeurs (E2, E3, E5 et E7) et ne le sont pas (ou peu avec l'exception de E3 pendant 2%) lors du geste cobot.

De même pour E1, lors du geste cobot de meulage d'une SH, ses coudes sont en flexion et ne sont jamais en extension.

Tableau 19 : Flexion/extension des coudes lors des gestes traditionnels et lors des gestes cobot

	E1	E2		E3		E5		E7	
	Cobot	Trad.	Cobot	Trad.	Cobot	Trad.	Cobot	Trad.	Cobot
	SURFACE VERTICALE								
Coude droit flexion	5% 0°-10° 95% off	100% NV	100% off	45% NV 22% 10°-80°	43% 10°-80° 57% off	36% NV 1% 0°-10° 63% 10°-80°	15% NV 21% 0°-10° 57% 10°-80° 7% off	100% NV	11% 0°-10° 89% 10°-80°
Coude gauche flexion	100% off	35% 0°-10° 9% 10°-80° 56% off	100% off	100% NV	43% 10°-80° 57% off	45% NV 38% 10°-80° 17% off	100% NV	47% NV 19% 10°-80° 20% off	15% NV 28% 0°-10° 39% 10°-80° 18% off
Coude droit extension	95% 0°-30° 5% off	100% NV	100% 30°-80°	45% NV 24% 0°-30° 31% off	8% 0°-30° 49% 30°-80° 43% off	36% NV 64% off	15% NV 7% 0°-30° 78% off	100% NV	100% off
Coude gauche extension	6% 0°-30° 94% 30°-80°	46% 0°-30° 10% 30°-80° 44% off	100% 30°-80°	100% NV	9% 0°-30° 48% 30°-80° 43% off	45% NV 55% off	100% NV	47% NV 17% 0°-30° 3% 30°-80° 33% off	15% NV 18% 0°-30° 67% off
	SURFACE HORIZONTALE								
Coude droit flexion	12% 0°-10° 88% 10°-80°	40% 0°-10° 55% 10°-80° 44% off	76% 0°-10° 24% 10°-80°	100% off	6% 0°-10° 92% 10°-80° 2% off	100% off	100% 10°-80°	100% off	100% 10°-80°
Coude gauche flexion	55% 0°-10° 45% 10°-80°	3% 0°-10° 97% off	98% 0°-10° 2% 10°-80°	100% off	13% 0°-10° 87% 10°-80°	100% off	100% 10°-80°	100% off	100% 0°-10°
Coude droit extension	100% off	5% 0°-30° 95% off	100% off	100% 30°-80°	2% 0°-30° 98% off	47% 0°-30° 53% 30°-80°	100% off	8% 0°-30° 92% 30°-80°	100% off
Coude gauche extension	100% off	97% 0°-30° 3% off	100% off	100% 30°-80°	100% off	100% 0°-30°	100% off	100% 30°-80°	100% off

Légende :

	Moins sollicité
	Sollicitation identique
	Plus sollicité
off	Ne se situe pas dans cette posture
NV	Articulation non-visible

Notes : Flexion : 0°-10° = zone articulation acceptable (1) ; 10°-80° = zone articulaire non recommandée (2)
Extension : 0°-30° = zone articulation acceptable (1) ; 30°-80° = zone articulaire non recommandée (2)

Flexion/extension des poignets :

Lors du meulage d'une SV, les poignets n'étaient pas visibles lors du geste traditionnel (cf. Tableau 20). De même pour les poignets de E1 et E5 (poignet gauche) lors de l'usage du cobot. Pour les autres ébarbeurs, on observe que, lors du geste cobot, les poignets sont sollicités en flexion (0°-15° et >15°). De plus, lors du meulage d'une SH, de manière générale, les poignets sont plus sollicités en flexion et en extension (>15°) lors du geste cobot que lors du geste traditionnel (cf. Tableau 20).

Il a, en effet, été observé que lors du geste cobot de meulage d'une SH, le temps passé avec le poignet droit fléchi est plus élevé pour deux ébarbeurs (E2 et E3) et est diminué pour deux ébarbeurs (E5 et E7) par rapport au geste traditionnel. Concernant le temps passé avec le poignet gauche fléchi, il est plus élevé pour deux ébarbeurs (E3 et E5) et est diminué pour deux autres ébarbeurs (E2 et E7) lors du geste cobot par rapport au geste traditionnel. Concernant l'extension des poignets, lors du geste cobot, le temps passé avec le poignet droit en extension est plus élevé pour deux ébarbeurs (E5 et E7) et est identique pour deux autres (E2 et E3) par rapport au geste traditionnel. Le temps passé avec le poignet gauche en extension lors de l'usage du cobot est également plus élevé pour trois ébarbeurs (E2, E3 et E5) et est identique pour E7 par rapport au geste traditionnel.

Quant à l'ébarbeur E1, il sollicite son poignet droit en flexion et en extension (0°-15°) lors du geste cobot et son poignet gauche en flexion (0°-15° et >15°).

Tableau 20 : Flexion/extension des poignets lors des gestes traditionnels et lors des gestes cobot

	E1	E2		E3		E5		E7	
	Cobot	Trad.	Cobot	Trad.	Cobot	Trad.	Cobot	Trad.	Cobot
	SURFACE VERTICALE								
Poignet droit flexion	100% NV	100% NV	100% 0°-15°	100% NV	5% 0°-15° 95% >15°	100% NV	6% NV 94% >15°	47% NV 53% 0°-15°	78 % 0°-15° 22% >15°
Poignet gauche flexion	100% NV	100% NV	100% off	100% NV	3% 0°-15° 37% >15° 60% off	100% NV	100% NV	100% NV	13% NV 87% >15°
Poignet droit extension	100% NV	100% NV	100% off	100% NV	100% off	100% NV	6% NV 94% off	100% NV	100% off
Poignet gauche extension	100% NV	100% NV	100% 0°-15°	100% NV	17% 0°-15° 43% >15° 40% off	100% NV	100% NV	100% NV	13% NV 87% off
	SURFACE HORIZONTALE								
Poignet droit flexion	36% 0°-15° 64% off	96% 0°-15° 4% >15°	16% 0°-15° 84% >15°	100% 0°-15°	13% 0°-15° 69% >15° 18% NV	15% 0°-15° 85% >15°	27% 0°-15° 55% >15° 18% off	100% 0°-15°	100% off
Poignet gauche flexion	23% 0°-15° 77% >15°	47% 0°-15° 47% >15° 6% off	100% off	60% 0°-15° 40% off	2% 0°-15° 15% >15° 65% off 18% NV	74% 0°-15° 11% >15° 15% off	26% 0°-15° 30% >15° 44% off	29% 0°-15° 71% >15°	41% 0°-15° 59% >15°
Poignet droit extension	27% 0°-15° 73% off	100% off	100% off	100% off	82% off 18% NV	100% off	18% 0°-15° 82% off	100% off	100% 0°-15°
Poignet gauche extension	100% off	6% 0°-15° 94% off	38% 0°-15° 62% >15°	40% 0°-15° 60% off	8% 0°-15° 57% >15° 17% off 18% NV	15% 0°-15° 85% off	2% 0°-15° 42% >15° 56% off	100% off	100% off

Légende :

	Moins sollicité
	Sollicitation identique
	Plus sollicité
off	Ne se situe pas dans cette posture
NV	Articulation non-visible

Notes : 0°-15° = zone articulaire non recommandée (2) ; >15° = zone articulaire devant être évitée (3)

Abduction/adduction des poignets :

Enfin, concernant l'abduction des poignets, il n'a pas été possible de donner une « tendance » à son évolution pour le meulage d'une SV car les poignets n'étaient pas visibles lors du geste traditionnel et peu ou pas visibles lors du geste cobot (cf. Tableau 21). Néanmoins il a tout de même été observé que quatre ébarbeurs (E2, E3, E5 et E7) ont le poignet droit en abduction (>0°) et deux ont le poignet gauche en abduction (>0°) lors du geste cobot de meulage d'une SV. Concernant le meulage d'une SH (cf. Tableau 21), les poignets sont sollicités en abduction (>0°) pour l'ensemble des ébarbeurs lors du geste cobot et lors du geste traditionnel.

Tableau 21 : Abduction/adduction des poignets lors des gestes traditionnels et lors des gestes cobot

	E1	E2		E3		E5		E7	
	Cobot	Trad.	Cobot	Trad.	Cobot	Trad.	Cobot	Trad.	Cobot
	SURFACE VERTICALE								
Poignet droit abduction	100% NV	100% NV	100% >0°	100% NV	100% >0°	100% NV	6% NV 94% >0°	100% NV	100% >0°
Poignet gauche abduction	100% NV	100% NV	100% off	100% NV	81% >0° 19% off	100% NV	100% NV	100% NV	13% NV 87% >0°
Poignet droit adduction	100% NV	100% NV	100% off	100% NV	100% off	100% NV	12% NV 88% off	100% NV	100% off
Poignet gauche adduction	100% NV	100% NV	100% >0°	100% NV	19% >0° 81% off	100% NV	100% NV	100% NV	13% NV 87% off
	SURFACE HORIZONTALE								
Poignet droit abduction	100% >0°	100% >0°	100% >0°	94% >0° 6% off	82% >0° 18% NV	100% >0°	100% >0°	100% >0°	100% >0°
Poignet gauche abduction	100% >0°	99% >0° 1% off	100% >0°	98% >0° 2% off	82% >0° 18% NV	100% >0°	100% >0°	100% >0°	100% >0°
Poignet droit adduction	100% off	100% off	100% off	100% off	82% off 18% NV	100% off	100% off	100% off	100% off
Poignet gauche adduction	100% off	1% >0° 99% off	100% off	100% off	82% off 18% NV	100% off	100% off	100% off	100% off

Légende :

	Moins sollicité
	Sollicitation identique
	Plus sollicité
off	Ne se situe pas dans cette posture
NV	Articulation non-visible

Notes : >0° = zone articulaire devant être évitée (3)

Synthèse

Pour décrire l'évolution de la dimension biomécanique du geste lors de l'usage du cobot, quatre composantes ont été analysées lors des gestes traditionnels et lors des gestes cobot. Il a ainsi été constaté que l'effort global ressenti par les ébarbeurs est perçu comme moins élevé lors des gestes cobot par rapport aux gestes traditionnels. De même, les vibrations sont ressenties comme moins élevées lors de l'usage du cobot. Concernant la répétitivité, la quantification des mouvements effectués par minute montre que les ébarbeurs effectuent moins de mouvements et des mouvements plus lents lors des gestes cobot par rapport aux gestes traditionnels. Cette répétitivité se caractérise par la direction (SV) et l'amplitude (SH) des mouvements : ainsi lors des gestes traditionnels les ébarbeurs alternent différents types (SV) et différentes amplitudes (SH) de mouvements tandis que lors des gestes cobot des mouvements dans une direction unique et alternatives (SV) et d'amplitude constante (SH) ont été observés. Concernant les postures adoptées par les ébarbeurs, une importante variabilité interindividuelle a été mise en évidence que ce soit lors des gestes traditionnels et lors des gestes cobot. Les postures adoptées peuvent se situer dans des zones à risque de développement de TMS quel que soit le geste réalisé. De manière générale, lors des gestes cobot les postures adoptées par exemple par les épaules en abduction ou les coudes en flexion peuvent se situer plus longtemps dans des zones à risque de développement de TMS. Ainsi, l'usage du cobot ne semble pas toujours être en faveur d'une exposition plus limitée aux postures à risque de développement de TMS.

2. Évolution des composantes de la dimension cognitive

Cette partie s'intéresse à l'évolution des composantes de la dimension cognitive entre les gestes traditionnels et les gestes cobot. Elle décrit l'évolution de la concentration estimée, du recueil d'informations sensorielles, du traitement d'informations et des décisions prises lors des gestes traditionnels et lors des gestes cobot.

2.1 Évolution de la concentration

De manière générale, la concentration estimée par les ébarbeurs est plus élevée lors des gestes cobot par rapport aux gestes traditionnels (cf. Figure 31). Les ébarbeurs estiment, en effet, percevoir une concentration très faible à un peu élevée (en moyenne de 2,9±1,4 à 5,1±1,8) lors des gestes traditionnels tandis que celle perçue lors des gestes cobot est estimée comme modérée à très élevée (de 4,5±1,7 à 6,0±0,7). Cependant, deux ébarbeurs (E3 et E7) estiment leur concentration identique pour le meulage d'une SV que ce soit lors du geste traditionnel ou lors de l'usage du cobot.

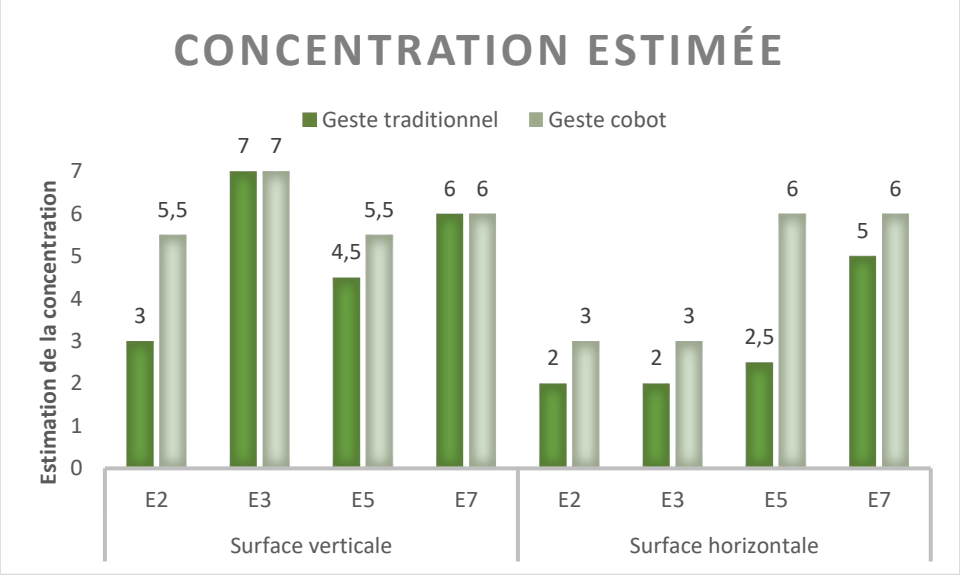


Figure 31 : Estimation de la concentration par les ébarbeurs

Lors des gestes traditionnels, la concentration est estimée par les ébarbeurs comme plus élevée lors du geste de meulage d'une SV qu'une SH (cf. Figure 31). Pour SV, cette concentration se focalise principalement sur « bien tenir la meuleuse » pour éviter qu'elle ne

ripe et les blesse potentiellement : « E3 – *Toute façon faut toujours être concentré quand tu travailles, obligé de toujours penser que la meule elle peut venir sur moi ou sur la jambe. […] faut bien la tenir […] faut faire attention qu'elle vienne pas sur toi c'est tout.* » (extrait d'entretiens). Tandis que pour SH, la concentration est estimée comme plus faible car la meuleuse est en appui sur la surface : ils n'ont plus à la maintenir à hauteur : « E2 – *pas besoin de beaucoup se concentrer là [SH]. […] parce que c'est plus facile là […] t'as pas à porter la meule ! Tu la laisses dessus là tranquille* » (extrait d'entretiens).

Lors des gestes cobot la concentration est estimée comme plus élevée lors du meulage de SV que SH, comme pour le geste traditionnel (à l'exception de deux ébarbeurs (E5 et E7) qui l'estiment élevée pour les deux surfaces). Cependant, la concentration nécessaire aux gestes cobot se focalise sur d'autres éléments que lors des gestes traditionnels : maintenir le cobot en fonction ou éviter de faire une erreur en creusant la pièce par exemple. En effet, les ébarbeurs évoquent devoir davantage se concentrer, par exemple pour:

- maintenir les gâchettes de sécurité du terminal enfoncées: « E3 – *tu sais les boutons à tenir comme ça faut que tu sois bien concentré…avec ça [cobot] t'es plus concentré qu'à la main libre [meuleuse traditionnelle] tu sais […] tu dois plus te concentrer »,*
- retenir le terminal du cobot : « E7 – *t'es vachement concentré sur ce que tu fais […] t'es plus concentré pour essayer de le retenir* »,
- prendre en compte l'architecture du bras du cobot : « E7 – t'*es plus concentré que quand t'as ta meule [traditionnelle], parce que quand tu tiens ta meule disons que…c'est naturel quoi tu tiens ta meule tu sais que tu vas par là, par là… […] Là [avec le cobot] par contre t'es obligé de réfléchir à ça [montre le bras]… là j'arrive même pas à penser hein, je suis concentré 100% !* » etc.

2.2 Évolution du recueil d'informations sensorielles

L'évolution du recueil d'informations sensorielles entre les gestes traditionnels et les gestes cobot se focalise ici sur le recueil des « informations visuelles » et des « informations tactiles ». Les informations sensorielles liées aux autres sens (l'ouïe, l'odorat ou le goût) n'ont

pas été évoquées par les ébarbeurs comme des informations recueillies pour réaliser leurs gestes professionnels.

Informations visuelles

Lors des gestes traditionnels, que ce soit celui de meulage d'une SV ou d'une SH, les ébarbeurs expriment avoir besoin de recueillir une information visuelle en lien avec les défauts à meuler sur la surface tout au long de la réalisation de leurs gestes (cf. Tableau 22) : « E2 – *Quand tu meules, tu regardes en même temps* », « E5 – *[on regarde] Les pavés [défaut], on suit les pavés, on suit les bosses quoi* » (extraits d'entretiens). L'observation continue des défauts leur permet d'assurer l'efficacité du meulage en cours et de le poursuivre (par exemple en poursuivant l'alternance de mouvements pour atteindre la qualité souhaitée).

Tableau 22 : Informations visuelles recueillies lors du geste traditionnel et lors du geste cobot

	SURFACE VERTICALE			
	Geste traditionnel		Geste cobot	
	Type d'informations recherchée	Possibilité de les recueillir	Type d'informations recherchée	Possibilité de les recueillir
E2	défauts	oui	défauts	difficultés
E3				
E5			- défauts - *bras du cobot et feu tricolore*	- difficultés - oui
E7			- défauts - *bras du cobot*	- difficultés - oui
E1	Non observé		*bras du cobot*	oui
	SURFACE HORIZONTALE			
	Geste traditionnel		Geste cobot	
	Type d'informations recherchée	Possibilité de les recueillir	Type d'informations recherchée	Possibilité de les recueillir
E2	défauts	oui	- défauts - *bras du cobot*	- difficultés - oui
E3				
E5			- défauts - *bras du cobot et feu tricolore*	- difficultés - oui
E7			- défauts - *bras du cobot*	- difficultés - oui
E1	Non observé		*bras du cobot*	oui

Notes : italique = nouvelle information visuelle

Lors des gestes cobot, que ce soit celui de meulage d'une SV ou SH, les ébarbeurs expriment ne plus pouvoir observer en continu le défaut (à l'exception de E1 qui ne l'a pas

évoqué) : « E5 – *C'est pas la même vision, c'est pas la même façon de travailler, c'est pas…voilà quoi […] on voit pas pareil ! »* (extrait d'entretiens).

De plus, lors des gestes cobot, le besoin de recueillir de nouvelles informations visuelles émerge. Que ce soit lors du geste de meulage d'une SV ou SH, ils évoquent tous (à l'exception de E2 pour la SV) avoir besoin d'observer le bras du cobot au cours de la réalisation de leurs gestes : « E1 – *Bah j'ai regardé le bras ! Tu vois je regarde comme ça [mime en train de meuler tourne la tête pour regarder le bras] »* (extrait d'entretiens). Un des ébarbeurs (E5) explique également qu'il lui est nécessaire, lors de l'usage du cobot, de regarder le feu tricolore situé sur l'armoire du terminal derrière lui : *«* E5 – *On a une loupiote : quand c'est en défaut, c'est orange ou rouge donc euh bon…on regarde toujours s'il n'est pas orange ou rouge quoi. »* (extrait d'entretiens) (nous reviendrons sur ce que l'articulation des dimensions nous permet de comprendre de ces résultats dans la partie 2 du chapitre 10).

Informations tactiles

Lors du geste traditionnel de meulage de SV, il ressort des observations et des entretiens que deux ébarbeurs (E5 et E7) ont eu besoin de toucher la surface à la fin du meulage pour s'assurer que la surface était lisse : « Clara – *Là [SV] il faut toucher ?* E7 – *Ouais pour être sûr que ce soit droit !* », « Clara – *là [SV] tu touches ?* E5 – *Oui oui pour voir si c'est bien plat parce que t'es dans le noir là [référence à l'éclairage].*» (extraits d'entretiens). Cette information tactile n'a pas été évoquée par les autres ébarbeurs tout comme elle n'a pas été évoquée pour le meulage de SH (cf. Tableau 23). De plus, les informations tactiles liées au fait de sentir le disque en contact de la surface (retour d'effort et des vibrations) n'ont pas été évoquées spontanément par les ébarbeurs lors des gestes traditionnels (cf. Tableau 23).

Tableau 23 : Informations tactiles recueillies lors du geste traditionnel et lors du geste cobot

<table>
<tr><td></td><td colspan="2">SURFACE VERTICALE</td></tr>
<tr><td></td><td>Geste traditionnel</td><td>Geste cobot</td></tr>
<tr><td>E2</td><td rowspan="2">- n'a pas eu besoin de toucher la surface
- retour d'effort/vibrations : non évoqué</td><td>- a eu besoin de toucher la surface
- retour d'effort/vibrations : non évoqué</td></tr>
<tr><td>E3</td><td rowspan="3">- a eu besoin de toucher la surface
- retour d'effort/vibrations : évoqué</td></tr>
<tr><td>E5</td><td rowspan="2">- a eu besoin de toucher la surface
- retour d'effort/vibrations : non évoqué</td></tr>
<tr><td>E7</td></tr>
<tr><td>E1</td><td>Non observé</td><td>- n'a pas eu besoin de toucher la surface
- retour d'effort/vibrations : non évoqué</td></tr>
<tr><td></td><td colspan="2">SURFACE HORIZONTALE</td></tr>
<tr><td></td><td>Geste traditionnel</td><td>Geste cobot</td></tr>
<tr><td>E2</td><td rowspan="4">- n'a pas eu besoin de toucher la surface
- retour d'effort/vibrations : non évoqué</td><td rowspan="5">- n'a pas eu besoin de toucher la surface
- retour d'effort/vibrations : non évoqué</td></tr>
<tr><td>E3</td></tr>
<tr><td>E5</td></tr>
<tr><td>E7</td></tr>
<tr><td>E1</td><td>Non observé</td></tr>
</table>

Lors du geste cobot de meulage d'une SV, tous les ébarbeurs (à l'exception de E1) ont cette fois eu besoin de toucher la surface (cf. Tableau 23) : « Clara – *là [SV] j'ai vu que tu as touché ?* E5 – *Bah ouais on n'y voit rien […] là j'ai bien vu que bon c'était pas bien…* », « [E7 touche SV] : *Oh ! Y'a des crans !* » (extraits d'entretiens). À l'inverse, pour le geste cobot de meulage d'une SH, ils n'ont pas eu besoin de le faire (cf. Tableau 23).

De plus, le recueil d'informations tactiles liées au retour d'effort et vibrations lors du geste cobot de meulage d'une SV a été évoqué par trois ébarbeurs (E3, E5 et E7). Ce retour d'effort et vibrations concerne le fait de sentir le disque de la meuleuse en contact avec la surface en train d'être meulée. Pour ces ébarbeurs, cette information tactile est moins présente lors de l'usage du cobot : « E7 – *Je sais pas comment on peut appeler ça…c'est euh…tu sais quand tu descends tu sens ce que tu fais euh… y'a une force… […] mais là [avec le cobot] Tu vois ; ça rentre direct hein ! C'est pas évident hein ! Parce que là c'est euh…c'est du vrai caoutchouc [la pièce] […] elle est comme du chewing-gum* », « E3 – *On sent moins parce que avec la main comme ça libre [meuleuse traditionnelle] tu sens aussitôt qu'avec cobot, y'a un ressort et on sent moins, un peu moins quand ça touche quoi […] euh…comment je peux t'expliquer ça ?…euh…moelleuse [rire] c'est plus moelleux si tu veux…* » (extraits d'entretiens). Cette information tactile n'a pas été évoquée lors du geste de meulage d'une SH.

2.3 Évolution du traitement de l'information et des prises de décision

Lors des gestes traditionnels, les ébarbeurs vont traiter les informations recueillies et prendre des décisions vis-à-vis :

- des mouvements à réaliser avec l'outil : les ébarbeurs vont traiter l'information visuelle recueillie en lien avec les défauts afin de choisir la direction et l'amplitude des mouvements à réaliser pour atteindre la qualité souhaitée. Ainsi, pour SV, ils vont décider d'alterner des mouvements haut bas et droite gauche : « E3 – *Je retire comme ça [mime mouvement haut bas] je suis ça [dessine le défaut et me montre le contour du défaut]* […] *après je rattrape comme ça [mime mouvement droite gauche], c'est bien droit partout »* (extrait d'entretiens). Pour SH, ils vont décider d'alterner des mouvements de faible et de grande amplitude : « E3 – *Ici [montre sur la chronique mouvements faible amplitude], y'a une bosse donc j'essaye de la bouffer et après [mouvements grande amplitude] je passe sur le long et hop c'est propre ! »* (extrait d'entretiens).
- du rythme de travail avec l'outil : l'information visuelle en lien avec le défaut va être traitée afin de choisir le rythme des mouvements à effectuer pour, lors du meulage de SH, atteindre la qualité souhaitée ou, pour le meulage de SV, gagner du temps ou se protéger. Ainsi, pour SH, ils vont tous décider d'alterner rythme rapide et rythme lent lors des mouvements effectués avec l'outil (en lien avec l'amplitude des mouvements explicitée ci-dessus). Tandis que pour SV, deux opérateurs évoquent soit chercher à gagner du temps (E2) soit chercher à se protéger (E3) ; ils décident alors respectivement d'effectuer des mouvements rapides et des mouvements lents : *«* E3 – *Vitesse doucement parce qu'on peut pas faire vite. Là-bas c'est pas pareil qu'ici [SH]. Là-bas [SV] obligé faire plus doucement parce qu'il faut faire attention à la jambe tout ça, pas doucement mais on peut pas aller vite vite parce qu'on peut pas bouger c'est pas pareil qu'ici [SH]. »* (extrait d'entretiens).
- du positionnement des mains sur l'outil : l'ensemble des ébarbeurs va chercher à modifier le positionnement des mains sur l'outil durant les gestes traditionnels pour pouvoir observer en continu les défauts meulés ; ils vont, par exemple, positionner une main sur le manche et une main sur la poignée auxiliaire de la meuleuse puis changer

et mettre leurs deux mains sur le manche : « E5 – *Tu peux mieux la manœuvrer suivant ce que tu veux faire quoi. Parce que des fois, la poignée, bon ça peut te gêner pour voir les trucs quoi. Que là, tu la tiens par le moteur [2 mains sur le manche] et pis bon voilà quoi ! »* (extrait d'entretiens).

- de l'effort à exercer sur l'outil pour meuler le défaut : en observant les défauts et en sentant le disque de la meuleuse en contact avec la surface meulée, les ébarbeurs vont choisir l'effort à exercer sur l'outil pour parvenir à meuler le défaut. Ils vont alors décider d'exercer un effort d'appui important pour réussir à meuler les défauts présents sur la SV : « E7 – *Là faut que t'appuies là pour avoir… Bah t'as bien vu hein ? On en a enlevé de la matière là. »* (extrait d'entretiens). Cet élément n'a pas été évoqué par les ébarbeurs lors du geste traditionnel de meulage d'une SH.

- de la qualité à atteindre : en observant et en touchant la surface, les informations recueillies sont traitées par les ébarbeurs afin de s'assurer que la qualité souhaitée est atteinte. Ainsi la décision évoquée par tous les ébarbeurs, que ce soit pour SV ou SH, est d'obtenir une surface lisse sans défauts apparents (cf. partie 4.1).

Concernant les gestes cobot, les résultats montrent, tout d'abord, que l'ensemble des ébarbeurs (à l'exception de E1) tentent de suivre les mêmes raisonnements que ceux des gestes traditionnels. Cependant, lors de l'usage du cobot, ils éprouvent des difficultés à les mettre en œuvre si bien que les décisions qui en découlent, peuvent alors être vécues comme une contrainte pour les ébarbeurs : *«* E5 – *J'essaye de travailler comme avec une meule normale mais bon…c'est pas pareil quoi ! C'est pas…c'est pas évident quoi ! », «* E3 – *Normalement on travaille comme ça mais là, c'est pas possible »* (extrait d'entretiens). Les éléments évoqués par les ébarbeurs sont les suivants :

- les mouvements à réaliser avec l'outil : la diminution du recueil d'informations tactiles en lien avec la possibilité de sentir le disque en contact avec la surface lors du meulage de SV, va être traitée par les ébarbeurs afin de choisir les directions de mouvement à réaliser. Le but n'est plus d'atteindre la qualité souhaitée mais d'éviter de creuser la pièce au risque de créer de la non-qualité. Ils vont alors décider de privilégier des mouvements dans une direction unique pour le meulage d'une SV : *«* Clara – *À la main tu fais comme ça [mime mouvement alternant des directions différentes]. Avec le cobot*

tu fais comme ça [direction unique]. Tu fais moins euh…d'allers-retours ? E2 – *Non je rentre dans la pièce je pense sinon »* (extrait d'entretiens). Pour SH, l'amplitude des mouvements à réaliser est « imposée » par l'usage du cobot. Ils vont, en effet, réaliser des mouvements d'amplitude constante (SH) (cf. partie 4.3). À l'exception de E1 qui ne l'évoque pas comme une contrainte.

- le rythme de travail avec l'outil : quelle que soit la surface travaillée, le choix du rythme des mouvements à réaliser est imposé par le cobot. Les ebarbeurs expriment tous le fait de ne plus pouvoir choisir le rythme de travail, mais de devoir s'adapter au rythme contraint par le cobot et de devoir aller moins vite lors du geste cobot (cf. partie 4.3). Cependant E1 ne le vit pas comme une contrainte, il évoque prendre la décision de travailler d'une façon différente avec le cobot : *«* E1 – *Faut y aller gentiment et ça va tout seul. Alors que tu vois ; si le gars qui travaille il pousse dessus comme on a l'habitude, il [le cobot] veut pas lui ! Il faut faire tout doucement ! Si tu pousses, bah il bloque…Faut pas travailler comme des singes ! Elle aime pas la machine ! Faut mettre comme ça tout doucement, tranquillement, ça va tout seul »* (extrait d'entretiens).

- le positionnement des mains sur l'outil : pour SV, l'ensemble des ébarbeurs (à l'exception de E1) évoquent ne plus parvenir à alterner le positionnement de leur main et doivent alors garder une main sur chaque poignée du terminal (cf. partie 4.3). Néanmoins deux ébarbeurs (E2 et E3) cherchent à recueillir l'information visuelle en lien avec le défaut en essayant – avec difficulté – de retourner leur main gauche sur la poignée : « Clara – *T'as fait comme ça là [main retournée] ?* E2 – *Ouais ! Pour essayer de regarder en même temps. Mais bon…j'avais du mal quand même. »* (extrait d'entretiens). Pour SH, cet élément émerge (alors qu'il n'était pas évoqué lors du geste traditionnel) pour trois des ébarbeurs (E3, E5 et E7, E2 et E1 ne l'ont pas évoqué) : du fait du positionnement de leurs mains sur l'outil, ils ne parviennent plus à recueillir l'information visuelle en lien avec le défaut.

- l'effort à exercer sur l'outil : la diminution du recueil d'informations tactiles (sentir le disque en contact de la surface) lors du meulage de SV, va être traitée par les ébarbeurs afin d'adapter l'effort à exercer pour éviter de creuser la pièce. Ainsi, les ébarbeurs cherchent, quelle que soit la surface travaillée, à « doser l'effort » exercé sur l'outil : « E3 – *Là je calcule parce que, si là tu commences trop bas, ça va pas ! […] Parce qu'avec*

la main libre, hop ! T'y vas directement. Avec la machine [cobot] t'es obligé de calculer…de rapprocher comme ça hop ! Tu commences un peu. Sinon…parce que…celui-là, si tu approches direct ou trop, tu vas rentrer dans la pièce c'est sûr et certain ! » (extrait d'entretiens).

- la qualité à atteindre : la diminution du recueil d'information visuelle en lien avec le défaut et le besoin de toucher la surface se traduisent dans leurs gestes comme une contrainte pour les ébarbeurs pour atteindre la qualité souhaitée. Ils éprouvent, en effet, tous des difficultés pour l'obtenir (à l'exception de E1 qui ne l'évoque pas), si bien que la décision prise est souvent celle de repasser ensuite avec la meuleuse traditionnelle pour finir la surface travaillée. Ils expliquent également chercher à éviter de faire de la « non-qualité » c'est-à-dire de creuser la pièce et risquer de faire un trou irrémédiable dans cette dernière : *«* E7 – *C'est pour éviter de rentrer dans la pièce. », «* Clara – *Parce que l'objectif, c'est quoi là ? De faire bien lisse ?* E3 – *Bah de pas rentrer dans la pièce surtout »* (extrait d'entretiens).

- l'architecture du bras du cobot : l'ensemble des ébarbeurs décide d'observer ponctuellement le bras du cobot derrière eux pour voir comment ce dernier est articulé, et afin de savoir s'ils peuvent ou non poursuivre le geste sans risquer de faire un cran sur la surface : *«* E5 – *Suivant comment le bras est tourné, bon bah, il va reculer différemment quoi ! Aussi bien le ré-avancer des fois, on croit qu'il va aller droit pis bon, si le bras est un peu tordu, ça va repartir un peu en biais donc il faut le ramener… »* (extrait d'entretiens).

Synthèse

L'évolution de la dimension cognitive est décrite selon quatre composantes analysées lors des gestes traditionnels et lors des gestes cobot. Ainsi, les résultats montrent que la concentration est estimée plus élevée lors des gestes cobot par rapport aux gestes traditionnels, ses focalisations changent. De plus, lors des gestes traditionnels les ébarbeurs ont besoin d'observer en continu les défauts ; cette information s'avère difficile à recueillir lors de l'usage du cobot. La recherche de nouvelles informations visuelles émerge lors des gestes cobot : observer le bras du cobot et le feu tricolore sur le mat du cobot pour poursuivre le meulage initié. De plus, l'information tactile liée au fait de sentir le disque en contact de la surface est diminuée lors de l'usage du cobot. Enfin, les résultats montrent que certains ébarbeurs tentent de suivre les traitements d'informations et les prises de décisions des gestes traditionnels lors des gestes cobot : n'y parvenant pas, les ébarbeurs évoquent être contraints dans la réalisation de leurs gestes. La décision majoritairement prise est alors celle de repasser par la suite avec la meuleuse traditionnelle pour finir le meulage initié avec le cobot. Cependant, un ébarbeur n'exprime pas de contraintes relatives à l'usage du cobot ; il prend la décision de travailler d'une façon différente par rapport aux gestes traditionnels.

3. Évolution des composantes de la dimension psycho-sociale

Cette partie s'intéresse à la possibilité, perçue par les ébarbeurs, de donner du sens au geste lors des gestes traditionnels et lors des gestes cobot. Elle décrit alors l'évolution de la qualité perçue, de la protection de soi, de l'empêchement, des émotions ressenties, et de la reconnaissance du geste lors des gestes traditionnels et lors des gestes cobot. Les résultats montrent que ces composantes soutiennent ou s'opposent à la possibilité, pour les ébarbeurs, de trouver du sens à leur geste.

3.1 Évolution de la qualité perçue par les ébarbeurs

De manière générale, la qualité perçue par les ébarbeurs est moins satisfaisante lors des gestes cobot par rapport aux gestes traditionnels (cf. Figure 32). Les ébarbeurs estiment, en effet, une qualité perçue comme un peu satisfaisante à très satisfaisante (en moyenne 5,8 ± 0 à 6,4 ± 0,5) lors des gestes traditionnels, tandis que celle perçue lors de l'usage du cobot est estimée comme peu satisfaisante (3,5 ± 1,3 à 3,9 ± 1).

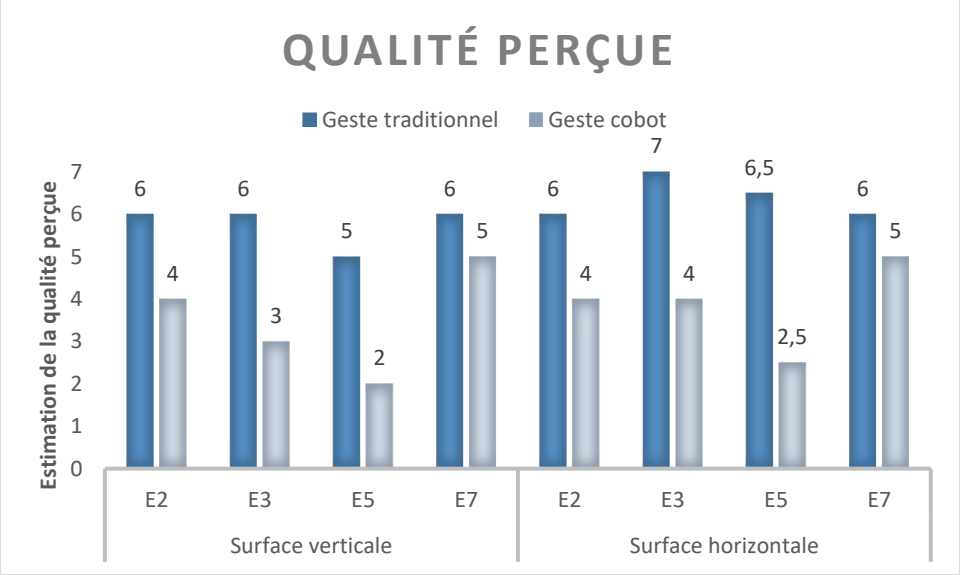


Figure 32 : Estimation de la qualité perçue par les ébarbeurs

Lors des gestes traditionnels, l'ensemble des ébarbeurs estime pouvoir faire un travail de qualité. Les critères de qualité sur lesquels reposent leur perception sont l'obtention d'une surface lisse sans défauts apparents (cf. Figure 33) : « E5 – *Quand y'a pas de bosse, pas de nioc,*

qu'elle brille, bon pas qu'elle brille mais on voit bien que c'est propre quoi ! », « E2 – *Par exemple, la table là, une table comme ça [enlève la feuille de papier posée sur la table] là y'a plus rien, c'est propre ! […] Si y'a ça [repose la feuille], ça va pas […] c'est pas le même niveau, obligé d'enlever ça [épaisseur de la feuille de papier posée sur la table] »* (extraits d'entretiens). Pour les ébarbeurs, la possibilité d'atteindre leurs critères de qualité leur permet de trouver du sens à leur geste.

Figure 33 : Exemple de l'aspect visuel d'une surface lisse sans défauts apparents (geste traditionnel)

Ces critères de qualité dépendent également de la surface meulée, plus précisément des zones qui seront usinées par la suite. Les pièces sont meulées par les ébarbeurs au sein de l'atelier de parachèvement et peuvent ensuite être acheminées à l'atelier d'usinage pour des derniers travaux de finition. C'est le cas pour la SV qui est ensuite percée à l'atelier d'usinage pour rassembler les différentes parties de la pièce par des boulons. Les ébarbeurs évoquent cet élément comme guidant leurs critères de qualité : ils se donnent en effet comme objectif d'obtenir une surface lisse pour faciliter ce travail d'usinage : *«* E7 – *Y'a des perçages normalement ici [SV] […] parce que c'est pas usiné partout, voilà ici là c'est usiné et là c'est percé là pour les attacher. […] Pour l'assemblage, faut que ce soit droit, impeccable […] parce que quand tu mets les boulons faut que ce soit droit », «* E5 – *C'est pas usiné ou très peu parce qu'il forme un trou là hein […] Il faut déjà une surface plane pour que l'écrou, il tienne bien. »* (extraits d'entretiens). Lors du geste traditionnel de meulage d'une SH, un ébarbeur (E2) explique que bien que la moitié de la surface doive être meulée (l'autre moitié est usinée), il préfère meuler l'ensemble de la surface sans distinguer partie usinée/partie ébarbée pour obtenir un rendu plus propre selon lui : *«* E2 – *Y'a la moitié qui va après à l'usinage, t'es pas obligé de bien bien*

meuler quoi, mais je vais bien meuler quand même, c'est plus propre au visuel » (extrait d'entretiens).

Lors de l'usage du cobot, tous les ébarbeurs, à l'exception de E1, estiment ne pas avoir atteint une qualité qui leur convient. La présence de crans sur la surface signifie pour eux que la surface n'est pas finie et qu'il leur faudra repasser avec la meuleuse traditionnelle pour les « gommer » (cf. Figure 34) : *«* E5 – *on voit bien qu'y a encore des crans quoi, que c'est pas bien plat ! », «* E2 – *C'est pas tout droit. Regarde c'est pas tout droit […] peut être ça passe mais bon c'est pas propre ! [...] Faut repasser avec la meule [traditionnelle] derrière »* (extraits d'entretiens). Cette qualité perçue comme amoindrie s'oppose à la possibilité, pour les ébarbeurs, de trouver du sens à leur geste.

Figure 34 : Exemple d'une surface présentant des crans (geste cobot)

Un ébarbeur (E2) abaisse ses critères de qualité lors du geste cobot de meulage d'une SH : lors de son geste traditionnel, il évoque meuler l'ensemble de la surface sans distinguer partie ébarbée/partie usinée, tandis qu'avec le cobot, il meule principalement la partie devant être ébarbée sans meuler la partie usinée : *«* E2 – *Là c'est bon, là c'est usiné [moitié de la surface]. […] Je casse juste un petit peu ça ira. »* (extrait d'entretiens). Par ailleurs, un ébarbeur (E7) estime une qualité convenable en se référant à une « partie du geste » : il précise que le cobot lui est utile pour dégrossir les défauts présents sur la surface et qu'il réalisera les finitions avec la meuleuse traditionnelle : « E7 – *Là c'est pour dégrossir, impeccable, et après tu finis à la main.* » (extrait d'entretiens). E1 estime également avoir atteint une qualité qui lui convient :

« E1 – *Là c'est bon tu peux laisser comme ça […] si c'est pour moi ça va […] pour moi c'est bon y'a pas de problème. »* (extrait d'entretiens).

3.2 Évolution de la protection de soi

Cette partie s'intéresse au sentiment évoqué par les ébarbeurs de pouvoir se protéger en se soulageant des douleurs de l'appareil locomoteur, en évitant d'adopter des postures contraignantes ou encore en évitant la survenue d'accident lors des gestes traditionnels et lors des gestes cobot.

De manière générale, lors des gestes traditionnels, la possibilité de se protéger est soutenue pour les ébarbeurs par des choix opératoires permis par des caractéristiques de la situation de travail. Ceci leur permet de trouver du sens à leur geste. A l'inverse, lors des gestes cobot, les ébarbeurs évoquent avoir des difficultés pour agir en faveur de leur protection. Ainsi, lors des gestes traditionnels, le sentiment de pouvoir se protéger perçu par l'ensemble des ébarbeurs est lié à la possibilité de se soulager des douleurs ressenties au niveau des poignets en modifiant la position des mains sur la meuleuse : *«* E5 – *Là tu la [meuleuse traditionnelle] tiens par le moteur [deux mains sur le manche] et pis bon t'as pas le poignet cassé. », «* E7 – *Faut que je les bouge, que je les tourne, pour la manipuler parce que tu sais, j'ai mal là [touche son poignet] ! »* (extraits d'entretiens). Un des ébarbeurs réalise également une catachrèse pour éviter de maintenir en continu la gâchette de sécurité enfoncée de la meuleuse traditionnelle : un élastique autour du manche de la meuleuse qu'il glisse sur la gâchette de sécurité : *«* E3 – *Tiens moi j'ai mis un système [rire] […] je glisse et hop je peux tenir tranquille [élastique sur manche] »* (extrait d'entretiens). De plus, le choix de leur positionnement par rapport à la pièce soutient la possibilité de se protéger : ils évitent ainsi d'adopter des postures qu'ils jugent contraignantes notamment vis-à-vis du dos et des bras : *«* E5 – *Faut mieux être assis ça fait moins d'effort pour le dos quoi, le dos pis aussi les bras quoi », «* E3 – *Obligé [d'être assis] sinon c'est encore pire […] Oh là oui ça serait encore pire ! Trop mal au dos ! »* (extraits d'entretiens). Toutefois, deux ébarbeurs mentionnent que ce choix n'est pas sans conséquences ; ils précisent qu'en étant positionnés ainsi, le risque de se blesser est plus important car la meuleuse est plus proche de leur jambe : *«* E7 – *Tu sais il peut t'arriver une*

connerie quand même hein ! Tu sais, t'as beau tenir, la meule elle peut partir. Y'a toujours danger ! » (extrait d'entretiens). Enfin, pour trois ébarbeurs (E2, E3 et E5), l'orientation de la meuleuse – notamment pour le geste de meulage d'une SV – contribue également à la possibilité d'éviter d'adopter des postures contraignantes selon eux : *«* E5 – *On la retourne la meule [côté disque] donc t'as les bras plus bas […] On a moins mal les bras comme ça [côté disque] que comme ça [côté carter] […] On est moins fatigués »* (extrait d'entretiens).

Aussi, la possibilité de modifier le positionnement des mains sur l'outil, la position par rapport à la pièce et l'orientation de la meuleuse permet aux ébarbeurs de soulager les douleurs ressenties et d'éviter d'adopter des postures contraignantes mais augmente cependant le risque d'accident. Avec l'usage du cobot, ces modes opératoires ne sont plus possibles.

En effet, lors des gestes cobot, l'ensemble des ébarbeurs (à l'exception de E1 qui ne l'a pas évoqué) exprime des difficultés pour pouvoir se protéger. Ils expriment ne plus pouvoir se soulager des douleurs ressenties aux poignets en ne parvenant plus à varier le positionnement des mains sur l'outil : *«* E7 – *Il faut toujours tenir c'est casse pied aussi ça ! C'est pas comme euh… Ça n'a rien à voir avec la meule à main quand même t'as vu ? […] Tu vois comment je suis là, je suis pas détendu là, là c'est vraiment…là tu sens le travail que tu fais […] t'as les tendinites qui reviennent », «* E5 – *Le problème c'est qu'il faut serrer […] serrer les mains comme ça, on peut pas hein ! […] 8h comme ça à serrer ! Le lendemain après, on peut plus hein. On a des crampes là [poignets] des crampes dans le dos et tout… »* (extraits d'entretiens). De plus, deux ébarbeurs (E2 et E3) expliquent adopter des postures qu'ils jugent contraignantes en devant se positionner devant la pièce (SV) afin d'éviter d'être « coincés » à l'intérieur de la pièce si jamais le cobot dysfonctionnait : *«* E3 – *Avec le cobot t'es obligé tu vois, de laisser un petit peu de place sinon c'est facile d'avoir un accident », «* E2 – *Y'a la position aussi […] par exemple : si j'étais avec la meule [traditionnelle], je te montre, je serais rentré là [assis sur la pièce, jambe dans le casier pour meuler] et je serais pas fatigué ! Pas mal au dos, pas mal aux bras ! […] Mais là c'est pas possible parce que ça touche là, ça touche là [montre le terminal en buté contre la pièce], et t'es plus fatigué ! »* (extraits d'entretiens). Deux autres ébarbeurs (E5 et E7), en évoquant également ce risque, vont néanmoins se positionner dans la pièce pour réussir à atteindre la

surface à meuler : *«* Clara – *Tu t'es mis à l'intérieur là ?* E5 – *Bah oui j'avais pas les bras assez longs […] normalement on ne devrait pas parce qu'on sait jamais. S'il coince ou part n'importe où, on se retrouve coincé mais bon ! On a pas le choix quoi ! […] Quand t'es là [côté intérieur pièce], tu peux encore te barrer, tu t'en vas mais quand t'es dedans t'es dedans hein !* Clara – *Normalement t'évites de te mettre dedans ?* E5 – *Bah quand c'est des petites pièces ouais mais quand c'est des grosses t'es bien obligé de rentrer dedans hein sinon tu peux rien faire. »* (extrait d'entretiens). Enfin, notamment lors du geste cobot de meulage d'une SV, l'ensemble des ébarbeurs (à l'exception de E1) évoque le risque que le disque n'éclate et se projette potentiellement sur eux : *«* E7 – *Faut faire gaffe parce que […] le disque il peut péter et partir en lambeaux ! […] tu dois bien les sentir quand ils viennent sur ton corps »* (extraits d'entretiens).

Cependant, contrairement à ses collègues, E1 a le sentiment de pouvoir se protéger lorsqu'il travaille avec le cobot. Il explique éviter d'adopter une « mauvaise posture » en précisant que le cobot « ne souhaite pas » qu'il ait mal au dos : *«* E1 – *Il faut toujours être comme ça [devant la pièce] sinon c'est pas bon, lui [le cobot] il veut pas, tu vois « c'est pas bon de travailler comme ça, ça va te faire mal au dos ! » »* (extrait d'entretiens). De même, il explique que si le disque venait à casser, le cobot « éviterait » qu'il se projette sur lui : *«* E1 – *Quand tu travailles comme ça [orientation horizontale] tu peux, comme ça [orientation verticale] c'est pas bon.* Clara – *C'est pas bon ? E1 – Non, si jamais le disque il casse, s'il casse il tape là [mime mouvement vers lui] et lui [le cobot] il veut pas. »* (extrait d'entretien).

3.3 Émergence d'empêchement

Lors des gestes traditionnels, aucun empêchement n'a été relaté spontanément par les ébarbeurs. En revanche, lors des gestes cobot, l'ensemble des ébarbeurs (à l'exception de E1) évoque des empêchements concernant différents éléments (cf. Tableau 24) :

- Ne plus pouvoir modifier le positionnement de leurs mains sur l'outil comme ils le voudraient : *«* E3 – *On peut pas lâcher […] Obligé de serrer les poignées là […] parce que tu bouges de 2mm, 3mm hop ! Il s'arrête, obligé de tenir comme ça : [montre main très fermées] »* (extrait d'entretiens)

- Ne plus pouvoir orienter la meuleuse en fonction des besoins : « Clara – *Et là le disque il reste toujours comme ça [perpendiculaire] ?* E3 – *Toujours comme ça ouais ! […] Tu peux tourner un petit peu mais tu peux pas tourner beaucoup, légèrement comme ça mais pas comme à la main […] Avec ça [cobot], c'est pas possible : avec la main libre on peut tourner la meule, avec ça on peut pas... »* (extrait d'entretiens)

- Ne plus pouvoir varier la direction et l'amplitude des mouvements à réaliser : « E2 – *Meuler comme ça [droite gauche], comme ça [haut bas], c'est pas possible avec le cobot »*, « E3 – *À la main plus vite ou moins vite mais avec le cobot, on peut pas faire ça […] [rire] Avec le cobot : faire comme le cobot ! […] T'as compris qu'est-ce que je dis ? [rire] »*, « E7 – *Non c'est comme ça, le cobot tu peux pas aller plus vite, je te l'ai dit : il est pas fait pour aller plus vite »* (extraits d'entretiens)

- Ne plus pouvoir choisir son positionnement par rapport à la pièce : « E5 – *On peut pas travailler comme ça comme on veut, avec la meule tu te mets comme ça [assis mime dos droit]. Là tu peux pas faut toujours être comme ça [courbé] […] C'est pas la même position de travail quoi ! »* (extrait d'entretiens)

- Être empêché pour maintenir le disque en contact sur la surface à cause du bras du cobot : notamment pour SH : « E5 – *On peut pas revenir pareil quoi […] c'est plutôt embêtant »* (extrait d'entretien), etc.

Tableau 24 : Empêchements évoqués par les ébarbeurs

	SURFACE VERTICALE	
	Geste traditionnel	Geste cobot
E2	Non évoqué	position des mains, orientation de la meuleuse, direction et amplitudes des mouvements, position par rapport à la pièce
E3		
E5		
E7		
E1	Non observé	Non évoqué
	SURFACE HORIZONTALE	
	Geste traditionnel	Geste cobot
E2	Non évoqué	position bras du cobot, types et amplitudes des mouvements
E3	Non évoqué	position bras du cobot, position des mains, postures adoptées, types et amplitudes des mouvements
E5	Non évoqué	position bras du cobot, position des mains, directions et amplitudes des mouvements
E7	Non évoqué	position des mains, orientation de la meuleuse, directions et amplitudes des mouvements, position par rapport à la pièce
E1	Non observé	Non évoqué

3.4 Évolution des émotions ressenties

De manière générale, les émotions ressenties sont estimées plus négatives lors des gestes cobot que lors des gestes traditionnels (cf. Figure 35). En effet, lors des gestes traditionnels les ébarbeurs estiment ressentir des émotions un peu négatives à positives (de 3±1,6 à 5,9±0,5), tandis que celles ressenties lors de l'usage du cobot sont estimées comme un peu négatives (de 3±2 à 3,9±1,5). Cependant un ébarbeur (E7) estime ressentir des émotions légèrement plus positives lors des gestes cobot ainsi que E3 lors du geste cobot de meulage d'une SV. De plus, que ce soit lors des gestes traditionnels ou cobot, les émotions ressenties sont estimées plus négativement lors du meulage d'une SV qu'une SH (cf. Figure 35).

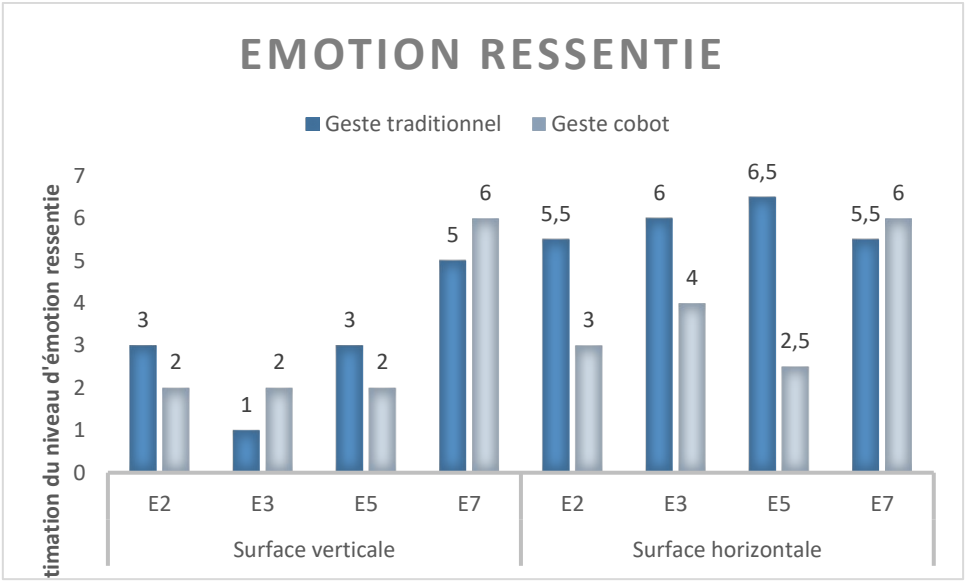


Figure 35 : Estimation des émotions ressenties par les ébarbeurs

Lors du geste traditionnel de meulage d'une SV, l'ensemble des ébarbeurs (à l'exception de E7) estime ressentir des émotions négatives (cf. Tableau 25). À l'inverse, pour la surface horizontale, ils estiment tous ressentir des émotions positives. Cette différence est liée à la peur de se blesser lorsqu'ils meulent la SV : « E3 – *Tu penses toujours que la meule ; elle peut venir sur moi ou sur la jambe. Des fois, un collègue il meulait et il s'est coupé là [montre le genou], genou ouvert hein… Oui parce que des fois ça arrive…* » (extrait d'entretien), tandis que pour la SH, ils ressentent une certaine satisfaction car ils considèrent que cette surface est la plus facile à meuler : « E2 – *Là je suis content* », « E3 – *Si on avait que des trucs plats [SH] à faire, là, on serait contents [rire]* » (extrait d'entretien).

Tableau 25 : Types d'émotions ressenties lors des gestes traditionnels et lors des gestes cobot

	SURFACE VERTICALE	
	Geste traditionnel	Geste cobot
E2	peur (de se blesser)	peur (non-qualité), frustration (durée)
E3		peur (non-qualité et sécurité), énervement (dysfonctionnement), frustration (durée et qualité)
E5		peur (non-qualité et sécurité), énervement (santé), frustration (durée et qualité)
E7		satisfaction partielle (aide physique pour dégrossir), peur (non-qualité et sécurité), frustration (qualité)
E1	Non observé	satisfaction (santé), fierté
	SURFACE HORIZONTALE	
	Geste traditionnel	Geste cobot
E2	satisfaction (surface facile à meuler)	frustration (durée)
E3		peur (non-qualité et sécurité), énervement (dysfonctionnement), frustration (durée)
E5		peur (non-qualité et sécurité), énervement (santé), frustration (durée et qualité)
E7		satisfaction (aide physique), frustration (qualité)
E1	Non observé	satisfaction (santé), fierté

Lors du geste cobot de meulage d'une SV, trois ébarbeurs estiment ressentir des émotions négatives tandis qu'à l'inverse, E7 ressent des émotions positives. Concernant le type d'émotions ressenties :

- Tous (à l'exception de E1) éprouvent la peur de faire de la non-qualité : « E5 – T'*as toujours peur qu'il se coince ou qu'il rentre dedans ou n'importe quoi* » (extrait d'entretien) mais également la peur vis-à-vis de leur sécurité (à l'exception de E2 qui ne l'a pas exprimée) : « E3 – *Moi, quand je travaille avec ça [cobot], j'ai peur…* » (extrait d'entretien)

- Ils ressentent également de la frustration vis-à-vis de la durée de leurs gestes et/ou de la qualité du meulage : « E5 – *J'ai mis plus de temps qu'aurait fallu et pis c'est pas fini hein ! […] Si c'est pour mettre 8h pour retirer une bosse, bon c'est pas la peine !* », « E2 – *Moi, en 1h j'aurais fini avec ça [cobot] 2h, 3h fini ! […] et après je dois encore repasser à la main derrière* » (extrait d'entretien)

- De l'énervement est également perçu par deux ébarbeurs (E3 et E5). L'un le relie aux fonctionnalités du cobot (exigences de sécurité des poignées, mise en dysfonctionnement…) : « E3 – *Tu commences [à meuler] et hop ! Ça coupe !* Clara – *Et tu le vis comment toi ça ?* E3 – *Et bah je m'énerve ! [rire] Après je me dis pourquoi*

travailler avec le cobot ? » (extrait d'entretien). Le second a le sentiment de ne pas améliorer sa santé lors de son geste cobot : *«* E5 – *[T'as] plus mal les bras, mal le dos…pis bon t'es plus énervé hein ! Quand on a mal quelque part fin bon voilà quoi… […] »* (extrait d'entretiens).

- Deux ébarbeurs (E7 et E1) ressentent de la satisfaction en lien avec le sentiment que le cobot est une aide physique (satisfaction partielle pour E7 en se référant à l'étape de « dégrossissage de la surface ») : « E7 – *Là c'est pour dégrossir, impeccable* […] *avec le cobot c'est super bien pour faire ça ! […] Ah oui oui moi j'aime bien ! […] Là je sais que ça m'aiderait bien tu vois ! », «* E1 – *T'as vu comme on pousse nous [geste traditionnel] ? Avec le cobot, c'est lui, ça va tout seul ! »* (extraits d'entretiens).

- E1 ressent également de la fierté d'avoir compris comment travailler avec le cobot : *«* E1 – *Les autres, ils comprennent pas le travail ! […] Moi je sais comment faire […] Moi je le connais maintenant. »* (extrait d'entretiens).

3.5 Évolution de la reconnaissance du geste

Cette partie porte sur la reconnaissance du geste perçue par les ébarbeurs vis-à-vis des collègues et de la hiérarchie. Ces éléments ont été évoqués particulièrement par deux ébarbeurs (E2 et E3) et contribuent à donner du sens à leurs gestes (cf. Tableau 26).

Tableau 26 : Reconnaissance du geste perçue par les ébarbeurs

<table>
<tr><th></th><th colspan="2">SURFACE VERTICALE ET HORIZONTALE</th></tr>
<tr><th></th><th>Geste traditionnel</th><th>Geste cobot</th></tr>
<tr><td>E2</td><td>Être reconnu par ses collègues comme celui qui va le plus vite de l'atelier</td><td>Perception d'une perte de cette reconnaissance par ses collègues</td></tr>
<tr><td>E3</td><td>Être reconnu par sa hiérarchie comme faisant un travail de qualité</td><td>Perception d'une perte de cette reconnaissance par sa hiérarchie</td></tr>
<tr><td>E5</td><td rowspan="2">Non évoqué</td><td rowspan="3">Non évoqué</td></tr>
<tr><td>E7</td></tr>
<tr><td>E1</td><td>Non observé</td></tr>
</table>

Ainsi pour un ébarbeur (E2), la possibilité de trouver de la reconnaissance par l'intermédiaire de son geste réside dans le fait d'être celui travaillant le plus rapidement de l'atelier. Il dit en effet, qu'il est reconnu par ses collègues et son encadrement comme celui

capable de meuler le plus rapidement : « E2 – *Moi, ça fait presque 12 ans que je travaille ici, j'ai toujours plus travaillé, toujours plus jusqu'à maintenant, toujours plus que les autres, toujours plus ! Tout le monde le sait ! […] Par exemple cette pièce-là [me montre la pièce devant nous] sur les 16 casiers, moi je vais t'en meuler 12 casiers ! [avec fierté]* Clara – *Sur 16 ?* E2 – *Ouais les 12 casiers je te jure ! »* (extraits d'entretiens). À l'inverse, avec le cobot il ne parvient plus à être le plus rapide et perd cette reconnaissance. Il a alors le sentiment que ce n'est plus lui qui travaille mais le cobot : « E2 – *Tu me donnes ça [cobot], je travaille mais j'avance pas. Tout le monde sait que c'est pas moi qui travaille comme ça […] C'est le cobot qui travaille comme ça ! […] Même moi je force, je force […] Je vais moins vite quand même, c'est le cobot ! […] Moi en 1h c'est fini avec ça [cobot] 2h, 3h fini […] Après encore faut repasser à la main derrière ! »* (extrait d'entretiens).

Un autre ébarbeur (E3) évoque quant à lui la reconnaissance de son geste traditionnel par son encadrement. Il exprime en effet qu'il a le sentiment d'être reconnu par son chef lorsque que celui-ci passe dans l'atelier : « E3 – *Quand le chef il passe [et que je travaille avec la meuleuse traditionnelle], peut être qu'il dit rien mais il se dit « Oh il a bien avancé » par exemple, il peut penser ça et moi je suis content ! »* (extrait d'entretiens). Tandis que lors de l'usage du cobot, il perd ce sentiment de reconnaissance en expliquant avoir le sentiment que son chef n'est pas autant satisfait de son travail lorsqu'il utilise le cobot : « E3 – *Quand il vient et que je travaille avec la machine [le cobot] pfff ! J'ai meulé un peu ici, ici mais après, on peut pas meuler et tout…moi j'aime pas ! […] Pour moi, travailleur, c'est pas pour moi ça. […] Moi je suis un travailleur, un bosseur, avec ça [cobot] c'est pas la peine ! »* (extrait d'entretiens). Il exprime que le cobot rend moins efficace son travail et que cela peut jouer sur la reconnaissance de son travail par l'encadrement.

Synthèse

L'évolution de la dimension psycho-sociale a été décrite à partir de cinq composantes analysées lors des gestes traditionnels et lors des gestes cobot. Les résultats montrent alors que la qualité perçue par les ébarbeurs est moins satisfaisante lors des gestes cobot que lors des gestes traditionnels. De plus, lors des gestes traditionnels, les opérateurs ont le sentiment de pouvoir se protéger en se soulageant des douleurs ressenties et en évitant d'adopter des postures contraignantes. À l'inverse, cette possibilité de se protéger est moins présente lors des gestes cobot puisqu'un seul ébarbeur exprime pouvoir éviter d'adopter des postures contraignantes. Il a également été montré que de l'empêchement est vécu par les ébarbeurs, ils se sentent limités lors de l'usage du cobot à l'exception d'un ébarbeur qui n'en a pas parlé. Concernant les émotions ressenties, elles sont estimées comme plus négatives lors des gestes cobot et se traduisent notamment par des ressentis de peur et d'énervement. Toutefois, deux ébarbeurs évoquent également ressentir des émotions positives liées à une aide physique partielle lors de l'usage du cobot ; et pour l'un d'entre eux, liées aussi à la fierté d'avoir compris comment travailler avec le cobot. Enfin, cette partie des résultats montre que, pour deux ébarbeurs, la reconnaissance du geste diminue lors de l'usage du cobot. Avec celui-ci, ils perdent le sentiment d'être reconnus par leurs collègues comme, par exemple, étant celui qui travaille le plus rapidement de l'atelier et/ou par la hiérarchie, avec l'impression que l'encadrement n'est plus autant satisfait du travail réalisé. Les résultats sur l'évolution de la dimension psycho-sociale montrent alors que le sens donné au geste évolue lors de l'usage du cobot. Car les individus n'ont pas pu atteindre leurs objectifs finaux : faire un travail de qualité, se protéger, être performants ou encore être reconnus par l'intermédiaire du geste réalisé.

Chapitre 10 : Évolution de l'articulation des dimensions du geste professionnel

Le chapitre précédent a mis en évidence l'évolution de chacune des composantes des trois dimensions du geste : biomécanique, cognitive et psycho-sociale. Cette étape était nécessaire pour comprendre l'évolution de chacune des dimensions et pouvoir maintenant les articuler au sein du geste professionnel. Ce chapitre porte sur l'évolution du geste dans l'articulation de ses dimensions biomécanique, cognitive et psycho-sociale. Pour ce faire, le chapitre se divise en trois parties. Chacune d'elles présente un exemple d'articulation différent choisi au regard de la problématique et pour sa pertinence du point de vue de la prévention des TMS. Les effets sur l'individu et la performance constatés sont présentés et intégrés aux récits. De plus, les caractéristiques de la situation de travail et/ou propres aux individus qui expliquent l'évolution du geste sont également explicités. Une synthèse de chacune des parties est proposée. Ce chapitre se clôture par une synthèse globale reprenant le modèle théorique précisé à partir des résultats sur l'évolution du geste constatée et l'ensemble des caractéristiques (de la situation de travail et propres aux individus) influençant l'évolution de l'articulation des dimensions du geste.

1. Articulation de la dimension biomécanique avec les autres dimensions du geste professionnel

Cette première partie décrit une articulation du geste combinant la dimension biomécanique – « effort » et « posture adoptée » –, la dimension cognitive – « recueil d'informations sensorielles », « traitement d'information et prise de décision » – et la dimension psycho-sociale – « empêchement », « protection de soi » et « émotion ».

Ainsi, il a été montré précédemment que l'effort global ressenti par les ébarbeurs diminue lors de l'usage du cobot mais de façon relativement faible. En effet, en analysant cette composante au sein du geste professionnel, il apparaît que l'effort lié au port de l'outil soit

réduit mais que trois nouveaux types d'efforts ressentis par les ébarbeurs émergent lors de l'usage du cobot.

Les exigences de sécurité des poignées du cobot demandent à ce que les boutons situés sous les deux poignées soient maintenus enfoncés pour que le cobot se mette en fonction (caractéristiques de la situation de travail). Les ébarbeurs doivent donc appliquer en continu un effort supplémentaire de faible intensité et maintenu durant la totalité des gestes cobot pour maintenir enfoncés ces boutons (dimension biomécanique). Ce positionnement obligatoire des mains sur les poignées du terminal du cobot (cf. partie 1.2 chapitre 8) empêche les individus de varier le positionnement des mains sur le terminal et donc la possibilité de pouvoir soulager les douleurs au niveau des poignets (dimension psycho-sociale) (cf. chapitre 8). Par conséquent, ils disent ressentir, lors de l'usage du cobot, des douleurs aux poignets réactivées voire exacerbées alors que celles-ci ne sont pas ou peu exprimées suite au geste traditionnel (effet sur l'individu). L'analyse descriptive des postures adoptées par les poignets lors des gestes cobot montre bien qu'ils sont très sollicités d'un point de vue biomécanique (notamment en abduction >0° et flexion/extension >15°) (dimension biomécanique) :

[verbatim sur le geste traditionnel]

Clara – *Des fois tu tiens la meule [traditionnelle] avec vraiment les deux mains comme ça [schéma 2 mains sur le manche] ?*

E7 – *Dessus c'est pas ça ?*

Clara – Ouais tu mets tes mains comme ça là

E7 – *Ouais*

Clara – *Tu pourrais pas les mettre tout le temps comme ça [schéma 1 main sur le manche 1 main sur la poignée auxiliaire] ?*

E7 – *Non non* ***faut que je les bouge, que je les tourne, pour la manipuler parce que tu sais j'ai mal là [touche son poignet]***

[verbatim sur le geste cobot]

Clara – *Et là [avec le cobot] t'as vu y'a des fois où tu t'arrêtes ?*

E7 – *Parce que c'est la poignée, c'est le cobot attention c'est ça aussi* ***ces poignées de merde*** *là, excuse-moi l'expression mais…* […] ***il faut toujours appuyer*** *[mime mains fermées sur poignées].*

Tu peux pas faire comme tu veux là, t'es obligé d'appuyer *[sur les boutons sous les poignées] et j'vais te dire* ***t'as les tendinites qui reviennent hein [touche son poignet]****.* (extrait d'entretiens)

Cet effort de maintien des poignées (dimension biomécanique) augmente la concentration lors des gestes cobot. Les ébarbeurs estiment en effet que le niveau de concentration est plus élevé que lors des gestes traditionnels (dimension cognitive). La concentration se focalise sur « bien garder les mains serrées sur l'outil » pour « maintenir en fonction le cobot ». Ce qui donne lieu à de l'énervement du fait de devoir fournir une attention supplémentaire et de ne pouvoir agir en faveur de leur protection (dimension psycho-sociale) :

E3 – *C'est pas pareil qu'à la main, parce que c'est chiant tu sais, les boutons à tenir la comme ça faut que tu sois bien concentré…****avec ça [cobot] t'es plus concentré qu'à la main libre [geste traditionnel]*** *[…] y'en a qu'un qui bouge [boutons sous les poignées] et ça y est il arrête aussitôt ! Parce que nous, avec la meule [traditionnelle], on peut démarrer et hop ! […]*

Clara – *Alors qu'avec le cobot tu dois maintenir les boutons c'est ça ?*

E3 – *Bah avec le cobot t'es obligé de tenir les boutons, y'en a qu'un qui bouge et ça y est. Tu te rappelles plus là haut ?*

Clara – *Si si.*

E3 – *Bah ouais c'est pour ça moi je dis faut diminuer les boutons parce que* ***c'est chiant, tu dois toujours tenir… [mime mains serrées sur les poignées] Ça aussi c'est dur parce que t'as toujours la main fermée !***

Clara – *Parce que là [meulage trad.] des fois tu bouges tes mains sur la meuleuse non ?*

E3 – *Oui voilà là, on peut tourner à droite à gauche, qu'avec cobot****… [rire] cobot : faire comme le cobot ! […] T'as compris qu'est-ce que je dis ? [rire] Lâche pas la main parce elle bouge un petit peu la main et hop ça s'arrête aussitôt****.*

Clara – *Donc tu dois toujours avoir les mains fermées sur les poignées ?*

E3 – *Oui voilà… […] C'est pas pareil qu'à la main libre tu sais là ! […]* ***Tu commences…tu commences et hop ! Ça coupe, ça coupe !***

Clara – *Et tu le vis comment toi ça ?*

E3 – *Et bah,* ***je m'énerve ! [rire] Après je me dis pourquoi travailler avec le cobot ?*** (extrait d'entretiens)

De plus, l'analyse du geste montre qu'un autre type d'effort émerge lors de l'usage du cobot : un effort de retenue notamment lors du geste de meulage d'une SV (dimension biomécanique). Cet effort est défini comme le fait de devoir exercer un effort dans la direction inverse du mouvement initié par le bras en tentant de « retenir » le terminal du cobot. Le cobot est muni d'un dispositif détectant le mouvement de l'opérateur, qui est ensuite interprété par un système de commande pour générer le mouvement « réel » du cobot (caractéristiques de la situation de travail). C'est ce mouvement que les ébarbeurs initient puisqu'ils tentent de retenir (dimension biomécanique). Il est alors à l'opposé de celui qu'ils exercent lors du geste traditionnel de meulage d'une SV où ils appliquent un effort d'appui important sur la meuleuse traditionnelle (dimension biomécanique). L'analyse du geste montre alors que cet effort est en lien avec de l'empêchement vécu par les ébarbeurs de pouvoir incliner le disque par rapport à la SV comme ils le souhaiteraient (dimension psycho-sociale). L'encombrement du terminal du cobot et les limites fonctionnelles d'orientation du terminal, couplés à l'exiguïté de la pièce meulée (caractéristiques de la situation de travail), ne permettent pas aux ébarbeurs d'orienter la meuleuse comme ils le voudraient. Ils ne peuvent alors pas orienter le disque <30° par rapport à la surface et doivent meuler la SV avec le disque presque perpendiculaire (60°-90°) à la surface (dimension psycho-sociale) (cf. Figure 36).

Figure 36 : Illustration des inclinaisons du disque lors du geste cobot (à gauche) et lors du geste traditionnel (à droite)

Or, lors du geste traditionnel, les ébarbeurs alternent des inclinaisons du disque entre 0° et 90° afin d'atteindre la qualité souhaitée (dimension cognitive) (cf. Figure 36): les inclinaisons

>30° permettent d'enlever le plus gros du défaut tandis que les inclinaisons <30° permettent de lisser l'ensemble de la surface :

[verbatim sur le geste traditionnel]

E5 – *On met* **comme ça [montre sur le schéma >30°] déjà pour enlever le plus gros et après une fois que c'est presque fini on meule à plat comme ça [0°-30°]** *[…] le disque attaque mieux quand il est comme ça [>30°] qu'à plat quoi et* **après on reprend à plat pour euh…pour égaliser** *quoi.*

Clara – *Ah d'accord donc quand tu fais comme ça [>30°], c'est pour enlever le gros du défaut ?*

E5 – *[hoche la tête pour dire oui]*

Clara – *D'accord parce que si tu avais fait cette surface là [SV] tout le temps euh comme ça [0°-30°]?*

E5 – *Tout le temps comme ça ? Bah ça aurait été mais c'est beaucoup plus long quoi, que là tu le mets un peu en biais et ça enlève mieux la bosse.*

Clara – *Et si tu avais été tout le temps comme ça [60°-90°] ?*

E5 – *Bah tu peux faire des crans quoi […]*

[verbatim sur le geste cobot]

E5 – ***C'est pas évident de travailler tout le temps comme ça [60°-90°] c'est dangereux, trop dangereux*** *[…] Les disques sont tellement fins que, si le machin il se coince ou n'importe, bah ça pète hein ! […]* **le temps qu'on réagisse bah le machin il pète hein […] ou si tu rentres dedans bah voilà quoi tu fais un cran la dedans et voilà** *!*

Clara – *D'accord ok je comprends*

E5 – *Bah* **là je vais te dire : je suis plus concentré hein parce qu'on a toujours peur de rentrer dedans quoi !**

Clara – *D'accord le risque il est supérieur là ?*

E5 – *Ah oui supérieur […]* **Parce que là [SV] si tu fais un cran dedans, après pour le retirer, tiens [signe avec la main pas facile], tu vas passer une demi-heure à retirer un cran quoi***.* (extrait d'entretiens)

À cela s'ajoute que la démultiplication de l'effort et l'aspect antivibratoire du cobot (caractéristiques de la situation de travail) diminuent le ressenti tactile du disque en contact de la surface et donne lieu à une modification des repères sensoriels des ébarbeurs avec l'usage du cobot par rapport au geste traditionnel (dimension cognitive). Les ébarbeurs appréhendent

alors de faire de la non-qualité (dimension psycho-sociale). Ils ont également peur que le disque ne casse et se projette potentiellement sur eux (dimension psycho-sociale). En conséquence, un sentiment d'insécurité émerge lors de l'usage du cobot (effet sur l'individu) :

E7 – ***C'est pas évident hein ! Parce que là c'est euh…c'est du vrai caoutchouc [la pièce] Là je dois retenir le truc hein*** *[terminal du cobot]*

Clara – *C'est du caoutchouc la pièce ?*

E7 – *Ouais si t'appuies trop bam tu descends hein ! [rire] ah mais je te dis ! Parce euh…c'est bizarre quoi mais je veux dire,* ***tu sens la matière euh…elle est comme du chewing-gum.***

Clara – *Avec le cobot ? A la main aussi, tu sens que c'est du chewing-gum ?*

E7 – *Non non non avec le cobot,y'a des fois y'a des pièces où tu te dis merde euh, l'alliage, il est bizarre mais euh…non non.*

Clara – *Oui, on en avait parlé la dernière fois, tu sais le retour que tu as quand t'as le disque sur la pièce c'est ça ; t'as moins ce retour ?*

E7 – *Oui, là, non* ***t'as pas de retour****.* ***[…]*** *Tu vois là [écran] là je suis hésitant là. C'est le disque ! T'as vu comment il est en plus [mime perpendiculaire à la surface] Regarde tu vois* ***après je vais même m'arrêter parce que j'ai failli…***

Clara – *Oui là, tu m'avais dit que tu avais fait un cran en essayant de remonter*

E7 – *Ouais là, et là j'abandonne là non ? [rire]*

Clara – *Euh…encore 15 sec [rire]*

E7 – *Parce que je te dis…tu rentres tu…pfff…parce que un tout petit coup comme ça comme un con hop ! Tu rentres, ouais ouais je te jure ça va vite ! […] Et même* ***faut faire gaffe parce que tu peux péter le disque*** *[…] Surtout sur les trucs comme ça [surface verticale] surtout quand tu meules comme ça,* ***le disque il peut péter et partir en lambeaux ! […] tu dois bien les sentir quand ils viennent sur ton corps.***

Clara – *Donc là il faut faire attention à pas casser le disque ?*

E7 – *Oui, surtout à* ***pas forcer*** *et en plus quand tu pousses avec la meule ça peut arriver si tu forces comme un…idiot.* ***On peut rentrer dans la pièce je te dis c'est dangereux hein*** *! Regarde là je meule comme ça [montre l'écran]* ***j'essaie de le retenir en même temps. Parce que tu le lâches là, il te rentre dedans hein ! Là je tiens à deux mains, t'as vu là [rire], là je tiens là ! […] Sinon tu rentres dedans, tu coupes la pièce*** *[…] Bah oui, celui qui a pas l'habitude, il rentre dans la pièce hein…* (extrait d'entretiens)

Cet effort de retenue peut alors expliquer les postures adoptées notamment par les épaules en abduction qui se situent dans des zones à risque (>60°) ou devant être évitées (20°-60°) pour la prévention des TMS (dimension biomécanique). De plus, le traitement d'information et la décision prise concernant les mouvements à effectuer sont également en lien avec ce nouveau type d'effort. Lors du geste traditionnel, les ébarbeurs réalisent des mouvements alternatifs, tandis que lors du geste cobot, ils vont privilégier des mouvements dans une direction unique afin d'éviter de rentrer dans la pièce (dimension cognitive) (cf. articulation présentée dans la partie 3 du chapitre 10).

Enfin, un autre type d'effort émerge notamment lors du geste cobot de meulage d'une SH ; il s'agit d'un effort de positionnement (dimension biomécanique). Le bras du cobot est composé de sept articulations pourvues chacune d'un moteur (caractéristiques de la situation de travail) : les ébarbeurs évoquent alors que, dès qu'ils vont bouger le terminal du cobot, l'ensemble des articulations du bras poly-articulé du cobot va se mouvoir. Ils doivent alors appliquer un effort supplémentaire (dimension biomécanique) pour réussir à repositionner le disque sur la surface au même niveau que le meulage initié sans risquer de faire de la non-qualité en creusant la pièce (dimension psycho-sociale). Aussi, ils ne peuvent pas avoir un contact permanent du disque sur la surface (dimension psycho-sociale) :

E5 – *C'est tout l'ensemble [montre le bras du cobot] qu'il faut tirer quoi…c'est-à-dire qu'à chaque fois qu'on veut se déplacer, faut le bouger…pis bon eh faut le remuer ce machin ! […] C'est pas spécialement euh…la meule mais* **c'est tout l'ensemble qu'il faut tirer […] Parce qu'il se tourne là, il se tourne là, il se tourne là [montre articulation du bras cobot]** *donc il faut tirer, pis bon, suivant comment ça se met, bah il faut tirer plus fort quoi… C'est pas évident…* **T'as toujours un effort à faire pour le retenir, le reculer…et le remettre pareil !** *Que la meule [trad.] t'as plus facile à la reposer, que le cobot…* **quand on se retire bah tout le bras bouge, alors des fois je vais te dire pour le remettre, pour retrouver la bonne position… [signe que c'est éprouvant]**

Clara – *Ah t'as du mal à revenir à la même hauteur ?*

E5 – *Bah voilà* **pour retrouver le même endroit quoi, le même niveau, tiens [signe avec sa main]. Bon pis bon il s'y remet pas automatiquement non plus hein !**

Clara – *C'est ce que tu me disais ? Qu'avec le cobot dès que tu vas le bouger, enfin dès que tu le recules, tout le bras bouge c'est ça ?*

E5 – *Ouais ouais, pis bon il se met euh…différemment quoi,* **suivant comment le bras est tourné, bon bah il va reculer différemment quoi**. *Aussi bien le ré-avancer* **des fois on croit qu'il va aller droit pis bon si le bras est un peu tordu, ça va repartir un peu en biais donc il faut le ramener […] On peut pas revenir pareil quoi** *[…] c'est plutôt embêtant quoi parce que bon, c'est toujours pareil le disque il tourne vite,* **tu tapes la dedans bon le disque peut péter ou tu fais un cran** *ou…voilà quoi. Pis bon le cran, si on peut le retirer ça va mais des fois bon bah* **s'il est mal placé bah voilà il reste là quoi**. *Pis bon* **faut pas non plus trop trop creuser parce que bon y'a quand même des côtes à respecter quoi, on peut pas faire un trou hein !** *[…] faut que ce soit bien plat et pis bon faut pas non plus trop trop retirer quoi. Quand c'est de l'acier ils peuvent souder que là, c'est de la fonte ils peuvent pas resouder »* (extrait d'entretiens)

Cet effort de positionnement donne lieu à l'adoption de postures différentes au niveau des coudes : lors du geste traditionnel les coudes sont en extension tandis qu'ils sont en flexion lors du geste cobot (dimension biomécanique).

Enfin, l'émergence de ces nouveaux types d'effort lors de l'usage du cobot pourrait en partie expliquer la délocalisation des douleurs ressenties au niveau des poignets (effort de maintien) et des avant-bras (effort de retenue et de positionnement) qui n'ont majoritairement pas été exprimées lors des gestes traditionnels (cf. Tableau 27).

Tableau 27 : Douleurs ressenties suite aux gestes traditionnels et aux gestes cobot (schéma corporel)

	SURFACE VERTICALE	
	Geste traditionnel	Geste cobot
E2	Dos et épaules	Dos, épaules, *avant-bras* et *poignets*
E3	Dos, épaules et poignets	Dos, épaules et poignets
E5	Dos, coudes, épaules et poignets	Dos, *avant-bras* et poignets
E7	Dos et épaules	Dos, épaules, *avant-bras* et *poignets*
	SURFACE HORIZONTALE	
	Geste traditionnel	Geste cobot
E2	Pas de douleurs	*Poignets*
E3	Dos et épaules	Dos, épaules et *poignets*
E5	Dos, épaules et coudes	Dos, *avant-bras* et *poignets*
E7	Dos et épaules	Dos, *avant-bras* et *poignets*

Synthèse

Ce premier exemple d'articulation de la dimension biomécanique avec les autres dimensions (cf. Figure 37) met en évidence que, lors de l'usage du cobot, la faible réduction de l'effort global ressenti par rapport aux gestes traditionnels, peut s'expliquer par l'émergence de nouveaux efforts. Ces derniers sont eux-mêmes liés à la diminution du recueil d'une information tactile (retour d'effort/vibrations) articulée avec les traitements d'informations et décisions prises (doser l'effort et privilégier des mouvements dans une direction unique). Ces nouveaux efforts sont également liés à de l'empêchement (positionnement des mains sur l'outil, orientation de la meuleuse et contact permanent du disque sur la surface) et au ressenti d'émotions négatives (peur non-qualité et sécurité et énervement). La protection de soi s'avère alors diminuée, la concentration augmente et les postures adoptées peuvent se révéler plus sollicitantes (poignets, épaules et coudes) pour maintenir ces nouveaux efforts. Ainsi, lors de l'usage du cobot, les douleurs ressenties par les opérateurs se localisent au niveau des poignets et des avant-bras et un sentiment d'insécurité s'installe. De plus, la qualité du meulage se révèle amoindrie par la présence de crans sur la surface meulée. Cette approche articulée des dimensions biomécanique, cognitive et psycho-sociale permet d'interroger une diversité d'éléments à prendre en compte pour agir en matière de prévention des TMS. Les éléments influençant l'évolution constatée dans ce premier exemple d'articulation concernent tout d'abord les exigences de sécurité des poignées du terminal du cobot qui font émerger un effort de faible intensité maintenu dans le temps et oblige à garder le même positionnement des mains sur l'outil. De plus, l'architecture du bras poly-articulé ne permet pas d'avoir un contact permanent du disque sur la surface entraînant des risques de faire de la non-qualité et faisant émerger un autre effort supplémentaire. La démultiplication de l'effort et la diminution des vibrations permises par ce cobot permettent certes, de diminuer l'effort lié au port de l'outil mais, plus de recueillir l'information tactile utile à la réalisation du meulage. Des caractéristiques du cobot se couplent enfin aux caractéristiques des pièces : l'encombrement du terminal du cobot et les limites fonctionnelles d'orientation du terminal couplés à l'exiguïté des pièces notamment pour le meulage des surfaces verticales empêche l'orientation de la meuleuse et donc d'incliner le disque par rapport à la surface selon les besoins du meulage entraînant des risques de faire de la non-qualité et renforçant le besoin d'exercer encore un autre effort supplémentaire.

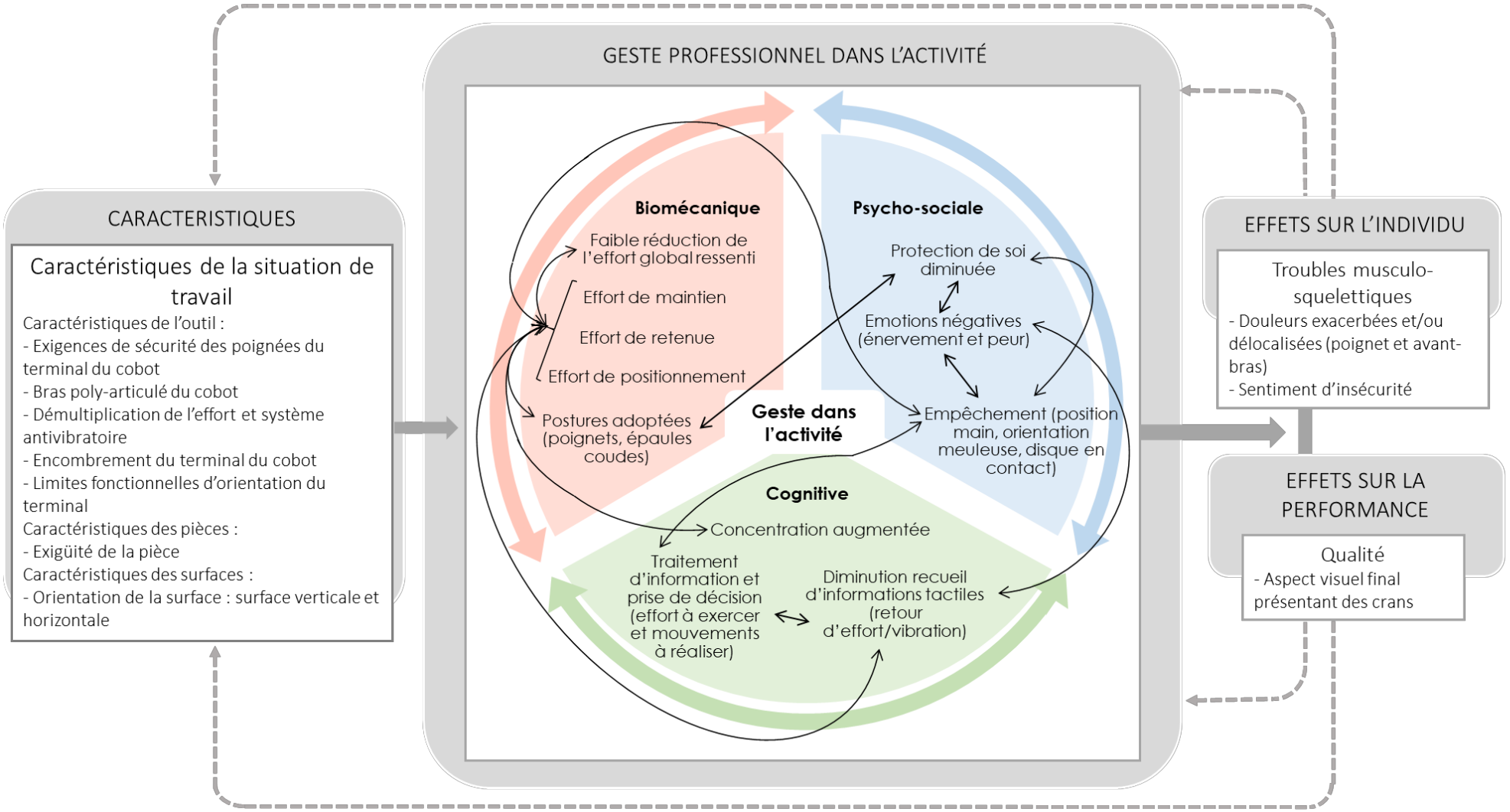


Figure 37 : Schématisation de l'articulation de la dimension biomécanique avec les autres dimensions du geste professionnel

2. Articulation de la dimension cognitive avec les autres dimensions du geste professionnel

Cette deuxième partie montre un autre exemple d'articulation entre la dimension cognitive – « recueil d'informations sensorielles » et « concentration » –, la dimension psycho-sociale – « empêchement », « émotion » et « qualité perçue » – et la dimension biomécanique – « postures adoptées » et « effort ».

Les difficultés pour recueillir l'information visuelle en lien avec les défauts lors des gestes cobot s'expliquent par l'émergence d'empêchement de ne plus pouvoir varier le positionnement des mains sur l'outil (dimension psycho-sociale). En effet, les exigences de sécurité du terminal obligent à garder le même positionnement des mains sur l'outil pour que le cobot se mette en état de fonctionnement (caractéristiques de la situation de travail). À cela s'ajoute l'aspect « massif » du terminal où la distance entre les poignées et le disque de la meuleuse est supérieure à celle de la meuleuse traditionnelle (caractéristiques de la situation de travail). Les ébarbeurs sont alors gênés pour observer le défaut en continu (dimension cognitive) :

> E5 – ***C'est pas la même vision, c'est pas la même façon de travailler****, c'est pas…voilà quoi.*
> Clara – *Parce que ça change quoi d'avoir les mains plus haut ?*
> E5 – *Bah, pour la vision,* ***on voit pas pareil*** *!* ***On n'a pas le nez dessus, on a pas la même compréhension quoi****. Que quand t'es à côté, tu peux mieux te baisser, tu peux être vraiment plus près de ton travail que là bon* ***t'es obligé de garder une distance****…* (extrait d'entretien)

Lors des gestes traditionnels, la modification du positionnement des mains et la sollicitation du cou et du tronc (dimension biomécanique) permettent de pouvoir observer en continu les défauts de la surface en train d'être meulés et ainsi de diminuer la concentration nécessaire au geste (dimension cognitive) *« E2 – Non là,* ***je suis pas trop concentré euh…si tu veux, comme je vois en même temps****, je vois ce que je fais en même temps, donc je suis bien moi »* (extrait d'entretiens). À contrario, la difficulté pour observer en continu les défauts lors de l'usage du cobot augmente la concentration des ébarbeurs (dimension cognitive) :

> E2 – *Si je vois pas, je vais rentrer dans la pièce c'est sûr !*

Clara – *D'accord ok !*

E2 – *Parce que je serai pas bien réglé !*

Clara – *Pas bien réglé ?*

E2 – *Oui,* ***je suis réglé quand je peux regarder. Quand je vois pas, faut faire beaucoup plus attention, beaucoup plus concentré pour meuler***. (extrait d'entretien).

Pour essayer de recueillir cette information visuelle, certains ébarbeurs vont choisir de se positionner d'une certaine manière par rapport à la pièce bien qu'ils ne se sentent pas en sécurité : « Clara – *Tu t'es mis à l'intérieur là ?* E5 – *Bah oui j'avais pas les bras assez longs hein ! Parce que là je peux pas travailler comme ça ; tu peux pas travailler hein ! […]* ***Tu vois rien, tu contrôles rien quoi !*** *[…] Normalement on ne devrait pas parce qu'on sait jamais. S'il coince ou part n'importe où, on se retrouve coincé mais bon ! On a pas le choix quoi ! »* (extrait d'entretiens). Le choix de ce positionnement par rapport à la pièce est alors guidé par le besoin de recueillir l'information visuelle, alors que lors des gestes traditionnels, il leur permet de se protéger en évitant d'adopter des postures contraignantes. De plus, toujours dans le but de recueillir cette information visuelle lors de l'usage du cobot, certains ébarbeurs essaient de modifier le positionnement des mains sur le terminal du cobot (dimension cognitive) ce qui donne lieu à des postures sollicitantes d'un point de vue biomécanique au niveau des poignets en flexion >15° notamment (dimension biomécanique). Ils expriment éprouver des difficultés pour maintenir une pression égale (dimension biomécanique) sur les boutons de sécurité des poignées du terminal (caractéristiques de la situation de travail) : « Clara – *T'as fait comme ça là [main retournée] ?* E2 – *Ouais !* ***Pour essayer de regarder en même temps****. Mais bon…j'avais du mal quand même. »* (extrait d'entretien). Ils tentent alors de recueillir cette information en essayant d'observer « devant » le terminal (dimension cognitive) ce qui explique les postures adoptées (dimension biomécanique) par le cou et le tronc en flexion notamment évoluant entre les gestes cobot et les gestes traditionnels. Les postures adoptées par le cou et le tronc (gestes traditionnels et cobot) sont également influencées par la taille des individus et la hauteur des pièces meulées : par exemple, E2 et E7 sont grands et vont davantage solliciter le tronc tandis que E3 et E5 sont plus petits et vont solliciter le cou. Enfin, cette surface est faiblement éclairée et les spots lumineux dont dispose le terminal du cobot ne permettent pas de l'éclairer suffisamment car ceux-ci sont orientés vers l'avant et non vers la surface meulée

(caractéristiques de la situation de travail). Aussi, pour compenser l'absence de contrôle visuel au cours de la réalisation du geste et du fait du faible éclairage de cette surface (caractéristiques de la situation de travail) les ébarbeurs ont besoin de toucher la surface pour contrôler le résultat final du meulage : « Clara – *là [SV] j'ai vu que tu as touché ?* E5 – *Bah ouais* ***on y voit rien*** *[…] là j'ai bien vu que bon c'était pas bien…* Clara – *Donc il faut toucher parce que tu vois pas ?* E5 – *[hoche la tête pour dire oui] », « [E7 touche SV] : Oh ! Y'a des crans ! »* (extraits d'entretiens). Le besoin de toucher la surface pour recueillir une information tactile (dimension cognitive) est également présent lors du geste traditionnel de meulage d'une SV en raison du faible éclairage de cette surface (caractéristiques de la situation de travail).

Par ailleurs, lors de l'usage du cobot, les ébarbeurs ont besoin de recueillir de nouvelles informations visuelles. Ce besoin est en lien avec le vécu de presque accident et l'historique des dysfonctionnements du cobot (caractéristiques individuelles et de la situation de travail) donnant lieu à un ressenti de peur de l'accident par une majorité des ébarbeurs (dimension psycho-sociale) installant un sentiment d'insécurité (effet sur l'individu) :

> E3 – *Parce qu'une fois je te l'ai déjà dit, tu sais je travaillais dans la pièce, je meulais au-dessus je faisais ça [mime mouvement droite gauche] j'essayais comme ça, et il a perdu la tête je sais pas et pfiou [mime mouvement brusque vers lui], moi je me suis couché comme ça, il est passé comme ça [au-dessus de lui] si je m'étais pas couché derrière, ça y est hein [mime tête coupée]* ***moi quand je travaille avec ça [cobot] j'ai peur…*** *J'ai jamais oublié ça. Après ça tout le monde avait peur…*
>
> Clara – *Ah bah oui, ça t'a fait peur ! J'imagine…*
>
> E3 – *Ouais laisse tomber, depuis moi j'ai vu ça [mime terminé avec sa main].* (extrait d'entretiens)

De ce fait, ils cherchent des astuces en prenant notamment la décision d'observer (dimension cognitive), durant la réalisation de leurs gestes, les articulations du bras du cobot et le feu tricolore situé sur le mat du cobot, derrière eux (éléments de la situation de travail) :

> Clara – *Des fois, tu vas regarder un peu vers le robot, qu'est-ce que tu regardes ?*
>
> E7 – *Bah s'il coupe ou pas ! Parce que y'a des fois on est de travers […] Et t'as beau continué à meuler pis t'sais… Tu regardes s'il coupe pas quoi.*

Clara – *Tu regardes ?*

E7 – ***C'est un réflexe que j'ai pour voir pour pas qu'il coupe tu vois ?*** *[…] Parce que y'a une limite.*

Clara – *De l'articulation tu parles ou du rayon ?*

E7 – *De l'articulation […]* ***C'est pour ça que je regarde****. Parce que je peux forcer pis aller de travers comme ça et tout. Parce que y'a des fois il coupe hein, il coupe tout seul t'as bien vu […]*

Clara – *D'accord et tu regardes comment le bras il est articulé c'est ça ?*

E7 – *Ouais […]* ***je m'adapte et je vois si je peux continuer à travailler comme ça ou s'il faut déplacer le cobot ou…****»* (extrait d'entretiens)

Ils adoptent alors des postures du cou en torsion supérieur à 45° sollicitantes d'un point de vue biomécanique (dimension biomécanique). De plus, cette recherche de nouvelles informations visuelles augmente la concentration ; l'attention est alors davantage focalisée sur le fonctionnement du cobot que sur la surface meulée (dimension cognitive) : *« E7 – [avec le cobot] t'es obligé de réfléchir à ça [montre le bras]… là* ***j'arrive même pas à penser hein, je suis concentré 100%*** *! ».* L'observation de l'articulation du bras du cobot est également en lien avec l'effort de positionnement du bras émergeant avec l'usage du cobot (dimension biomécanique) (explicité dans la partie 1 du chapitre 10).

Cette évolution des informations visuelles entre les gestes traditionnels et les gestes cobot (dimension cognitive) explique aussi la diminution de la précision du geste des ébarbeurs et leurs difficultés à atteindre la performance souhaitée en termes de qualité et de vitesse. L'expérience qu'ils ont acquise lors du geste traditionnel ne peut plus s'appliquer lors de l'usage du cobot (caractéristiques individuelles). La qualité perçue est en effet estimée comme moins satisfaisante lors des gestes cobot par rapport aux gestes traditionnels (dimension psycho-sociale). Ils n'ont plus la même compréhension de leurs gestes, plus la même précision ; comme ils ne peuvent pas autant contrôler visuellement le meulage réalisé, ils sont « hésitants ». Si bien que la qualité est amoindrie et la durée est augmentée lors des gestes cobot par rapport aux gestes traditionnels (effet sur la performance). Les ébarbeurs expriment alors être frustrés et énervés (dimension psycho-sociale) et ressentir du stress lors de l'usage du cobot (effet sur l'individu) :

Clara – *Tu me disais la dernière fois qu'avec le cobot tu étais plus énervé ?*

E5 – *Ah ouais ouais. Bah plus mal les bras, mal le dos…pis bon plus énervé hein ! Quand on a mal quelque part fin bon voilà quoi…* **Pis bon plus stressé**.

Clara – *Ah oui ?*

E5 – *Il marcherait bien ! Mais bon là* **le bras on est embêté avec ça** *donc euh bon voilà…pis bon* **on avance pas avec le cobot** *! On avance pas dans le boulot. […] Disons que quand on a fait la journée, bon on a fait la pièce qu'avec le cobot on a fait la moitié ou euh bon… Comme si on avait rien fait quoi !* **On est plus fatigué et bon le boulot n'est pas fini quoi** *!*

Clara – *Oui je comprends.*

E5 – *Non c'est un tout ! On voit bien qu'il fait la moitié du boulot, et encore quand on a bien travaillé […] Pis bon* **si tu vois moins, t'es quand même plus hésitant à travailler quoi…** *[…] Parce que bon* **on a pas confiance en ces machins-là.** *S'il se met à bouger ou si tu rentres dedans voilà quoi…tu vas mettre plus de temps à retirer les traits que tu as faits au cobot, que de faire ton boulot normal quoi.*

[…] Oh putain [regarde cobot en défaut] **c'est ça aussi qui m'énerve à chaque fois : on sait pas si il coince ou pas***…quand tu veux changer de position, bon ben c'est assez dur hein […] Pis à chaque fois, faut le reprendre, faut un peu le faire bouger… suivant comment le bras est tourné, bon bah il va reculer différemment quoi. Aussi bien le ré-avancer, des fois on croit qu'il va aller droit, pis bon si le bras est un peu tordu, ça va repartir un peu en biais, donc il faut le ramener…*

Clara – *Ah oui, tu me disais que tu n'arrivais pas forcément à te remettre au même endroit?*

E5 – *Ouais ouais* **on peut pas revenir pareil quoi […] c'est plutôt embêtant***. Donc euh bon voilà quoi* **on s'énerve…pour rien mais bon on s'énerve quand même quoi***. Parce que quand on le fait dix fois, vingt fois dans la journée donc bon voilà quoi !* (extrait d'entretiens)

Toutefois E1 ne partage pas le même ressenti que ses collègues. Il a pris la décision de travailler d'une toute autre façon (dimension cognitive) lorsqu'il utilise le cobot. Il explique en effet avoir « intégré » dans son geste les caractéristiques de fonctionnement du cobot, les articulations du bras par exemple (éléments de la situation de travail). Il dit ne pas être « gêné » ou « empêché » dans la réalisation de son geste et, contrairement à ses collègues, E1, exprime même ressentir une certaine fierté d'avoir compris « comment travailler avec le cobot » (dimension psycho-sociale) :

Clara – *Et là à l'instant là, qu'est-ce que t'as regardé ?*

E1 – *Bah* ***j'ai regardé le bras ! Tu vois je regarde comme ça [mime en train de meuler tourne la tête pour regarder le bras]*** *[…] tu vois là c'est trop serré, c'est trop tordu… C'est comme ton bras, si tu le tords trop, bah tu peux pas, ça fait mal, c'est pareil pour la machine !*

Clara – *Et ça tu l'as appris comment ?*

E1 – *Bah t'essaies, tu fais ça tu vois que c'est tordu et qu'il s'arrête, après tu mets comme ça [angle droit] tu vois qu'elle s'arrête pas la machine ! Alors que si t'es tordu, elle arrête toute seule, je me dis tiens y'a quelque chose qui va pas, alors je recommence, 2, 3 fois… Et ouais c'est bon ok on a compris ! C'est rouge ! Alors jusque-là ça c'est bon, pour aller jusque-là pas problème, là tu vois ça va ! […]* ***les autres ils comprennent pas le travail ! Ils forcent !*** *« Mais c'est tordu ! » « Mais nan ! » « Mais si c'est trop tordu, il va s'éteindre ! » « Tiens tu vois je t'avais dit ! »* ***Ils comprennent pas*** *! Là comme ça c'est bien ! […]* ***Moi je sais comment faire, je sens le travail****, là il va trop vite par exemple, il aime pas [voyant rouge du feu tricolore s'est allumé], faut aller tout doucement, comme un mouchoir !* ***Moi je le connais maintenant*** *!* (extrait d'entretiens)

Synthèse

Ce second exemple d'articulation des dimensions du geste (cf. Figure 38) montre que l'évolution du recueil des informations visuelles augmente la concentration et diminue la précision du geste élaboré lors de l'usage du cobot. Les difficultés pour observer les défauts meulés en continu s'explique par l'empêchement de pouvoir positionner les mains sur l'outil comme les opérateurs le voudraient. La recherche de nouvelles informations visuelles est liée au ressenti de peur de l'accident lors du geste cobot : pour éviter qu'un accident ne se produise les ébarbeurs décident d'observer ponctuellement l'architecture du bras du cobot et/ou le feu tricolore se situant derrière eux. Ceci engendre l'adoption de postures contraignantes (cou, tronc et poignets). De plus, l'évolution des informations visuelles rend les ébarbeurs plus hésitants dans la réalisation du geste, ce qui donne lieu à une qualité perçue diminuée lors de l'usage du cobot par rapport au geste traditionnel. Les ébarbeurs ressentent alors de la frustration et de l'énervement, de ne pas pouvoir réaliser un « bon travail » selon eux. La durée du geste augmente alors, la qualité finale est amoindrie, et les individus ressentent un sentiment de stress et d'insécurité lors de l'usage du cobot. Enfin, certaines caractéristiques de la situation de travail viennent influencer les éléments constatés. D'abord les exigences de sécurité des poignées du terminal ne permettant pas de varier le positionnement des mains sur l'outil couplées à l'aspect « massif » du cobot empêchent d'observer en continu la surface meulée. À cela s'ajoute que les spots lumineux dont dispose le terminal ne sont pas orientés vers la surface meulée ce qui ne permet pas de compenser le faible éclairage de la surface et qui demande alors aux ébarbeurs de toucher la surface pour compenser le contrôle visuel. De plus, l'architecture et le fonctionnement du bras du cobot, contenant 7 articulations pourvues de moteur, ne permettent pas d'avoir un contact permanent du disque sur la surface. De même, l'emplacement des informations sur le fonctionnement du cobot (feu tricolore) qui se situe derrière les travailleurs les oblige à adopter des postures contraignantes. Enfin, les dysfonctionnements du cobot dont les causes restent inconnues pour les travailleurs sont également une source d'énervement des opérateurs. Tous ces éléments se couplent aux caractéristiques propres aux individus plus particulièrement à l'expérience vécue de presque accident lors de l'usage du cobot restant en mémoire des travailleurs. En outre, l'expérience acquise également lors du geste traditionnel n'arrive plus à être appliquée notamment au niveau du choix des modes opératoires à réaliser.

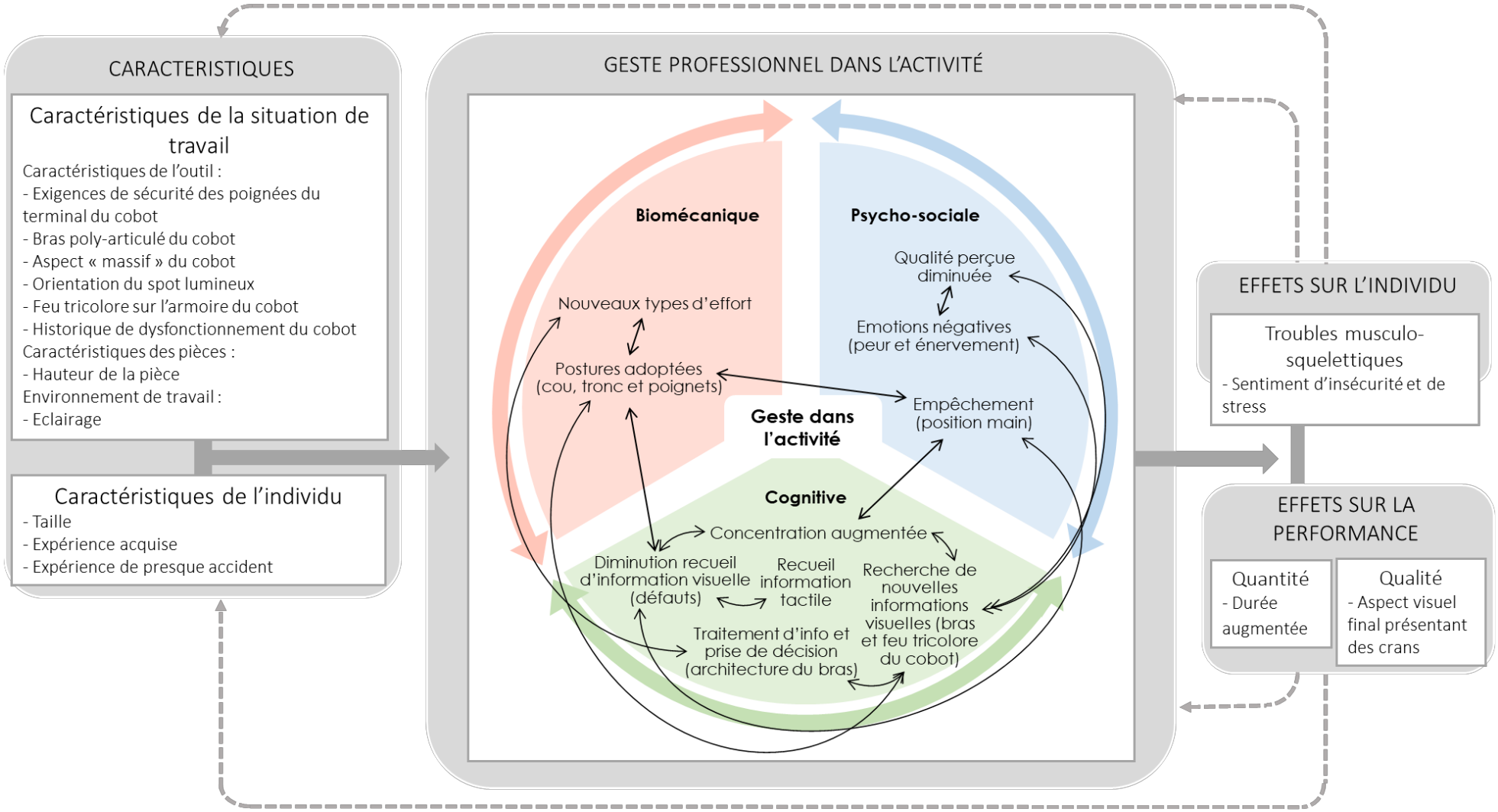


Figure 38 : Schématisation de l'articulation de la dimension cognitive avec les autres dimensions du geste professionnel

3. Articulation de la dimension psycho-sociale avec les autres dimensions du geste professionnel

Ce troisième exemple d'articulation illustre les liens entre la dimension psycho-sociale – « reconnaissance du geste », « qualité perçue », « émotions » et « empêchement » – la dimension biomécanique – « répétitivité » – et la dimension cognitive – « traitement d'information et prise de décision ».

Il a été montré précédemment que le sens donné au geste traditionnel par les individus porte entre autres sur la possibilité de faire un travail de qualité, de faire un « bon travail ». Ils ne parviennent plus à le faire lors de l'usage du cobot (dimension psycho-sociale). La qualité perçue par les ébarbeurs est estimée comme moins satisfaisante par rapport à celle des gestes traditionnels (dimension psycho-sociale). En effet, ils ne parviennent pas à atteindre leurs critères de qualité c'est-à-dire obtenir une surface lisse sans défauts car ils ne peuvent plus choisir ni le rythme ni la direction ni l'amplitude des mouvements à réaliser (dimension psycho-sociale). Les résultats montrent que la répétitivité diminue lors de l'usage du cobot : les ébarbeurs effectuent moins de mouvements et réalisent des mouvements plus lents (dimension biomécanique). En revanche, ils ne parviennent pas à finir le meulage des surfaces et prennent majoritairement la décision d'utiliser, après l'usage du cobot, la meuleuse traditionnelle (dimension cognitive), ce qui les conduit à un sentiment de frustration et d'inutilité du cobot (dimension psycho-sociale). L'utilisation du cobot est également vécue comme une contrainte car ils ne peuvent plus choisir leur rythme de travail (dimension psycho-sociale). Le cobot est doté d'un dispositif capable de détecter le mouvement de l'opérateur (caractéristiques de la situation de travail) : l'effort exercé par l'utilisateur est mesuré puis interprété par un système de commande afin de générer le mouvement du cobot. Il existe cependant un laps de temps entre l'ordre de mouvement donné par le travailleur et le mouvement réel du cobot (caractéristiques de la situation de travail). Les ébarbeurs sont donc obligés de s'adapter au rythme du cobot (dimension cognitive). Ils ont alors le sentiment de se fatiguer davantage lors de l'usage du cobot (effets sur l'individu) :

Clara – *Donc là tu vas plus lentement qu'à la main ?*
E3 – *Ouais.*

Clara – *Ça change quelque chose pour toi ?*

E3 – *Bah fatiguant !* ***Plus lent fatiguant !***

Clara – *Quand c'est plus lent, c'est fatiguant ?*

E3 – *Bah oui…peut être avec la main, je vais meuler euh en 5min avec la machine peut être 10min ! […]* ***pour un feignant ça va cette machine là [rire]****. C'est vrai ça, un feignant hop, il avance pas dans le boulot il s'en fout* ***mais moi j'aime pas*** *! Je sais pas peut être y'en a qui l'aiment bien…mais moi non ! [rire] […]* ***parce que moi, j'aime bien quand je commence le boulot, et hop c'est fait.*** (extrait d'entretiens).

La répétitivité se caractérise par la direction et l'amplitude des mouvements réalisés (dimension biomécanique). Il a été observé qu'elles varient entre les gestes traditionnels et les gestes cobot. Or, de par l'expérience acquise lors du geste traditionnel de meulage d'une SV (caractéristiques individuelles), les ébarbeurs décident d'alterner différentes directions de mouvements pour atteindre la qualité souhaitée (dimension cognitive):

[verbatim sur le geste traditionnel]

Clara – *Et là tu fais des mouvements haut bas et après droite gauche ?*

E7 – *Oui, d'abord faut casser, euh, la forme du pavé [le défaut sur la surface] pour rattraper l'épaisseur. […] Tu vois là* ***[mouvements haut bas] je suis en train de casser l'épaisseur*** *qu'y a et* ***après je rattrape [mouvements droite gauche] pour que ce soit droit.*** *[…]*

Clara – *Et t'aurais pu faire que des mouvements haut bas ?*

E7 – *Non, non.*

Clara – *Qu'est ce qui se passe si tu fais que des mouvements haut-bas ?*

E7 – *Oh bah tu peux pas, c'est pas droit ! Bah sinon tu fais ça hein [mime des vagues avec sa main] ! Tu rattrapes pas droit. C'est vrai que quand tu suis ça [chronique d'activité] c'est vrai que ça fait bizarre [rire] […]*

Clara – *Et tu aurais pu faire que des mouvements droite-gauche ?*

E7 – *Non, non c'est pareil.*

Clara – *Faut vraiment que* ***les deux soient combinés*** *?*

E7 – *Ouais,* ***ouais t'es obligé****.* (extrait d'entretiens)

De même, lors du geste traditionnel de meulage d'une SH, c'est l'alternance d'amplitude et de rythme différents de mouvements qui est nécessaire pour atteindre la qualité souhaitée (dimension cognitive):

[verbatim sur le geste traditionnel]

Clara – *Des fois tu fais des petits mouvements [faible amplitude] et après des plus grands [grande amplitude] ?*

E5 – *Bah si tu veux, **on retire les trucs, le défaut [faible amplitude], pis après on re-meule bien tout pour que ce soit bien à plat quoi [grande amplitude]** !*

Clara – *Ah ! Ok ! T'enlèves les défauts et après hop, tu lisses l'ensemble ?*

E5 – *Voilà, **comme ça c'est propre**.* (extrait d'entretiens)

Or, lors du geste cobot de meulage d'une SV, les ébarbeurs vont surtout privilégier des mouvements dans une direction unique (dimension cognitive) et cela pour éviter de rentrer dans la pièce (en lien avec l'effort de retenue explicité en partie 1 du chapitre 10). Du fait du couplage entre l'encombrement du cobot et l'exiguïté des pièces, le cobot vient en butée contre la pièce (caractéristiques de la situation de travail) : les ébarbeurs sont alors empêchés vis-à-vis des mouvements qu'ils souhaiteraient réaliser (dimension psycho-sociale). À cela s'ajoute que les limites fonctionnelles d'orientation du terminal du cobot (caractéristiques de la situation de travail) empêchent également les ébarbeurs d'incliner le disque par rapport à la surface comme ils le souhaiteraient (dimension psycho-sociale) : le disque est perpendiculaire à la surface lors du geste cobot tandis que lors du geste traditionnel l'inclinaison du disque varie entre 0° et 90° par rapport à la surface verticale. Or, en meulant avec l'extrémité du disque (inclinaison 60°-90°), le risque que celui-ci casse est plus important (dimension psycho-sociale). Accentué par la diminution du recueil d'informations tactiles (retour d'effort/vibrations) (dimension cognitive), les ébarbeurs ont peur, d'une part, de se blesser si le disque venait à casser (en lien également avec l'émergence d'un effort de retenue explicitée au sein de la partie 1 du chapitre 10), et d'autre part, de faire de la « non-qualité » en creusant la pièce (dimension psycho-sociale):

Clara – *Et ici là, tu fais surtout des mouvements vers le bas, tu vois ?*

E7 – *Tu veux dire quand je descends ?*

Clara – *Tu vois là [montre l'écran] ?*

E7 – *Ah ici ouais,* ***c'est pour éviter de rentrer dans la pièce****…Oui comme là tu veux dire ?*

Clara – *Oui tu vois là, tu fais pas beaucoup d'allers-retours haut bas [mime mouvement haut bas].*

E7 – *Oui là c'est vrai,* ***je descends surtout [mime mouvement vers le bas]*** *[…]* ***donc c'est plus long*** *[….] parce que tu sais* ***c'est que tu risques quand même de rentrer dedans*** *euh*

Clara – *Et si tu n'avais fait que des mouvements tout le temps haut-bas tu aurais pu ?*

E7 – *Non je crois pas. C'est risqué quoi !*

Clara – *Tu risquais de rentrer dans la pièce ?*

E7 – *Ouais, c'est dangereux là bah je t'ai dit surtout avec le cobot,* ***tu fais pas gaffe : tu niques la pièce tout de suite hein, ça coupe vite fait !*** (extrait d'entretiens)

Par ailleurs, la durée du geste augmente avec le cobot (effet sur la performance). En effet, du fait du laps de temps entre l'ordre de mouvement du travailleur et le mouvement réel du cobot (caractéristiques de la situation de travail), les ébarbeurs ne parviennent plus à alterner différents rythmes et amplitudes de mouvements comme ils le font lors du geste traditionnel (dimension psycho-sociale) :

E7 – ***Je peux pas aller plus vite ou moins vite avec le cobot. C'est le cobot qui travaille [rire] non mais c'est vrai en plus !***

Clara – *T'as vraiment le sentiment que c'est le cobot qui travaille et pas toi ?*

E7 – *Ah bah oui ! Bah non,* ***sinon j'irais plus vite que lui [rire] il serait derrière le bordel [rire]*** *[mime mouvement au ralenti] tu sais faut faire gaffe hein tu t'endors sinon [rire].* (extrait d'entretiens)

Ainsi, ils réalisent des mouvements dans une direction unique et effectuent des mouvements d'amplitude et de rythme constant (dimension biomécanique) ce qui augmente notamment la durée des gestes cobot par rapport aux gestes traditionnels (effet sur la performance) : « *E5 – Pour moi, c'est une* ***perte de temps*** *[…] Parce que bon on travaille mal quoi ! On avance pas, pis le travail est pas bien quoi ! […]* ***Si c'est pour mettre 8h pour retirer une bosse, bon c'est pas la peine quoi*** *! Autant rester à la baraque ! ».*

À cela s'ajoute le fait qu'ils ne parviennent pas à atteindre la qualité souhaitée (dimension psycho-sociale) et décident alors majoritairement de repasser ensuite avec la meuleuse

traditionnelle pour finir le meulage des surfaces (dimension cognitive), ce qui augmenterait davantage la durée totale du meulage des surfaces (effet sur la performance).

Clara – *Parce que tu arrives pas à avoir bien lisse ?*
E2 – *Non, tu vois bien* ***c'est pas bien lisse*** *!* ***C'est pas toi qui…commandes tout si tu veux [rire]****. Là,* ***meuler comme ça [droite gauche] comme ça [haut bas] c'est pas possible avec le cobot****.* ***Y'a des crans****, ça se voit,* ***obligé il faudra repasser avec la meule*** *[traditionnelle]* ***derrière****.* (extrait d'entretiens).

La présence de crans sur les surfaces meulées est en effet observée suite aux gestes cobot contrairement à l'aspect visuel lisse des surfaces meulées suite aux gestes traditionnels (effet sur la performance) (cf. Figure 39) :

Figure 39 : Exemple de l'aspect visuel d'une surface meulée suite au geste traditionnel (à gauche) et suite au geste cobot (à droite)

Les ébarbeurs se trouvent alors dans une situation de qualité empêchée allant même parfois jusqu'à révoquer leurs critères de qualité lors de l'usage du cobot (dimension psycho-sociale):

[verbatim sur le geste traditionnel]
E2 – *Y'a la moitié qui va après à l'usinage,* ***t'es pas obligé de bien bien meuler quoi, mais je vais bien meuler quand même, c'est plus propre au visuel****.*
[verbatim sur le geste cobot]

E2 – *Là c'est bon, là c'est usiné [moitié de la surface]. […]* **Je casse juste un petit peu ça ira.** (extrait d'entretiens)

Enfin, les éléments analysés ci-dessus s'articulent également pour deux ébarbeurs avec la reconnaissance du geste cobot par les collègues et la hiérarchie qui diminue par rapport au geste traditionnel (dimension psycho-sociale). En effet, cette « performance empêchée », aussi bien en termes de durée que de qualité, impacte la reconnaissance du geste – « je ne peux plus être le meilleur » (cf. verbatim ci-dessous de E2) ou « je n'avance pas assez, je ne suis plus considéré comme un bosseur, mon chef n'est pas satisfait » (cf. verbatim ci-dessous E3) :

Clara – *La dernière fois, tu me disais que tu étais content et fier, quand tu finissais une pièce complète en entier rapidement.*

E2 – *Bah oui, mais* **je suis pas rapide avec le cobot** *!*

Clara – *Et ça, ça te dérange toi ? Parce que tu aimes bien aller vite ?*

E2 – *Si tu veux, moi ça fait presque 12 ans que je travaille ici, et* **j'ai toujours plus travaillé, toujours plus jusqu'à maintenant, toujours plus que les autres**, *toujours plus.* **Tout le monde le sait** *! Alors que tu me donnes ça [cobot], je travaille mais* **j'avance pas, tout le monde sait que c'est pas moi qui travaille […] c'est le cobot qui travaille comme ça !**

Clara – *C'est pas toi qui travailles c'est le cobot ?*

E2 – *Oui* **tout le monde le sait, c'est le cobot qui travaille au max comme ça** *! […] Même moi, je force, je force […]* **je vais moins vite quand même, c'est le cobot !**

Clara – *Oui c'est le cobot.*

E2 – ***Je suis pas aussi lent sinon !***

Clara – *D'accord et ça, ça t'embête ?*

E2 – *Bah oui…en une journée je vais faire quoi ? Rien ! Moi en 1h c'est fini avec ça [cobot] 2h, 3h fini […] Après encore faut repasser à la main derrière ! Pfff laisse tomber.* (extrait d'entretiens)

E3 – *Tu passes 2h à meuler ça par exemple avec le cobot [montre un petit bout de la pièce]. Moi dans les 2h, j'aurais fait peut être la moitié,* **d'accord peut être le chef il dit rien mais pfff…***[…]* **Quand le chef il passe [et que je travaille avec la meuleuse traditionnelle] peut être qu'il dit rien mais il se dit « Oh il a bien avancé »** *par exemple,* **il peut penser ça et moi je suis content ! Quand il vient, et que je travaille avec la machine [le cobot] pfff j'ai meulé un peu ici, ici mais après, on**

peut pas meuler et tout…Moi j'aime pas… […] Pour moi, travailleur, c'est pas pour moi ça. […] Moi je suis un travailleur, un bosseur, avec ça [cobot] c'est pas la peine ! […] Avec le cobot, moi par exemple, je vais y passer la journée, alors que moi [avec la meuleuse traditionnelle], je peux faire plus que ça. Bah oui à chaque fois faut le changer de place, faut se concentrer, la machine elle s'arrête… c'est pour ça que je suis nerveux des fois ! (extrait d'entretiens)

Synthèse

Cette troisième articulation (cf. Figure 40) montre que le sens donné au geste par l'individu évolue du fait de la diminution de la qualité perçue, l'émergence d'empêchement et la diminution de la reconnaissance du geste par les collègues et la hiérarchie. L'analyse du geste dans toutes ses dimensions a alors montré que cela pouvait être expliqué par l'évolution des caractéristiques de la répétitivité en lien avec de l'empêchement : les ébarbeurs n'ont plus la possibilité de choisir le rythme de travail, la direction et l'amplitude des mouvements réalisés. De par l'impossibilité d'ajuster ces choix opératoires, les travailleurs sont alors empêchés et ne parviennent pas à réaliser un travail efficient, autant en termes de qualité que de quantité à produire. La décision majoritairement prise est de repasser par la suite avec la meuleuse traditionnelle pour finir la surface meulée, donnant lieu à de la frustration ressentie par les ébarbeurs et à une diminution de la reconnaissance du geste par les collègues et la hiérarchie. Lors de l'usage du cobot, les opérateurs ont également le sentiment de se fatiguer davantage en ne pouvant choisir leur rythme de travail et ne sont de surcroît pas satisfaits de la qualité obtenue. La performance est alors réduite avec une qualité amoindrie et une durée augmentée. Enfin, divers éléments de la situation de travail sont à mettre en exergue par l'articulation décrite ci-dessus. Tout d'abord, le laps de temps entre la détection du mouvement réalisé par l'individu et le mouvement réellement généré par le cobot, qui contraint le rythme de travail des ébarbeurs et qui ne permet pas de varier les amplitudes de mouvements nécessaires pour atteindre la qualité escomptée lors du meulage des surfaces horizontales. Puis, l'encombrement du cobot et les limites fonctionnelles d'orientation du terminal du cobot, couplés à l'exiguïté de la pièce pour la surface verticale, qui ne permettent pas de réaliser les différentes directions de mouvements permettant d'atteindre la qualité souhaitée en comparaison de leur savoir-faire dû à l'expérience acquise par les travailleurs lors du geste traditionnel.

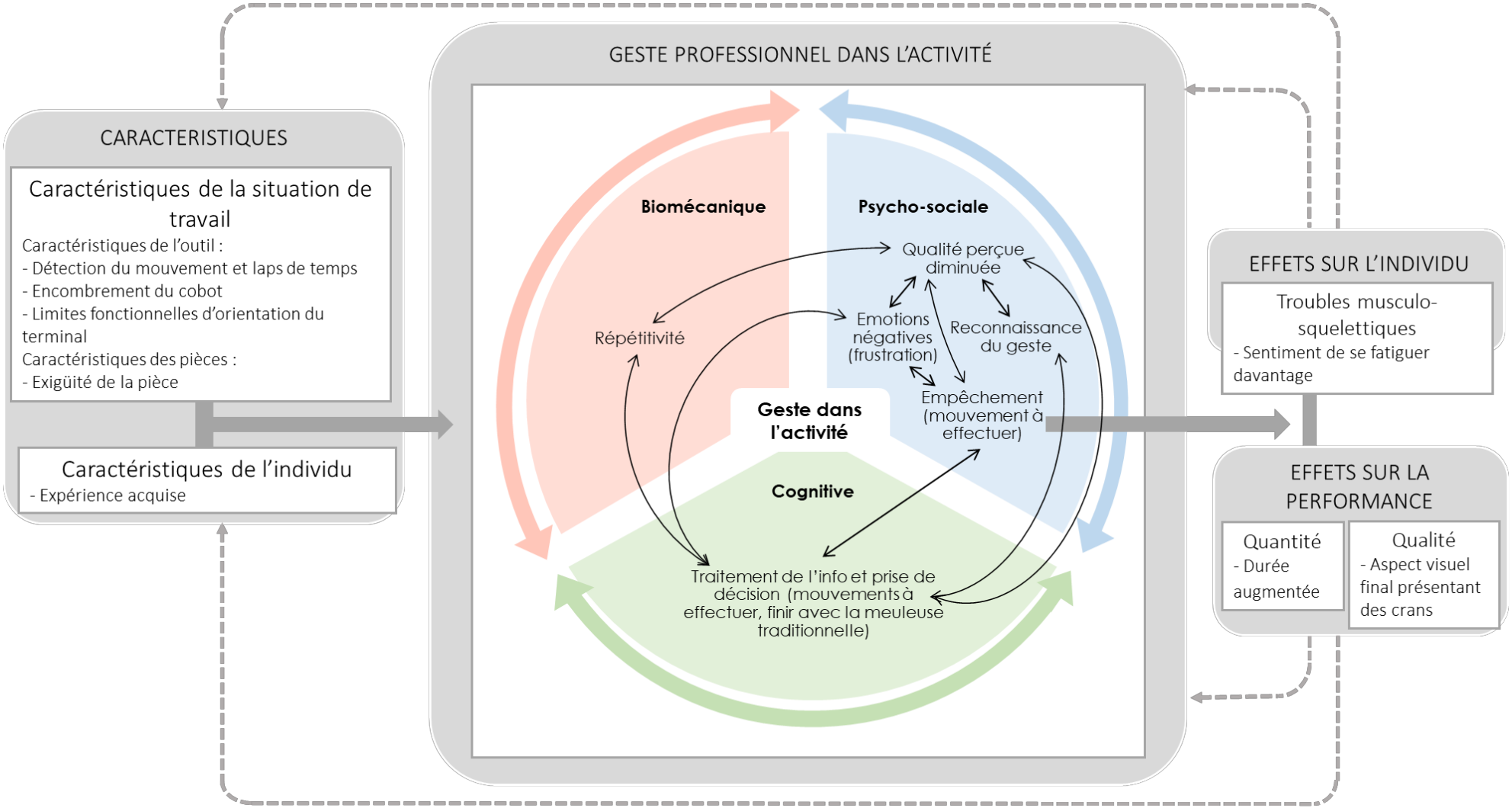


Figure 40 : Schématisation de l'articulation de la dimension psycho-sociale avec les autres dimensions du geste professionnel

4. Synthèse du chapitre 10

Une diminution de l'effort lié au port de l'outil mais l'émergence de nouveaux types d'efforts lors de l'usage du cobot

Bien que l'effort lié au port de de l'outil diminue lors de l'usage du cobot, l'analyse du geste a permis de comprendre que de nouveaux efforts différents émergent.

Un effort de maintien des poignées du terminal du cobot dû aux exigences de sécurité. Ces dernières demandent à ce que les boutons situés sous les poignées du terminal du cobot soient maintenus enfoncés pour que le cobot se mette en fonction ; si la pression est légèrement relâchée, le cobot se met en mode « sécurité » et cesse de fonctionner. Cet effort supplémentaire s'articule à l'augmentation de la concentration nécessaire au geste cobot. De plus, il n'est plus possible de varier le positionnement des mains sur l'outil. Or, cette variation permet, lors du geste traditionnel, de pouvoir soulager les douleurs ressenties au niveau des poignets : avec l'usage du cobot, les douleurs ressenties aux poignets sont réactivées voire exacerbées.

Un effort de retenue du terminal du cobot est présent lors du meulage des surfaces verticales. Du fait de l'exiguïté des pièces meulées, de l'encombrement du terminal du cobot (ce dernier étant plus « massif » que la meuleuse traditionnelle) et des limites fonctionnelles d'orientation du terminal, il n'est plus possible, pour meuler la surface verticale, de choisir l'inclinaison du disque par rapport à la surface. Un effort supplémentaire est alors fourni pour éviter de creuser la pièce et/ou de casser le disque de la meuleuse. Cet effort est également renforcé par le fait de moins sentir le disque en contact de la surface en raison du dispositif de démultiplication de l'effort du cobot et de son aspect antivibratoire, ce qui impacte le recueil d'informations tactiles (sensation du disque au contact de la surface) et engendre également de la peur ressentie par les travailleurs que le disque ne casse ou creuse la pièce. Cet effort pourrait aussi expliquer, en partie, les douleurs ressenties au niveau des avant-bras et la diminution de la qualité avec la présence de crans sur les surfaces meulées.

Un dernier effort apparaît : celui de positionnement du terminal du cobot lors du meulage des surfaces horizontales. Le bras du cobot dispose de sept articulations pourvues chacune d'un moteur. Dès que le terminal du cobot est déplacé, l'ensemble des sept articulations se met en mouvement entraînant l'application d'un effort supplémentaire pour remettre le disque en contact de la surface au même niveau que le meulage initié. Le geste se révèle plus hésitant et la qualité perçue est estimée comme moins satisfaisante. Cela a des effets, d'une part, sur les douleurs ressenties au niveau des avant-bras et, d'autre part, sur la performance avec la présence de crans sur les surfaces de même qu'une augmentation de la durée du geste.

Ainsi, l'apparition de ces trois nouveaux types d'efforts différents questionne la prévention des TMS. Par conséquent, ils devraient être pris en compte dans le futur pour ne pas générer d'effets indésirables sur la survenue de TMS.

Une modification des informations visuelles recueillies lors de l'usage du cobot

L'usage du cobot influence également la dimension cognitive du geste. L'analyse de la dimension cognitive au sein du geste professionnel montre que des difficultés émergent lors de l'usage du cobot, en lien avec une modification du recueil des informations visuelles et tactiles par rapport au geste traditionnel.

Puisque les exigences de sécurités des poignées du terminal obligent à maintenir la même position des mains sur l'outil ainsi que l'aspect « massif » du cobot avec une distance entre le disque et les poignées supérieures à celles présentent sur la meuleuse traditionnelle, l'information visuelle en lien avec le défaut meulé se révèle difficile à recueillir en continu. Pour pallier cela, les travailleurs adoptent des postures contraignantes au niveau du cou et du tronc en cherchant à aller observer « devant » le terminal. Il leur est en effet essentiel de pouvoir observer les défauts meulés pour s'assurer de la qualité du meulage réalisé et adapter les modes opératoires concernant notamment les mouvements à réaliser pour pouvoir atteindre une surface lisse sans défauts apparents. Avec le cobot, ceci est plus difficilement réalisable.

Les travailleurs tâtonnent, hésitent, ce qui augmente la durée du geste et ne permet pas d'atteindre la qualité escomptée.

De plus, la recherche de nouvelles informations visuelles se manifeste lors de l'usage du cobot comme observer ponctuellement le bras du cobot (l'architecture des sept articulations) et/ou le feu tricolore situé sur le mat du cobot. Cette recherche est réalisée dans le but de se maintenir en sécurité. En effet, du fait de l'expérience vécue de presque accident lors de l'usage du cobot et de l'historique des dysfonctionnements du cobot, les travailleurs craignent que cela ne se réitère et s'en prémunissent en recherchant ces nouvelles informations visuelles. Ceci est en lien avec un sentiment de stress et d'insécurité pour les individus qui adoptent des postures contraignantes (au niveau du cou) pour tenter de pallier ce sentiment d'insécurité.

Cette évolution questionne la prévention des TMS. D'une part, l'emplacement des éléments indiquant le fonctionnement (ou non) du cobot (rappelons que le bras du cobot et le feu tricolore se situent derrière eux) donne lieu à l'adoption de postures à risque de développement de TMS. D'autre part, les ébarbeurs ignorent les causes des dysfonctionnements du cobot et ont donc peur de l'accident.

Le sens donné au geste par les individus impacté par un rythme de travail contraint par le cobot

Le sens donné au geste traditionnel par les ébarbeurs réside dans la possibilité de faire « un bon travail », de se maintenir en santé en ayant la possibilité de se protéger et en pouvant être reconnu par les collègues et la hiérarchie. Lors de l'usage du cobot, le sens du geste s'étiole ; l'atteinte de ces objectifs finaux n'est plus permise.

L'analyse du geste montre que l'évolution du sens donné au geste s'articule avec la réalisation de mouvements « contraints » par le cobot. Il a été constaté que les ébarbeurs effectuent moins de mouvements par minute et réalisent des mouvements plus lents mais qu'ils ne parviennent pas à réaliser la totalité du meulage. Le cobot est un dispositif capable de mesurer le mouvement de l'opérateur en le détectant et l'interprétant par un système de

commande pour générer ensuite le mouvement « réel » du cobot. Cependant un laps de temps réside entre la détection et la génération du mouvement. Or, celui-ci va alors contraindre le rythme de travail des ébarbeurs et donne lieu au sentiment, pour les ébarbeurs, de se fatiguer davantage lors de l'usage du cobot. Par ailleurs, l'amplitude des mouvements est diminuée et les directions de mouvements sont limitées. De ce fait, ils ne parviennent plus à agir ni sur la qualité à atteindre, laissant des surfaces moyennement meulées ou présentant des crans, ni sur le rythme des mouvements effectués. C'est l'alternance d'amplitudes différentes pour les SH et de directions différentes de mouvements pour les SV qui permet d'atteindre la qualité souhaitée.

Ainsi, l'usage du cobot devrait avoir pour objectif de réduire la répétitivité tout en laissant la possibilité aux travailleurs de réaliser les mouvements adéquats afin d'atteindre la qualité souhaitée.

L'analyse articulée des dimensions biomécanique, cognitive et psycho-sociale permet de préciser les catégories du modèle initial à partir des résultats obtenus sur l'évolution du geste, et d'interroger une diversité de caractéristiques de la situation de travail et des individus qui influencent l'évolution du geste (cf. Figure 41).

Caractéristiques de la situation de travail et caractéristiques propres aux individus influençant l'évolution du geste professionnel

Cette vision articulée des dimensions biomécanique, cognitive et psycho-sociale permet d'interroger une diversité d'éléments à prendre en compte pour agir en matière de prévention des TMS. D'une part, il convient d'agir sur certaines caractéristiques fonctionnelles du cobot qui influencent l'évolution du geste professionnel :

- les exigences de sécurité des poignées du terminal du cobot,
- l'architecture et le fonctionnement du bras poly-articulé,
- les limites fonctionnelles d'orientation du terminal

- les spots lumineux du terminal qui sont orientés vers l'avant et non vers la surface meulée
- la détection du mouvement de l'individu interprétée ensuite par un système de commande afin de générer le mouvement « réel » du cobot et le laps de temps entre ces deux moments,
- la démultiplication de l'effort et l'aspect antivibratoire permis pas ce cobot,
- l'encombrement du cobot, notamment l'aspect « massif » du terminal du cobot en soulignant la distance entre les poignées et le disque de la meuleuse qui est supérieure à celle de la meuleuse traditionnelle,
- l'interaction cobot-travailleur influençant également l'évolution du geste : l'emplacement des informations visuelles sur le fonctionnement du cobot (feu tricolore) et le manque d'informations sur la raison de la mise en non-fonctionnement du cobot.

D'autre part, ces caractéristiques du cobot se couplent aux caractéristiques des pièces et des surfaces :

- la hauteur et la taille des pièces,
- l'exiguïté des pièces,
- l'orientation des surfaces.

Les résultats montrent également que l'environnement physique influence le geste notamment au niveau de l'éclairage des surfaces verticales. Enfin, les caractéristiques organisationnelles sont également à interroger particulièrement la question de la formation :

- Formation au fonctionnement du cobot qui peut expliquer certaines différences interindividuelles observées ; comprendre le fonctionnement du cobot semble un des éléments favorables à l'évolution du geste professionnel.
- Formation au développement d'un nouveau geste (cf. Discussion)

Par ailleurs, ces éléments doivent être pris en compte en lien avec les caractéristiques individuelles des travailleurs :

- l'expérience de presque accident,

- l'expérience acquise lors du geste traditionnel. Rappelons que les ébarbeurs ont une ancienneté comprise entre 12 et 26 ans au niveau du meulage traditionnel. Ainsi l'expérience acquise lors du geste traditionnel est supérieure à celle du geste cobot. Ce dernier serait encore en cours d'apprentissage (cf. Discussion),
- la taille des individus,
- l'état de santé des travailleurs en lien avec des troubles de santé avérés en matière de TMS,
- les représentations différentes des individus sur l'usage du cobot : certains ont cherché, de façon exploratoire, ce qu'il était possible de faire avec le cobot en passant à autre chose s'ils n'y parvenaient pas. D'autres ont cherché à faire exactement la même chose, puisque ce cobot avait été introduit avec l'idée, que son usage serait identique à celui de la meuleuse traditionnelle, avec le poids de la meuleuse réduit.

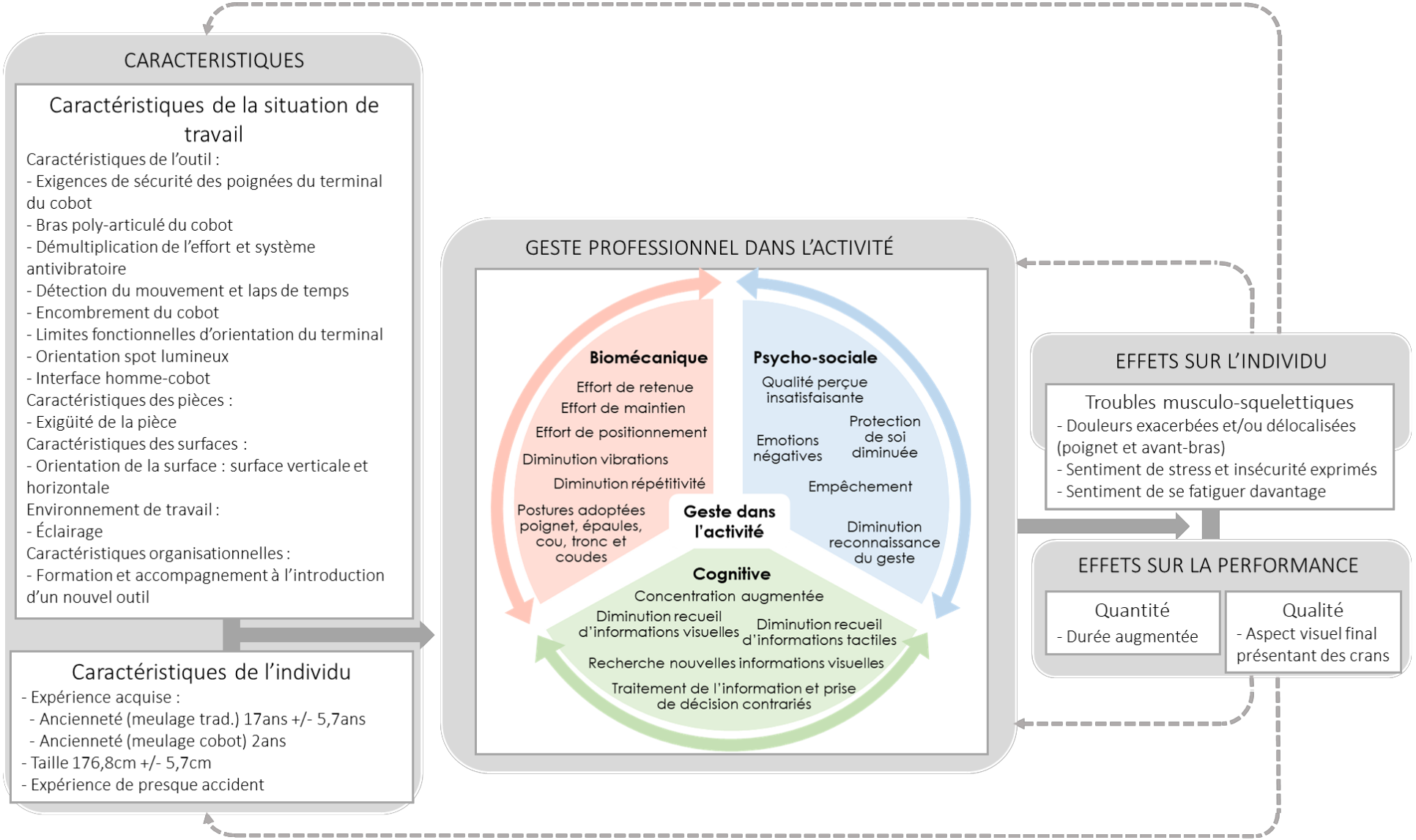


Figure 41 : Modélisation du geste cobot au sein de l'activité

Synthèse de la partie résultats

Les résultats ont tout d'abord décrit l'évolution des modes opératoires et des dimensions biomécanique, cognitive et psycho-sociale entre les gestes traditionnels et les gestes cobot. L'analyse du geste dans l'articulation de ses dimensions a permis de mettre en évidence que l'ambition, à l'origine du projet d'introduction du cobot, focalisée sur la réduction de l'effort lié au port de l'outil et des vibrations pouvait être réductrice et avait sous-estimé l'impact sur l'ensemble des dimensions du geste. Les trois exemples d'articulations entre les différentes dimensions de celui-ci ont montré, que l'usage du cobot permet de réduire l'effort lié au port de l'outil, mais que cela diminue le recueil d'une information tactile utile au meulage (retour d'effort/vibrations), et crée de nouveaux types d'effort différents. De plus, le recueil des informations visuelles évolue également avec l'usage du cobot – difficulté pour observer en continu les défauts meulés et le besoin de rechercher de nouvelles informations visuelles (bras du cobot et feu tricolore) – engendrant notamment l'adoption de postures contraignantes. Enfin, nous avons montré que la diminution de la répétitivité est en lien avec de l'empêchement : le cobot contraint le rythme de travail. Les ébarbeurs ne peuvent plus varier la direction et l'amplitude des mouvements nécessaires pour atteindre la qualité souhaitée.

Ainsi, la possibilité d'ajuster le geste professionnel, aux caractéristiques de la situation de travail et aux caractéristiques propres aux ébarbeurs, peut être mis en échec lors de l'usage du cobot : les douleurs ressenties sont exacerbées, le sentiment de se fatiguer davantage émerge ainsi que de l'insécurité et du stress, la durée du geste augmente, et la qualité n'est pas satisfaisante pour ces professionnels.

Enfin, l'analyse du geste a permis de questionner une diversité d'éléments à prendre en compte, pour agir en matière de prévention des TMS dans ce contexte de robotique collaborative, vis-à-vis des caractéristiques fonctionnelles du cobot, des pièces, des surfaces meulées, de l'environnement physique et des caractéristiques organisationnelles. Des caractéristiques propres aux ébarbeurs ont également été soulevées, en lien avec l'ancienneté et l'expérience acquise, l'expérience de presque accident, les données anthropométriques et leurs représentations.

Partie 4 : Discussion

Nos résultats soutiennent la thèse générale suivant laquelle l'usage du cobot a des conséquences sur l'articulation de l'ensemble des dimensions du geste professionnel et que l'analyse de l'évolution du geste professionnel est nécessaire pour comprendre les effets de l'usage du cobot et identifier les caractéristiques de la situation de travail à transformer dans une perspective de prévention des TMS. Cette discussion s'organise en trois parties. La première porte sur la discussion de nos résultats vis-à-vis de la littérature sur la prévention des TMS et les robots collaboratifs. La seconde expose les limites de cette recherche. Enfin, la dernière partie s'intéresse aux apports pratiques et scientifiques de cette thèse et ses perspectives.

1. Évolution du geste professionnel lors de l'usage d'un cobot : lien avec la prévention des TMS

1.1. Évolution des dimensions du geste professionnel

Nos résultats montrent que l'usage du cobot permet de diminuer l'effort lié au port de l'outil ressenti par les travailleurs. Une étude fondée sur la simulation numérique menée par Maurice et al. (2017) montre également que l'effort global diminue lors de l'usage d'un cobot (type « collaboration directe » comme celui analysé dans notre recherche). Ces auteurs soulèvent la nécessité de s'assurer que l'usage d'un cobot n'engendre pas d'efforts supplémentaires et ne crée pas de nouvelles situations à risque de développement de TMS. L'analyse de l'évolution du geste professionnel menée dans notre recherche montre, en effet, que de nouveaux types d'efforts différents émergent lors de l'usage du cobot. Ces nouveaux efforts, maintenus durant le geste cobot, sont ressentis comme de plus faible intensité par rapport au geste traditionnel et peuvent être à risque de survenue de fatigue des muscles extenseurs des avant-bras (Forsman, Taoda, Thorn, & Zhang, 2002). L'analyse des douleurs suite au geste réalisé avec le cobot montre que les ébarbeurs expriment ressentir des douleurs au niveau des avant-bras et des poignets. Ces douleurs ne sont pas ou peu exprimées suite au

geste traditionnel. Il convient alors d'être vigilant pour ne pas déplacer la problématique de survenue de TMS d'une partie à une autre de l'appareil locomoteur (Atain-Kouadio et al., 2015).

L'analyse des postures adoptées par les ébarbeurs montre qu'il existe une grande diversité interindividuelle lors du geste traditionnel et lors du geste cobot. En outre, selon l'articulation, l'orientation de la surface travaillée et l'opérateur, les postures adoptées peuvent, dans les deux cas (traditionnel et cobot), se situer dans des zones articulaires non recommandées ou devant être évitées (AFNOR, 2008; Aptel et al., 2000; McAtamney & Nigel Corlett, 1993). Lors de l'usage du cobot, les postures adoptées par les ébarbeurs pouvaient se situer plus ou moins longtemps dans des zones à risque de développement de TMS en fonction de l'opérateur observé et de la surface travaillée. D'autres études scientifiques sur l'usage de robot collaboratif montrent également que les utilisateurs peuvent adopter des postures contraignantes (Jocelyn et al., 2017; Maurice, Measson, Padois, & Bidaud, 2013; Maurice, Padois, Measson, & Bidaud, 2017). L'usage du cobot ne semble pas toujours être en faveur d'une exposition plus limitée aux postures à risque de développement de TMS.

Nous montrons également que la répétitivité des mouvements diminue lors de l'usage du cobot. Néanmoins, les ébarbeurs ne parviennent pas à réaliser la totalité de leur tâche (ex. finition de la surface verticale). Maurice et al. (2017) discutent le fait que la répétitivité n'est pas analysée dans leur étude et qu'il convient de la prendre en compte dans de futures analyses. Ces auteurs sont également vigilants quant à la possibilité que le cobot impacte le rythme de travail des utilisateurs. Nos résultats confirment cette vigilance : dans notre cas, l'usage du cobot considéré dans cette étude, contraint le rythme de travail des opérateurs. Ils n'ont plus la possibilité de varier différentes directions et amplitudes de mouvements comme lors du geste traditionnel.

Nos résultats montrent également que la concentration estimée par les travailleurs augmente lors de l'usage du cobot. Or, une augmentation de la concentration peut avoir des conséquences sur l'activité musculaire et participer ainsi à la dynamique de survenue de TMS (diminution des périodes de repos musculaire, augmentation de l'activité des muscles) et avoir alors des incidences sur les douleurs ressenties (Toulouse et al., 2013). Contrairement à nos

résultats, une étude de laboratoire (Fournier et al., 2022) montre que la charge cognitive perçue par les utilisateurs n'est pas impactée par l'utilisation du cobot. Toutefois, l'étude concerne un cobot de type « collaboration indirecte », le type de collaboration du cobot pourrait peut-être avoir un impact sur la charge cognitive des travailleurs. Dans notre étude, l'augmentation de la concentration s'articule avec le besoin de rechercher de nouvelles informations visuelles lors de l'usage du cobot : observer le bras du cobot et/ou le feu tricolore par crainte que le cobot dysfonctionne. Blaise et al. (2020) mettent également en avant que la charge cognitive des travailleurs peut s'accroître du fait de la nécessité d'observer le cobot. De plus, nos résultats montrent que la possibilité de recueillir des informations sensorielles est réduite lors de l'usage du cobot ; visuelles d'une part vis-à-vis des difficultés à observer en continu les défauts meulés et tactiles d'autre part vis-à-vis du faible ressenti du disque en contact de la surface meulée (retour d'effort/vibrations). Un dossier de l'INRS sur les nouvelles technologies d'assistance physique (INRS, 2015) évoque également que leur usage peut modifier les repères sensoriels du travailleur pour s'adapter à la démultiplication de l'effort. Dans notre cas, la démultiplication de l'effort et la diminution des vibrations permet, d'une part, de soulager les ébarbeurs du port du poids de la meuleuse et du ressenti de vibrations mais, d'autre part, diminue la possibilité de recueillir une information tactile : le ressenti du disque en contact de la surface (retour d'effort/vibrations). Nos résultats montrent que la diminution de la possibilité de recueillir des informations sensorielles entraîne, chez ces professionnels, la peur de faire de la « non-qualité » en creusant la pièce au risque de la mettre au rebut par exemple. Or, « l'appréhension de la non-qualité est une source de stress […] de petites erreurs pouvant entraîner de grandes conséquences » (Denis et al., 2016, p. 10) et le stress peut aussi agir sur la survenue de TMS (Aptel & Cnockaert, 2002; Leino, 1989).

De plus, l'analyse du geste menée dans cette étude permet d'articuler le besoin de rechercher de nouvelles informations visuelles avec les émotions ressenties par les opérateurs. Peshkin et Colgate (1999) supposent qu'un effet positif de l'usage d'un cobot pourrait être de prévenir les accidents. Or, dans notre cas, de par l'expérience de presque accident, certains travailleurs ont peur que cela ne se réitère et s'en prémunissent en observant ponctuellement le bras du cobot. Notre résultat est cohérent avec ceux de Jocelyn et al. (2017) qui avancent également qu'il peut exister des risques de chocs lors de l'usage d'un cobot. La peur de

l'accident est un des facteurs de risque psycho-sociaux selon Gollac et Bodier (2011). Le lien entre la survenue de risque psycho-sociaux et de TMS est maintenant largement admis dans la littérature (Aptel et al., 2011; Aublet-Cuvelier, Coutarel, & Cuny-Guerrier, 2019; Roquelaure, 2018).

Nos résultats montrent également que de nombreux empêchements sont vécus par les ébarbeurs lors de l'usage du cobot. Or, la littérature sur le « geste empêché » montre que celui-ci peut expliquer la survenue des TMS (Clot, 2008, 2010; Sznelwar, Mascia, & Bouyer, 2006) : « les TMS sont aussi la conséquence de l'empêchement de pouvoir réaliser les gestes qui, justement, seraient en mesure de les prévenir » (Bourgeois et al., 2006, p. 90). Les ébarbeurs sont notamment empêchés dans l'élaboration de certains modes opératoires : ils ne peuvent plus modifier le positionnement des mains sur l'outil, l'orientation de la meuleuse en fonction des besoins ainsi que les directions et l'amplitude des mouvements à réaliser etc. (cf. partie Résultats). Ceci « enferme » les travailleurs dans une façon de faire et les empêche de pouvoir agir vis-à-vis de leur protection de soi ou de la performance à atteindre. Du point de vue de la prévention des TMS, l'enjeu serait de considérer ces empêchements comme des zones potentielles de développement (Simonet, 2011) sur lesquelles agir dans le futur : « installer le corps agissant dans une zone de développement potentiel pour éloigner l'avènement des maladies de l'organisme » (Simonet & Caroly, 2020, p. 25). En devenant objet de discussion, ces empêchements peuvent soit être pris en compte dans la conception future de la situation de travail incluant un cobot, soit évoluer collectivement.

Nous montrons également que la possibilité d'être reconnu par les collègues et la hiérarchie se modifie lors de l'usage du cobot. Or, la reconnaissance du geste est « une voie d'analyse importante pour comprendre la survenue des TMS » (Bourgeois et al., 2006, p.99). La psychodynamique du travail montre bien l'importance de la reconnaissance d'autrui dans la construction de l'identité au travail et son rôle dans la survenue de TMS (Alderson, 2004; Dejours, 2003; Dessors, 1995; Pezé, 1998). Cette reconnaissance peut être de deux types : le jugement d'utilité porté par l'encadrement et le jugement de beauté porté par les collègues. Si la situation ne propose pas de voies de reconnaissance du geste alors l'image de soi peut être altérée, le sens du geste appauvri et, à terme, un processus de somatisation s'installe et peut

provoquer l'apparition de TMS (Pezé, 1998). Nos résultats montrent que la reconnaissance est altérée lors de l'usage du cobot car les travailleurs ne peuvent plus choisir les mouvements à réaliser leur permettant d'atteindre la performance souhaitée en termes de qualité et de durée.

En effet, bien que la répétitivité des mouvements diminue lors de l'usage du cobot, les ébarbeurs sont empêchés dans le choix des mouvements à réaliser. Ils n'ont plus la possibilité d'alterner différentes directions et amplitudes de mouvements nécessaires pour atteindre la performance souhaitée. Ils décident alors majoritairement de repasser par la suite avec la meuleuse traditionnelle ce qui donne lieu à de la frustration voire à un sentiment d'inutilité vis-à-vis de l'usage du cobot. Cette qualité empêchée et ces émotions ressenties impactent le sens du geste. Ce résultat vient en échos aux travaux de Pezé (1998) qui soulèvent également le risque que le sens du geste soit appauvri si l'organisation prescrit des gestes répétitifs et monotones pouvant provoquer à terme un processus de somatisation et déclencher notamment la survenue de TMS. Nous supposons que ce rythme « contraint » par le cobot est dû à l'existence d'un laps de temps entre la détection du mouvement du travailleur et la génération du mouvement « réel » du cobot. Ce temps de latence a également été évoqué par Denis durant une conférence sur les exosquelettes (2021) : lors de l'usage d'exosquelette actif, il existe un délai entre la commande de l'individu et la réponse du dispositif qui questionne également les effets des exosquelettes sur les gestes des travailleurs en situation réelle de travail.

1.2. Évolution de la performance du geste professionnel

Nos résultats questionnent également les conséquences de l'usage du cobot sur la performance du geste en termes de durée et de qualité. Peshkin et Colgate (1999) supposent que l'usage d'un cobot permettrait d'une part de réaliser des mouvements plus rapidement et ainsi de gagner en productivité et d'autre part d'avoir une influence positive sur la production en améliorant également la qualité et la précision. Nos résultats montrent cependant que la durée du meulage augmente lors de l'usage du cobot. Ceci est notamment dû à l'évolution des mouvements effectués et des informations sensorielles et à la nécessité pour les ébarbeurs de

repasser ensuite avec la meuleuse traditionnelle pour faire les finitions de la surface. Des études menées en laboratoire montrent aussi que la durée de la tâche peut se révéler supérieure lors de l'utilisation du cobot par rapport à la tâche sans assistance (Cherubini et al., 2016; Fournier et al., 2022; Nussbaum et al., 2000; Sylla et al., 2014). Au contraire, une étude menée en laboratoire montre que la tâche est réalisée plus rapidement en situation d'assistance du cobot (Maurice et al., 2013), elle est basée sur la simulation numérique de mouvements d'un point A à un point B ce qui peut, en partie, expliquer la différence que nous observons en situation réelle de travail.

De plus, nos résultats montrent que la qualité finale obtenue est perçue par les ébarbeurs comme amoindrie lors de l'usage du cobot : l'aspect visuel des surfaces présente des crans suite au meulage avec l'usage du cobot tandis que celle meulées « traditionnellement » sont lisses, sans défauts apparents (ce qui explique d'ailleurs la décision prise de repasser par la suite avec la meuleuse traditionnelle). La qualité perçue ou attendue par les salariés n'est peut-être pas celle des concepteurs, ni de la hiérarchie. La qualité devrait être davantage discutée : la qualité de quel point de vue ?

Nos résultats s'appuient sur la perception de la qualité du point de vue des travailleurs. Lors de l'analyse rétrospective de l'historique du projet cobot (Schoose et al., 2020), nous avons questionné les différents acteurs gravitant autour du projet et montré que les représentations de cette dite-qualité étaient différentes. Certains membres de l'encadrement ont évoqué que les ébarbeurs pouvaient faire de la « sur-qualité » lors du meulage traditionnel, qu'ils étaient perfectionnistes et qu'ils ne parvenaient plus à la tenir avec l'usage du cobot. Un membre de l'encadrement a précisé que la qualité du travail réalisée avec le cobot pouvait convenir aux exigences de production mais que la pièce n'était pas aussi « belle » que lors du meulage traditionnel. En effet, une majorité des ébarbeurs a évoqué que le meulage réalisé avec le cobot était plus « grossier » et un des agents de maîtrise a partagé cette représentation en évoquant un meulage « moins fin » que lors de l'usage de la meuleuse traditionnelle. Cette notion de « sur-qualité » nous semble importante à discuter car nos résultats montrent que les critères de qualité des ébarbeurs intègrent le travail des autres et notamment celui des opérateurs de l'atelier suivant (usinage). Le travail prescrit des ébarbeurs est de meuler les surfaces à ébarber

et de ne pas meuler les surfaces qui seront usinées par la suite. Or, nous constatons que les travailleurs ont tendance à meuler l'ensemble des surfaces lors du geste traditionnel sans distinguer partie ébarbée/partie usinée. Ils cherchent, en effet, à anticiper le travail des opérateurs de l'atelier suivant afin de le minimiser. Par exemple, s'ils ne meulent pas l'ensemble de la surface verticale les opérateurs de l'atelier d'usinage auront plus de difficultés pour effectuer le perçage de cette surface afin de rassembler les différentes parties de la pièce, au risque même de détériorer les outils très onéreux si l'épaisseur est trop importante. Ainsi, il réside parfois une réalité productive de cette « sur-qualité ». De plus, certains membres de l'encadrement ne semblaient pas se représenter de différence au niveau de la qualité obtenue avec le cobot par rapport au meulage traditionnel. Nous supposons que, comme l'encadrement partait initialement du postulat que le cobot prendrait en charge le poids de la meuleuse et soulagerait les ébarbeurs de l'effort de meulage et des vibrations sans rien modifier par ailleurs, ils ne pouvaient se représenter une qualité différente de meulage. Clot et al. (2021) discutent de cette notion du travail « bien fait » et des contradictions qu'il peut y avoir entre les différents acteurs de l'organisation : « la tâche prescrite réalise également une autre idée de la qualité du travail : celle des dirigeants selon des critères qui sont les leurs. Sur le principe en effet, la hiérarchie peut légitimement incarner une définition officielle du « bien faire », même si cette définition contredit celle des travailleurs concernés » (p.34-35). Il conviendrait alors de faire dialoguer ces contradictions pour que cette préoccupation du « bien faire » soit davantage partagée : « Certes les différents critères de qualité du travail divisent et peuvent même empoisonner les rapports sociaux de tous les jours. Mais, autour de ces conflits pour le travail « bien fait », on peut aussi paradoxalement se rassembler, relier sans les confondre les diverses « parties prenantes » : ouvriers, managers et dirigeants, responsables syndicaux » (ibid. p.136).

Par ailleurs, la perception de la qualité n'est pas non plus partagée au sein du groupe professionnel des ébarbeurs. En effet, un seul des ébarbeurs (E1) évoque le fait, qu'avec l'usage du cobot il arrive à atteindre une qualité qui lui convient. Les résultats pour cet ébarbeur sur la qualité perçue de son travail sont à discuter : A-t-il les mêmes critères de qualité que ces collègues ? Existe-t-il une diversité interindividuelle sur ces critères de qualité ? Du fait d'aléas du terrain, nous n'avons pas pu approfondir ses critères de qualité ni ouvrir d'espace de dialogue entre les travailleurs sur ce point. Or, il aurait été intéressant de faire dialoguer cette

notion de travail « bien fait » entre pairs : « le conflit instauré entre professionnels autour des critères du travail soigné qui convoque chacun à y mettre du sien. C'est la condition pour conserver un avenir possible au travail bien fait » (Clot et al., 2021, p. 34). « Par conséquent, il nous semble que si l'on souhaite engager des processus de prévention durables concernant les TMS et les RPS, il y a un besoin majeur à comprendre les enjeux de qualité dans le travail, ce qui empêche qu'un travail de qualité puisse être fait et enfin permettre que cette activité « refrénée » puisse être accomplie. » (Petit & Dugué, 2013, p. 5).

1.3. Caractéristiques influençant l'évolution du geste professionnel

Enfin, l'analyse du geste met en évidence différentes caractéristiques de la situation influençant son évolution qui ne sont pas toujours en faveur de la prévention des TMS. Nos résultats montrent que différentes caractéristiques fonctionnelles du cobot impactent l'articulation des dimensions du geste et peuvent être considérées comme des points de vigilance à destination des concepteurs de cobot et des entreprises souhaitant investiguer ce sujet. Les exigences de sécurité des poignées du terminal du cobot font émerger un effort de maintien des poignées et obligent à garder le même positionnement des mains sur l'outil ce qui ne permet pas aux opérateurs de se soulager des douleurs ressenties au niveau des poignets notamment. Cet élément a été soulevé dans la littérature en mettant en avant le risque de créer de la fatigue et des douleurs au niveau des poignets (Atain-Kouadio et al., 2015). Les limites fonctionnelles d'orientation du terminal du cobot et l'architecture et le fonctionnement du bras poly-articulé du cobot empêchent de varier l'inclinaison du disque par rapport à la surface et d'avoir un contact permanent du disque sur la surface entraînant ainsi l'émergence d'un effort de positionnement du terminal du cobot et une diminution de la précision du geste des travailleurs. Par ailleurs, l'observation en continu des défauts meulés s'avère difficile en raison ; d'une part d'un faible éclairage de la surface qui aurait peut-être notamment pu être compensé par les spots lumineux du terminal du cobot s'ils avaient été orientés vers la surface meulée et non vers l'avant ; d'autre part par l'encombrement du cobot, notamment l'aspect « massif » du terminal du cobot avec une distance entre les poignées et le disque de la meuleuse supérieure à celle de la meuleuse traditionnelle. Ce qui a entre autres comme conséquence l'adoption de postures contraignantes. L'interaction cobot-travailleur

influence également l'évolution du geste : l'emplacement des informations visuelles sur le fonctionnement du cobot (feu tricolore) et le manque d'informations sur la raison de la mise en non-fonctionnement du cobot notamment, obligent les opérateurs à adopter des postures contraignantes et renforcent aussi le vécu de stress et d'insécurité lors de l'usage du cobot. À cela s'ajoute que la notice de fonctionnement du cobot doit être simple, visuelle pour être comprise facilement par le plus grand nombre et en tenant compte des caractéristiques individuelles des travailleurs (maîtrise de la langue française…). De plus, la détection du mouvement de l'individu interprétée ensuite par un système de commande afin de générer le mouvement « réel » du cobot et le laps de temps entre ces deux moments, d'une part, diminue la répétitivité des mouvements des travailleurs, mais d'autre part, impose une façon de faire aux ébarbeurs qui les empêche d'atteindre la qualité souhaitée et de donner du sens au geste professionnel. Enfin, la démultiplication de l'effort et l'aspect antivibratoire permis par ce cobot permettent de diminuer l'effort ressenti lié au port de l'outil et les vibrations ressenties mais diminuent aussi la possibilité de recueillir une information tactile (retour d'effort/vibrations) utile à la réalisation du meulage. Une étude (Atain-Kouadio et al., 2015) avance que « cette perte d'informations devra être compensée par l'opérateur en mobilisant d'autres sens comme la vue ou l'ouïe. » (p.564). Or, nos résultats montrent que les informations visuelles évoluent également avec l'usage du cobot et que l'ouïe n'est pas mobilisée car les ébarbeurs sont équipés d'équipements de protection individuelle conséquents (cagoule ventilée, bouchons d'oreille…). En conséquence, ceci donne lieu à de l'appréhension de faire de la « non-qualité » en rentrant dans la pièce et fait émerger un nouvel effort de retenue du terminal du cobot.

Nos résultats montrent également l'importance de varier les contextes d'usage lors du développement d'un cobot. En effet, l'évolution du geste professionnel est aussi influencée par le couplage entre les caractéristiques du cobot et les caractéristiques des pièces et des surfaces meulées. La hauteur et la taille des pièces couplées à l'encombrement du cobot contraint le choix du positionnement de l'individu par rapport à la pièce et, de fait, sa possibilité d'agir en faveur de sa protection de soi en évitant d'adopter des postures contraignantes. L'exiguïté des pièces couplée aux caractéristiques du cobot ne permet pas de choisir l'inclinaison du disque par rapport à la surface nécessaire pour atteindre la qualité escomptée ce qui fait alors émerger des efforts supplémentaires. De plus, l'exiguïté des pièces en lien avec le vécu de

dysfonctionnement et de presque accident, entraîne aussi un ressenti de peur pour les ébarbeurs vis-à-vis de leur sécurité : peur d'être « coincé » à l'intérieur de la pièce si le cobot dysfonctionnait. Par ailleurs, l'orientation des surfaces est également importante à prendre en compte : nos résultats montrent que le meulage des surfaces verticales est plus difficilement réalisable que le meulage des surfaces horizontales. Or, c'est principalement pour les surfaces verticales que l'assistance d'un cobot serait utile aux ébarbeurs. Le meulage de ces surfaces demande en effet de maintenir le poids de la meuleuse en hauteur et d'effectuer un effort d'appui important suivant une direction perpendiculaire à celle de la force gravitationnelle pour réussir à éliminer les défauts présents. Il conviendrait alors de s'assurer que l'usage du cobot conviennent à toutes situations ou de discuter avec les professionnels des situations à privilégier et de faire évoluer la technologie des cobots. De plus, les résultats montrent que ces deux types de surfaces font intervenir des efforts différents avec l'usage du cobot : un effort pour retenir le terminal du cobot émerge lors du meulage d'une surface verticale, tandis que pour le meulage d'une surface horizontale c'est davantage un effort pour positionner le terminal du cobot. Enfin, les caractéristiques des pièces couplées au rayon d'action du bras du cobot influencent également l'évolution du geste. La particularité de cette fonderie est qu'elle fabrique des pièces unitaires de formes variables et de très grandes dimensions. Ces dernières peuvent atteindre 8 mètres de longueur. Or, le rayon d'action du bras du cobot est d'environ deux mètres et au-delà, il nécessite d'être déplacé. Il est alors nécessaire de déplacer le cobot plusieurs fois pour réaliser la totalité de la pièce (au minimum trois fois). Le déplacement du cobot n'est pas aisé : il nécessite l'usage d'un pont roulant pour le manœuvrer et son attache par un crochet doit se faire en haut du mat du cobot sans sécurité prévue à cet effet. Les ébarbeurs prennent alors appui comme ils le peuvent sur le socle du cobot avec une main munie de la télécommande du pont et l'autre accrochant le crochet du pont au sommet du cobot.

2. Limites de cette recherche

2.1. Situation d'usage du cobot

Comme nous l'avons précisé dans le contexte de cette étude (cf. partie 3 du chapitre 5), au début de celle-ci, le cobot était en panne. Il a fallu quelques mois pour le réparer et nous supposions qu'une fois réparé le cobot serait utilisé quotidiennement. Or, cela n'a pas été le cas, le cobot était très peu utilisé par les travailleurs. Avec l'accord des ébarbeurs et sur la base du volontariat, il a été possible d'observer cinq ébarbeurs travaillant avec le cobot. Ceci amène à préciser le « contexte d'usage » du cobot de cette étude où l'activité avec le cobot n'était pas une situation « normale/naturelle » où l'activité serait réalisée habituellement.

De plus, l'historique des dysfonctionnements et des mésaventures vécues par les travailleurs lors de l'usage du cobot fait que la majorité des ébarbeurs continue à « préférer » voire même à idéaliser le meulage traditionnel. Or, la situation traditionnelle est loin d'être idéale comme en témoigne l'état de santé des opérateurs. Il convient donc d'être vigilant quant à l'interprétation des résultats. Des données « objectives » auraient permis de compléter les données recueillies dans cette étude. Par exemple, pour l'estimation de l'effort global ressenti, des analyses quantitatives via des mesures biomécaniques auraient pu apporter d'autres éléments complémentaires et faire l'objet de discussions entre les opérateurs (Savescu, Riahi, Wild, & Desbrosses, 2021; Savescu & Simonet, 2020; Savescu et al., 2020).

Enfin, le cobot analysé dans cette étude est de type « collaboration directe » avec la spécificité qu'il est manipulé par l'opérateur. C'est un robot d'assistance physique sans contention manipulé par l'opérateur. Il est catégorisé comme étant un cobot de par sa programmation pour amplifier l'effort exercé par l'utilisateur mais n'est cependant pas complètement autonome dans la mesure où, sans l'action de l'individu, il ne peut fonctionner. Ainsi nous ne pouvons transférer nos résultats pour toute situation d'usage d'un cobot ni même pour ce type de cobot où la réplication d'autres études de cas permettrait d'envisager la généralisation de résultats.

2.2. Analyse de deux gestes avec des niveaux d'apprentissage différents

L'analyse des données de cette recherche nous laisse supposer que nous ne sommes pas au même niveau de maîtrise du geste professionnel entre celui traditionnel et celui assisté par le cobot. Le geste cobot n'est pas encore construit contrairement au geste traditionnel réalisé depuis environ 17 ans. Nous avons ainsi mis en exergue différents éléments pouvant expliquer les difficultés vécues par les travailleurs à prendre en compte dans la situation de travail future. Mais cela peut être contrasté par le fait que les individus n'ont pas encore complètement construit le geste. Nous ne pouvons affirmer que le geste cobot est plus facile ou plus difficile dans la mesure où la situation analysée s'intéresse à deux gestes avec des niveaux d'acquisition différents, le geste cobot étant en cours d'apprentissage. Ainsi pour comprendre l'effet « complet » de l'usage du cobot, il faudrait réitérer l'analyse avec d'autres études de cas. Ceci pose néanmoins des questions sur comment concevoir en simulant un geste futur qui n'existe pas encore et sur le développement d'un nouveau geste dans l'ensemble de ses dimensions lors de l'introduction de ces nouvelles technologies (cf. apports et perspectives de cette recherche). En revanche, nos résultats montrent que contrairement à ce qui est supposé lors de l'introduction d'un cobot, l'expertise des travailleurs n'est pas conservée. Un cobot ne va pas soulager les individus du poids de l'outil, de l'effort, des vibrations…sans rien modifier par ailleurs : tout évolue.

2.3. Méthodologie

Comme nous l'avons précisé précédemment, le geste traditionnel de l'opérateur qui apprécie travailler avec le cobot (E1) n'a pas pu être observé. Ainsi, nous n'avons pas pu analyser l'évolution de son geste professionnel avec l'usage du cobot. Or, il aurait été intéressant de pouvoir « comparer » ses deux gestes pour voir s'il existe des différences entre cet opérateur et les autres ébarbeurs : peut-être aurions-nous montré que les postures évoluaient différemment par exemple ? De même, nous n'avons pas pu réitérer les observations et les entretiens d'auto-confrontation individuelle avec lui lors du geste cobot. Il aurait été intéressant de poursuivre l'analyse avec cet ébarbeur qui a une vision très différente de l'usage du cobot par rapport à ses collègues.

À cela s'ajoute que la méthodologie a été contrariée par la crise sanitaire liée à la Covid-19. Il aurait été pertinent de réaliser des entretiens d'allo-confrontation individuelle et croisée et des entretiens collectifs avec l'ensemble des ébarbeurs pour apporter des données supplémentaires (Mollo & Falzon, 2004). Il aurait également été intéressant d'ouvrir des espaces réflexifs entre les ébarbeurs sur les évolutions du geste constatées ou encore sur le sens du geste et la notion de « travail bien fait ».

De plus, l'analyse de l'évolution du geste s'est faite sur une typologie de pièces « les pièces courbes » en distinguant deux orientations de surfaces planes – horizontales et verticales – pour essayer de trouver des invariants dans l'ensemble des pièces fabriquées par cette fonderie. Néanmoins, il aurait également été intéressant de mener cette analyse sur d'autres caractéristiques de pièces, pour des surfaces arrondies par exemple.

Une autre limite de l'étude est de ne pas avoir distinguer la dimension psychologique et la dimension sociale. À notre sens, cela se justifie par le métier que nous avons analysé. Les ébarbeurs travaillent seuls sur la pièce que ce soit avec la meuleuse traditionnelle ou avec le cobot. Toutefois, notre étude a tout de même montré que les travailleurs intègrent le collectif dans leur façon de meuler et le regard des autres dans leur façon de faire (cf. partie Résultats). Il serait intéressant dans de futures études sur le sujet de dissocier la dimension psychologique et la dimension sociale pour mieux appréhender les effets de chacune des dimensions et leurs interactions au sein du geste.

3. Apports et perspectives de cette recherche

3.1. Conception d'une situation de travail future intégrant un cobot

Lors de la conception d'un cobot, il est nécessaire de faire varier les contextes d'usage futur de celui-ci. Nos résultats montrent, en effet, que le geste professionnel des ébarbeurs évolue lors de l'usage du cobot du fait d'un couplage entre des caractéristiques fonctionnelles du cobot et des caractéristiques des pièces meulées. Un ensemble non-exhaustif de caractéristiques influençant l'évolution du geste des ébarbeurs a pu être mis en évidence (cf.

Résultats). Ces caractéristiques pourraient être considérées comme des points de vigilance à prendre en compte par les concepteurs de cobot et les entreprises souhaitant investiguer ce sujet dans un objectif de prévention des TMS.

Nos résultats questionnent également les enjeux de santé et de sécurité et leur interconnexion. Nous avons montré, par exemple, que la sécurité du cobot réside notamment dans des gâchettes de sécurité positionnées sous les poignées du terminal du cobot permettant, dès que l'utilisateur relâche la pression sur ces gâchettes, d'arrêter le fonctionnement du cobot. Ce positionnement obligatoire des mains sur les poignées du terminal du cobot contraint les opérateurs et donne lieu à l'adoption de postures sollicitantes des poignets. Comment faire pour répondre à la fois à la sécurité machine et au point de vue de la santé en matière de TMS ?

De plus, la volonté de concevoir des cobots dans le but de prévenir les TMS est majoritairement axée sur la diminution des sollicitations biomécaniques. Dans notre cas, l'introduction du cobot s'est faite avec une vision partielle des TMS centrée sur la dimension biomécanique du geste, qui plus est réduite à l'effort lié au port de l'outil et aux vibrations (Schoose et al., 2020; Schoose et al., 2022). Ce cobot a été intégré dans l'activité d'ébarbage avec le souhait de soulager les travailleurs de ces sollicitations en pensant que cela ne changerait rien par ailleurs, que leur expertise et leur savoir-faire seraient préservés. Ces représentations erronées de la survenue de TMS et de l'activité des travailleurs ont alors été matérialisées dans le développement et l'intégration du cobot (Daniellou, 1992; Daniellou & Garrigou, 1990; Daniellou & Garrigou, 1993; Darses & Wolff, 2006; Roquelaure, 2016) et ont eu des conséquences négatives sur la santé des opérateurs et sur la production (quantité et qualité du travail). Pour améliorer la prévention des TMS, un des enjeux clés reposerait sur une représentation commune des concepteurs et des différents acteurs de l'entreprise des modèles de survenue de TMS et du geste professionnel (Caroly et al., 2008b). « Les sur-sollicitations biomécaniques ne sont qu'un des aspects de l'apparition de ces troubles ; leur limitation est donc une condition nécessaire mais non suffisante pour « maintenir en santé » les travailleurs. Si cette limitation s'accompagne […] d'une limitation d'un « pouvoir d'agir » des opérateurs, on risque au contraire de créer les conditions d'une dégradation de la santé des

travailleurs » (Barcellini, Buchmann, & Lafeuillade, 2019, p. 5). Nos résultats montrent, tout d'abord, que la dimension biomécanique évolue lors de l'usage du cobot et n'est pas toujours en faveur d'une exposition plus limitée aux facteurs de risque biomécaniques de survenue de TMS (Schoose et al., 2022). Les ébarbeurs se retrouvent, de plus, empêchés vis-à-vis de certains modes opératoires. Lors de l'usage du cobot, le geste professionnel de ces travailleurs évolue dans l'ensemble de ses dimensions biomécanique, cognitive et psycho-sociale. Le geste traditionnel est différent du geste cobot : l'introduction d'une nouvelle technologie n'est pas une solution « clé en main » et nécessite une analyse globale de la situation de travail pour s'assurer d'être au plus près du travail réel des individus. Il conviendrait donc, en amont de l'introduction d'un nouveau dispositif de travail, d'analyser l'ensemble de la situation de travail afin de s'assurer qu'il permette à l'individu en activité de répondre aux enjeux de santé et de performance (St-Vincent et al., 2011; Vézina, 2001) où analyser « le passé et le présent constitue un prérequis pour pouvoir penser le travail du futur » (Barcellini, 2020, p. 22). Mais comment inclure tous ces éléments dans le travail de conception d'un cobot ? Comment compléter les outils des concepteurs pour ne pas réduire les projets de développement et d'intégration d'un cobot à la seule prise en compte des facteurs de risque biomécanique ? Comment appréhender un geste futur qui n'existe pas encore pour concevoir un cobot ?

L'ergonomie de l'activité œuvre depuis longtemps à instruire des démarches de conduite de projet de conception (Barcellini, Van Belleghem, & Daniellou, 2013; Daniellou, 1992, 2007; Daniellou & Garrigou, 1990; Van Belleghem, 2018) afin de « dépasser des écueils classiques des projets de conception pour in fine aboutir à la conception de situations d'activités futures » (Folcher, 2015 cité par Barcellini, 2020, p. 4). Les méthodologies de simulation de l'activité future, par exemple (Daniellou, 2007; Petit, 2005; Van Belleghem, 2018) pourraient être appropriées pour ces nouvelles situations de travail en transition vers l'Industrie du futur (Barcellini, 2020; Barcellini et al., 2019). Dans cette conception participative, les futurs utilisateurs sont partie prenante des décisions faites. Il ne suffit cependant pas de leur demander leur avis mais également de leur permettre de verbaliser, de restituer leur savoir-faire pour qu'il puisse être incorporé dans la conception de la situation de travail future par des méthodologies adéquates (Clot et al., 2000; Vermersch, 2006). La méthodologie déployée dans cette thèse pour prendre en compte l'ensemble des dimensions du geste s'est avérée très

intéressante pour comprendre d'une part, comment évolue le geste professionnel lors de l'introduction d'un cobot et d'autre part, pourquoi il évolue en identifiant des éléments de la situation de travail. Elle pourrait être une voie pour tenir une analyse de toutes les dimensions du geste dans une approche systémique en amont d'un projet de conception et d'implantation d'un cobot. Cependant, cette méthodologie est longue et complexe et peut se révéler – comme l'analyse de l'activité dans les interventions à visée de prévention des TMS – en inadéquation avec les possibilités d'action des préventeurs sur le terrain du fait notamment de la diversité des contextes d'intervention et des contraintes temporelles qu'ils connaissent (Lamonde, 2000) : « cette démarche, qualifiée de systémique, a un prix : elle prend du temps » (Denis, St. Vincent, Jetté, Nastasia, & Imbeau, 2005, p. 47). Mais, elle nous semble indispensable.

Les TMS sont des pathologies multifactorielles et, encore aujourd'hui, nombre de modèles distinguent les dimensions et risquent de conduire à une fragmentation du travail. Il faudrait alors pouvoir analyser ensemble les dimensions du geste, articulées au sein de l'activité de travail pour être au plus près du travail réel des individus et de sa complexité. En outre, nos résultats ont mis en évidence des « conflits » entre les différentes dimensions du geste. Par exemple, il peut y avoir un « effet positif » sur la dimension biomécanique mais un « effet négatif » sur la dimension cognitive et/ou psychosociale ou inversement. Comment réussir à améliorer l'ensemble des dimensions et leur articulation ? Comment trouver un compromis qui permettent aux travailleurs de se « maintenir en santé » et de « tenir la performance » ? Ainsi, confère aux conflits exposés dans cette thèse, la recherche a encore à investiguer pour pouvoir agir toujours le plus favorablement possible à la prévention des TMS lors de l'introduction d'un cobot. Il importe au-delà de chercher à diminuer les sollicitations biomécaniques des travailleurs d'« être attentifs d'une part à ne pas augmenter la charge cognitive mais également à ne pas déposséder l'opérateur du sens de son travail » (Landry, Cippelletti, & Azouaghe, 2020). L'objectif de l'analyse du geste professionnel est de garder ensemble des dimensions qui traditionnellement sont séparées, avec les limites que cela impose bien entendu. En effet, si l'on souhaite approfondir une dimension pour en voir ses effets sur les autres ou ses interactions, il faut évidemment passer par une phase de décomposition et d'analyse en profondeur. Cette analyse « articulée » réussit à garder différents éléments interconnectés. Ainsi la complémentarité des approches semble une voie future pour prévenir les TMS dans ce

contexte de robotique collaborative (Bounouar, Béarée, Siadat, & Benchekroun, 2021; Lafeuillade, 2021; Moulières-Seban, Bitonneau, Thibault, Salotti, & Claverie, 2016).

En outre, l'objectif n'est pas de « viser à prévoir, pour les contraindre, tous les gestes […] des opérateurs […] Il va s'agir au contraire d'évaluer « l'espace des formes possibles de l'activité future » : les dispositifs techniques et organisationnels sont-ils conçus d'une manière telle qu'il existe, dans différents cas de figure, la possibilité pour les opérateurs d'élaborer un mode opératoire efficace et compatible avec leur santé ? Autrement dit, existe-t-il des marges de liberté suffisantes pour faire face à la variabilité industrielle, compte tenu de la diversité des individus et de leur variabilité interne ? (Daniellou & Garrigou, 1990) » (cité par Daniellou, 1992, p. 37). Comment concevoir une future situation de travail incluant un cobot qui laisse aux individus des marges de manœuvre pour qu'ils puissent élaborer leur « signature gestuelle », leur « diversité gestuelle » (Corbeil et al., 2022; Coutarel et al., 2022) ? Nos résultats montrent qu'il existe une importante variabilité gestuelle qu'il est nécessaire de prendre en compte et de permettre lors de la conception de future situation de travail intégrant un cobot mais également lors de l'élaboration d'un contenu de formation (cf. infra). Nous avons montré que lors de l'usage du cobot, le geste du travailleur peut parfois être limité en étant obligé de travailler d'une certaine manière. Par exemple, certes la répétitivité des mouvements diminue mais les ébarbeurs ne peuvent plus agir sur la vitesse, l'amplitude et la direction des mouvements réalisés leur permettant traditionnellement de faire un « bon travail ». Ainsi, en cherchant à qualifier ce qu'est la répétitivité pour les ébarbeurs, nous avons pu comprendre que le rythme de travail est contraint lors de l'usage du cobot. Coutarel (2015) discute également de l'aspect réducteur du qualificatif « répétitif » à « une question de fréquence de mouvement » alors qu'en cherchant à comprendre ces gestes répétitifs, en « les examin[ant] sérieusement [cela] conduit […] à montrer des formes sous-estimées d'expertise » (Coutarel, 2015, p. 210). Ceci fait également échos aux travaux de Karsenty (2012) : « la vitesse d'exécution des actions – critère classiquement présent dans les guides ergonomiques de conception – n'est pas un critère qui a beaucoup de sens en soi ; il n'en a qu'en regard de ce qui compte pour les agents, de ce qui fait que le travail est satisfaisant pour eux. » (p.3). La situation de travail d'usage du cobot pourrait alors restreindre la marge de manœuvre situationnelle de l'opérateur. Cette dernière est pourtant essentielle pour préserver sa santé

(Coutarel et al., 2022). Il serait intéressant de poursuivre cette recherche en faisant le lien avec la marge de manœuvre situationnelle nécessaire à prendre en compte et à développer pour et par les individus afin qu'ils aient les ressources nécessaires pour agir favorablement, dans notre cas, pour la prévention des TMS. Comment construire un espace de développement du geste professionnel (la marge de manœuvre situationnelle) et concevoir les conditions favorables à ce développement (les marges de manœuvre) pour prévenir la survenue des TMS dans ce contexte de robotique collaborative ?

De plus, le terme robots « collaboratifs » nous semble également à discuter. Ces robots ont initialement été définis comme des robots travaillant dans un espace de travail partagé et ayant une interaction directe avec un opérateur (Peshkin & Colgate, 1999). Il n'existe cependant pas de consensus dans la littérature sur la définition du terme « collaboratif » de ces robots (Barcellini, 2020). Qu'entend-t-on par collaboration ? Est-ce que le cobot et l'humain ne font que « partager un espace de travail » ? Et comment faire pour qu'une situation de travail soit réellement collaborative entre l'opérateur et le cobot ? Comment répartir les tâches entre ce « couple » ?

Notre étude concerne un type de cobot spécifique, un robot d'assistance physique sans contention manipulé par l'opérateur : « cette nouvelle famille de dispositifs entre le moyen d'assistance et le robot […] est programmable, mais elle a besoin de l'action de l'homme pour fonctionner. » (Moulières-Seban, 2017, p. 35). Sa particularité est en effet d'être manipulé par le travailleur. Nous avons montré que certains ébarbeurs optent pour une stratégie de « décomposition » de leur tâche de meulage en faisant le « dégrossissage » des surfaces avec le cobot et en reprenant ensuite la meuleuse traditionnelle pour les derniers travaux de « finition ». Ceci questionne l'organisation future et les conséquences que cela peut avoir sur le collectif : est-ce qu'un individu serait en charge de « dégrossir » avec le cobot et un second de faire les finitions ? Quel impact sur le sens donné à leur travail ? En réinjectant ce genre de préoccupation dans de futurs projets de conception ceci permettrait sûrement de « définir de manière itérative des scénarios de répartition des tâches « opérateurs-cobot » » (Barcellini, 2019, p. 9). Dans notre cas, avec ce type de cobot, ceci questionne la répartition des « tâches » entre celles faites avec le cobot et celles faites sans le cobot. Mais de manière générale, nous

nous interrogeons aussi sur la répartition des tâches entre le travailleur et un cobot plus « autonome » (type collaboration indirecte par exemple).

3.2. Développement du geste lors de l'introduction d'un cobot

Lors de l'analyse rétrospective du projet de développement et d'introduction du cobot nous avons cherché à analyser les représentations des différents acteurs sur la formation (Schoose et al., 2020). Nous nous sommes aperçus que ces dernières divergeaient. D'un côté l'encadrement pensait que la prise en main du cobot était intuitive puisque « *c'est toujours la même meuleuse, la même commande, le même bouton* ». En conséquence, la formation faite par le concepteur pour mettre en fonction le cobot aux ébarbeurs semblait « suffire » pour l'encadrement : « *la formation, c'était mise en route, calibrage et puis derrière c'est eux qui l'ont pris en main* ». De leur côté, les agents de maîtrise et les ébarbeurs ne trouvaient pas que la prise en main d'un tel outil était intuitive. La formation dispensée sur l'aspect fonctionnel du cobot – « *un truc vite fait du genre vous faites comme ça pour le démarrer* » expliquait un des agents de maitrise – ne leur a pas permis de le prendre en main. Il importe de faire la distinction entre mettre en route le cobot et comprendre son fonctionnement et être à l'aise pour l'utiliser de façon efficace et efficiente dans son activité. Ainsi, dans une première mesure, une formation à l'utilisation du cobot semble être un « prérequis » essentiel pour permettre aux individus de faire évoluer leur geste. Nous supposons, par exemple, que l'opérateur appréciant travailler avec le cobot (E1) ait obtenu des informations supplémentaires sur le fonctionnement du cobot facilitant l'évolution de son geste professionnel et son apprentissage. En effet, cet opérateur, lors du développement du cobot s'est rendu chez le concepteur et des échanges ont eu lieu. Les autres opérateurs n'auraient ainsi pas la même compréhension du fonctionnement du cobot, de l'articulation du bras par exemple ou du rythme « imposé » par le cobot.

De plus, nous nous interrogeons sur la formation à l'évolution du geste : comment prendre en compte l'expérience acquise par ces travailleurs sur un geste traditionnel qu'ils réalisent depuis environ 17 ans ? Comment faire pour utiliser ce savoir-faire et non l'empêcher lors de l'introduction d'une nouvelle technologie ? Comment favoriser l'apprentissage d'un

nouveau geste ? (Chassaing, 2006; Chassaing, 2011; Gaudart, Delgoulet, & Chassaing, 2008; Ouellet, 2013; Ouellet & Vézina, 2008). Tout d'abord, il conviendrait de s'assurer de la définition véhiculée dans une formation sur le geste professionnel car on le considère encore beaucoup « comme une somme d'habiletés techniques simples à acquérir, alors que le geste professionnel renvoie à l'articulation complexe de plusieurs dimensions, physiques, sensorielles, cognitives et même sociales puisqu'il s'inscrit et se construit dans des collectifs et des règles de métier (Clot, 1999 ; Bourgeois, & Hubault, 2005) » (cité par Gaudart et al., 2008, p. 18). Il faudrait « considérer le geste comme une construction et non comme une simple exécution » (Lémonie & Chassaing, 2013, p. 61). Préciser la nature du geste professionnel (Caroly et al., 2008b) lors de l'élaboration d'un contenu de formation offrirait « une alternative à l'enseignement du « bon geste » en amenant à découvrir, ou redécouvrir la pluralité des modes opératoires, leurs fondements, et donc leur légitimité. » (Gaudart et al., 2008, p. 20). Ainsi comme le rappelle Ouellet (2013) « élaborer un contenu de formation […] impose […] de comprendre ce que les travailleurs font et comment ils arrivent à le faire […] cette analyse fine des gestes […] nous semble ici incontournable pour comprendre ce qui fait que les travailleurs sont compétents et les ressources dont ont besoin ceux qui doivent apprendre à réaliser le travail » (p.16).

De plus, les individus ont besoin de connaître les bénéfices de ce nouveau dispositif de travail mais également ses inconvénients pour faciliter l'apprentissage du geste : « une première caractéristique est que l'adulte a besoin de savoir pourquoi il a besoin d'apprendre quelque chose avant de s'engager dans l'apprentissage » (Ouellet, 2013, p. 7). À cela, nous souhaitons ajouter que, pour aider les professionnels à apprendre à travailler avec un cobot, il convient de ne pas leur laisser penser que cela ne va rien changer dans leur façon de faire. L'introduction d'un nouvel outil transforme l'activité de travail de l'opérateur : ses référentiels changent, son expertise est modifiée. D'autant plus lorsque ce sont des travailleurs expérimentés ayant acquis des repères sensoriels très incorporés : « plus un opérateur est resté à un même poste dont l'activité est fortement répétitive, plus ses habiletés sensorimotrices sont constituées en automatismes qu'il est dur de modifier par une situation d'apprentissage peu adaptée » (Chassaing, 2010, p. 174). Ils auront besoin d'un temps supplémentaire pour apprendre : « lors des changements de modes opératoires, les salariés,

avec l'âge, ont besoin d'un temps supplémentaire pour tester, mettre à l'épreuve les gestes, les modifier, les ré-orienter afin que la performance de leur exécution, à l'arrivée, soit là » (Bourgeois et al., 2006, p. 170).

Enfin, il s'agirait également de s'intéresser à l'appropriation du cobot par le travailleur (Bobillier-Chaumon, 2013; Bobillier Chaumon & Clot, 2016; Bobillier Chaumon, 2016; Bourmaud, 2013; Rabardel & Pastré, 2005) : comment faciliter l'appropriation du cobot par les travailleurs ? Comment favoriser le passage du cobot comme un artefact à un instrument de l'activité ? Comment les accompagner dans ce changement ? L'appropriation des nouvelles technologies est « loin d'être un processus automatique […] Les technologies ne s'imposent pas : les acteurs se les approprient (ou non), les intègrent (ou non) dans leur pratique » (Muhlmann, 2001, p. 341). « Ne faut-il pas, au nom du progrès, fut-ce un progrès de prévention, mépriser la tradition. Si les travailleurs résistent à une transformation brusque de leurs modes opératoires, c'est parce qu'ils ont de bonnes raisons de rester attachés à tout ce dont ils ont besoins […] pour qu'une réforme des techniques puisse avoir des chances de succès, il faut qu'elle ait deux qualités : qu'elle fasse évoluer tout le collectif de travailleurs ensemble […] [et] qu'elle permette l'éclosion d'un nouveau système de valeur et d'un nouveau code gestuel dans les nouvelles techniques proposées […]. A ne pas prendre en considération tout le réseau auquel s'articulent les gestes, les actions de prévention se heurtent à la « résistance au changement » » (Dejours et al., 1994, pp. 5-6). La littérature montre, par exemple, qu'ouvrir des espaces réflexifs, créer des moments de discussion du geste seraient des éléments moteurs pour le « développement gestuel » (Simonet, 2011). Le collectif doit pouvoir évoluer en même temps que l'introduction d'une nouvelle technologie au risque de se retrouver dans une situation de refus, une situation de « résistance au changement ». Le « geste dialogué » permettrait alors de « redonner du souffle à chacun dans le métier et au métier lui-même » (Simonet & Caroly, 2020, p. 28). Du point de vue de la prévention des TMS, il s'agirait de chercher à « organiser les conditions méthodologiques pour faire passer le geste empêché de dialogue, source potentielle de TMS par hypo-socialisation du mouvement, au rang de geste dialogué dans le métier » (ibid. p.25). Concernant l'usage des nouvelles technologies, la clinique de l'usage (Bobillier Chaumon, 2016) avance qu'une mise en débat du travail peut être provoquée par la technologie et contribuerait « à la création d'un espace de délibération sur

les usages et les pratiques associées, avec deux objectifs visés : d'une part, donner aux utilisateurs la possibilité de discuter collectivement de l'activité et des règles d'utilisation des outils techniques ; d'autre part, contribuer ainsi à un processus de (re)création d'instruments techniques [avec] pour ambition de faire passer l'acceptabilité « prescrite » (celle souhaitée et projetée par l'organisation dans les projets de changements) à une acceptation « construite » par les individus eux-mêmes » (ibid. p.12-13). L'approche de l'acceptation située est une voie future intéressante à considérer pour le développement du geste lors de l'usage d'une nouvelle technologie (Bobillier-Chaumon, 2013; Bobillier-Chaumon & Dubois, 2009; Bobillier Chaumon & Clot, 2016; Bobillier Chaumon, 2016; Wioland, Debay, & Atain-Kouadio, 2019).

3.3. L'Homme au cœur de l'Industrie du futur ?

Le dernier point de cette discussion concerne le projet « Industrie du futur » et en particulier sa volonté de « solutionner » les problématiques qui se posent aux individus via l'introduction de nouvelles technologies (Lafeuillade, 2021). Cette 4^{ième} révolution industrielle souhaite avoir une nouvelle approche de l'Homme au travail et mettre l'Homme au cœur de l'usine du futur. Cependant « si l'humain est présenté comme étant au cœur de ce nouveau modèle d'organisation, rien n'est réellement dit sur les questions des transformations du travail et de leur accompagnement » (Lafeuillade, Buchmann, & Barcellini, 2018, p. 4). La focalisation est souvent faite sur l'outil, avec une vision techno-centrée. Or elle devrait d'abord s'intéresser à la situation de travail à modifier : pourquoi la transformer ? Quels sont les besoins évoqués par les futurs utilisateurs ? Comment les prendre en compte ? Ce sont ces questions auxquelles il faudrait chercher à répondre avant de choisir l'objet, avant de choisir la technologie. « Les technologies « du futur » ne peuvent être pensées comme des ressources pour le travail sans une réelle réflexion sur la conduite des transformations du travail, au-delà de l'assistance au développement technologique » (Barcellini, 2020, p. 21). Le point de vue devrait se décaler sur les humains qui travailleront avec ces nouvelles technologies. Nos travaux montrent que l'activité des ébarbeurs n'a sûrement pas été suffisamment prise en compte dans la modification de la situation de travail incluant le cobot : « dans un contexte de pression politique et institutionnelle poussant à l'équipement technologique, plusieurs risques liés à un défaut de mise en discussion de la pertinence de ces technologies peuvent apparaitre […] les

technologies sont souvent pensées comme « des remèdes » à des problèmes économiques, de compétitivité, de production et de santé, sans que ne soient réellement questionnées « les causes » de ces problèmes et la pertinence de la seule réponse technologique » (Barcellini, 2019, p. 6). Certaines technologies innovantes, telles que la réalité virtuelle par exemple, pourraient être utilisées pour simuler de futures situations de travail afin d'être au plus proche d'un usage futur. Il conviendrait cependant d'être vigilant quant à « l'irruption des outils de simulation numérique et immersive [qui] pose la question de leur pertinence effective comme outils de simulation de l'activité dans un contexte de conception participative : doit-on y voir un élargissement des possibles de la simulation ou s'inquiéter au contraire, sous couvert de nouvelles technologies, de son possible rétrécissement ? » (Arnaud, Fortineau, & Nahon, 2013 cité par Van Belleghem, 2018, p. 5). De futures études nous en diront sûrement plus sur ces nouvelles possibilités.

De plus, l'essor des nouvelles technologies qui se développent actuellement dans les entreprises se heurte encore à des écueils et certaines regrettent ou se questionnent sur l'apport réel de tels dispositifs. Alors, pourquoi cela ne marche pas ? Que faudrait-il pour accompagner au mieux cette transition technologique ? Les entreprises sont parfois « poussées » à devenir une « Industrie du futur » en recevant des aides financières et une certaine publicité (« vitrine Industrie du futur »). Il s'agirait de s'interroger sur l'accompagnement de ces entreprises (Lafeuillade, 2021) : « ces dirigeants sont enjoints à s'équiper de technologies « du futur » sans qu'un réel soutien méthodologique leur permette d'évaluer la pertinence et les conséquences de ce choix pour leur entreprise. » (Barcellini, 2019, p. 12).

Enfin, l'Industrie du futur se veut plus compétitive, plus agile grâce à des technologies émergentes capables de s'adapter à l'évolution des marchés pour que les entreprises restent toujours plus compétitives face à la concurrence (AIF, 2018). Or, à l'instar de notre recherche, il semble que des recherches supplémentaires soient nécessaires pour s'assurer de cette « agilité » via ces nouvelles technologies du futur. En effet, nous avons constaté que le cobot que nous avons analysé a déjà des difficultés pour être utilisé sur différentes orientations de

surfaces, qu'en serait-il pour s'adapter à l'évolution des pièces fabriquées dans le futur (caractéristiques géométriques des pièces, taille des pièces, matière première…) ?

Conclusion

Cette thèse a montré que l'usage du cobot a des conséquences sur l'articulation de l'ensemble des dimensions du geste professionnel. Aussi, nos résultats ont montré que, lors de l'usage du cobot, les dimensions biomécanique, cognitive et psycho-sociale du geste professionnel des ébarbeurs évoluent de manière interconnectée. Ainsi, l'analyse de l'évolution du geste a mis en évidence que l'usage du cobot diminue l'effort lié au port de l'outil et les vibrations ressenties mais que cela fait évoluer l'ensemble du geste et donne notamment lieu à l'émergence de nouveaux types d'efforts différents. De plus, les informations sensorielles sont modifiées lors de l'usage du cobot : la possibilité d'observer en continu les défauts meulés diminue, un besoin de rechercher de nouvelles informations visuelles en lien avec le fonctionnement du cobot émerge et le ressenti « tactile » du disque de la meuleuse en contact de la surface diminue. L'évolution de ces informations sensorielles entraîne une diminution de la précision du geste des ébarbeurs et de la qualité du meulage. Nos résultats montrent également que le cobot contraint le rythme de travail des ébarbeurs et les empêche de réaliser les mouvements leur permettant d'atteindre la qualité qu'ils souhaitent ; le sens du geste s'étiole lors de l'usage du cobot. Enfin, par cette analyse articulée du geste, nous avons pu détailler des caractéristiques de la situation de travail influençant l'évolution du geste – des caractéristiques fonctionnelles du cobot, des pièces et des surfaces meulées, de l'environnement physique et des caractéristiques organisationnelles – ainsi que des caractéristiques propres aux travailleurs. L'ensemble de ces éléments est à considérer comme des points de vigilance à destination des concepteurs de cobot et des entreprises souhaitant investiguer le sujet des cobots en lien avec la prévention des TMS.

La volonté de l'Industrie du Futur de tendre vers un usage plus important de robots collaboratifs nous engage à poursuivre la production de connaissances sur l'impact des cobots sur la santé et la performance des travailleurs. Ceci afin d'engager des processus de conception de l'outil technique et de la situation de travail plus en adéquation avec la prise en compte du travail réel des opérateurs et des perspectives pour faciliter le développement d'un nouveau geste, prenant en compte l'ensemble de ses dimensions (biomécanique, cognitive et psycho-sociale) lors de l'introduction de ces nouvelles technologies.

Bibliographie

AFNOR. (2008). NF EN 1005-4 - Safety of machinery - Human physical performance - Partie 4 : Evaluation of working postures and movements in relation to machinery (pp. 20).

AIF. (2018). *Industry of the Future Technology Guide - Issues and Overview of Solutions*. Retrieved from http://www.industriedufutur.org/content/uploads/2018/03/AIF_IndustryOfTheFutureTechnologyGuide_EN.pdf

Alderson, M. (2004). La psychodynamique du travail : objet, considérations

épistémologiques, concepts et prémisses théoriques. *Santé mentale au Québec, 29(1)*, 243–260. doi:https://doi.org/10.7202/008833ar

ANACT, INSERM, INRS, DARES, & CCMSA. (1996). Affections périarticulaires des membres supérieurs et organisation du travail. Résultats de l'enquête épidémiologique nationale *Document Médecin du Travail 65*, 14-31.

Aptel, M., & Aublet-Cuvelier, A. (2005). Prévenir les troubles musculosquelettiques du membre supérieur : un enjeu social et économique. Prevention of work-related muscular-skeletal disorders of upper limbs: a social challenge and economic obligation. [Prevention of Work-Related Muscular-Skeletal Disorders of Upper Limbs: A Social Challenge and Economic Obligation]. *Santé Publique, 17*(3), 455-469. doi:10.3917/spub.053.0455

Aptel, M., Cail, F., & Aublet-Cuvelier, A. (2011). *Les troubles musculosquelettiques du membre supérier. Guide pour les préventeurs.* (Vol. ED957). Vandoeuvre-lès-Nancy.

Aptel, M., & Cnockaert, J. (2002). Liens entre les troubles musculo-squelettiques du membre supérieur (TMS-MS). *BTS Newsletter, 19-20*, 57-63.

Aptel, M., & Vézina, N. (2008). *Quels modèles pour comprendre et prévenir les TMS ? Pour une approche holistique et dynamique.* Paper presented at the 2ième Congrès francophone de recherche sur les TMS, Montréal, Canada.

Atain-Kouadio, J.-J., Cher, A., Monssu, P., Fuselier, D., Monribot, D., & Petitdemange, E. (2004). Démarche de prévention des risques professionnels : problématiques du handicap dans les fonderies. *Performances, n°19*, 24-27.

Atain-Kouadio, J.-J., & Sghaier, A. (2017). Les robots et dispositifs d'assistance physique: état des lieux et enjeux pour la prévention. *Notes Scientifiques et Techniques*(NS 354), 44.

Atain-Kouadio, J.-J., Sghaier, A., & Picot, D. (2015, 23-25 septembre 2015). *Les robots d'assistance physique: fonctionnement, utilisation en industrie et enjeux santé et sécurité au travail.* Paper presented at the Actes du 50ème congrès international de la Société d'Ergonomie de Langue Française, Paris.

Aublet-Cuvelier, A. (1997). Evaluation des facteurs de risque directs et indirects de TMS-MS dans une blanchisserie hospitalière. *INRS, NST 159*, 132.

Aublet-Cuvelier, A., Coutarel, F., & Cuny-Guerrier, A. (2019). Prévention des TMS, des modèles explicatifs aux modèles d'intervention *Précis d'évaluation des interventions en santé au travail. Pour une approche interdisciplinaire appliquée aux RPS et TMS* (pp. 131-156). Toulouse: Octares Editions.

Bahrin, M. A. K., Othman, M. F., & Nor, N. H. (2016). Industry 4.0: a review on industrial automation and robotic. *Jurnal Teknologi (Sciences & engineering), 2180*(3722), 137-143.

Bainbridge, L. (1983). Ironies of Automation. *Automatica, 19*(6), 775-779.

Barbé, L. (2007). *Téléopération avec retour d'effort pour les interventions percutanées.* Louis Pasteur, Strasbourg.

Barcellini, F. (2019). Industrie du futur : quelle place pour le travail et ses transformations ? In B. Emilie, L. Michel, V. Pierre, & W. Thierry (Eds.), *Le travail en mouvement* (pp. pp. 136-147). Paris: Presse des Mines.

Barcellini, F. (2020). Quelles conceptions de la coopération humains-robots collaboratifs? *Activités, 17-1*. doi:https://doi.org/10.4000/activites.5007

Barcellini, F., Buchmann, W., & Lafeuillade, A.-C. (2019). *Usine du futur et transformations du travail. L'apport d'une conduite de projet centrée activité*. Union des ingénieurs et cadres CFDT. Retrieved from https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03180325

Barcellini, F., Van Belleghem, L., & Daniellou, F. (2013). Les projets de conception comme opportunité de développement des activités *Ergonomie constructive* (pp. 191-206). Paris cedex 14: Presses Universitaires de France.

Bigliardi, B., Bottani, E., & Casella, G. (2020). Enabling technologies, application areas and impact of industry 4.0: a bibliographic analysis. *Procedia Manufacturing, 42*, 322-326. doi:https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.086

Blaise, J.-C., Brun, L., Savescu, A., Sghaier, A., Tihay, D., & Wioland, L. (2020). *10 questions sur les robots collaboratifs* (Vol. ED 6386).

Bobillier-Chaumon, M.-E. (2013). *Conditions d'usage et facteurs d'acceptation des technologies de l'activité : Questions et perspectives pour la psychologie du travail.* Ecole doctorale Sciences de l'Homme, du Politique, et du Territoire. Retrieved from https://halshs.archives-ouvertes.fr/tel-01559686

Bobillier-Chaumon, M.-É., & Dubois, M. (2009). L'adoption des technologies en situation professionnelle : quelles articulations possibles entre acceptabilité et acceptation ? *Le travail humain, 72*(4), 355-382. doi:10.3917/th.724.0355

Bobillier Chaumon, M.-É., & Clot, Y. (2016). Clinique de l'usage : Les artefacts technologiques comme développement de l'activité(November 2017). Retrieved from https://activites.revues.org/2897

Bobillier Chaumon, M. E. (2016). L'acceptation située des technologies dans et par l'activité : premiers étayages pour une clinique de l'usage. *Psychologie du Travail et des Organisations, 22*(1), 4-21. doi:https://doi.org/10.1016/j.pto.2016.01.001

Böhle, F., & Milkau, B. (1998). *De la manivelle à l'écran : l'évolution de l'expérience sensible des ouvriers lors des changements technologiques* (Eyrolles Ed.). Paris.

Bongers, P., de Winter, C., Kompier, M., & Hildebrandt, V. (1993). Psychosocial factors at work and musculoskeletal disease. *Scand J Work Environ Health, 19*(5), 307-312.

Bounouar, M., Bearee, R., Siadat, A., & Benchekroun, T.-H. (2022). On the role of human operators in the design process of cobotic systems. *Cognition, Technology & Work, 24*(1), 57-73. doi:10.1007/s10111-021-00691-y

Bounouar, M., Béarée, R., Siadat, A., & Benchekroun, T.-H. (2021, 2021-01-11). *L'ergonomie, la robotique collaborative et le génie industriel. Vers une conception pluridisciplinaire des systèmes Humains-Robots.* Paper presented at the 55ème congrès de la SELF, Paris (visio), France.

Bourgeois, F., & Hubault, F. (2005). Prévenir les TMS. De la biomécanique à la revalorisation du travail, l'analyse du geste dans toutes ses dimensions. *Activités, 2*(1), 20-36. doi:10.4000/activites.1561

Bourgeois, F., Lemarchang, C., Hubault, F., Brun, C., Polin, A., & Faucheux, J.-M. (2000). *Troubles musculosquelettiques et travail : quand la santé interroge l'organisation*: ANACT.

Bourgeois, F., Lemarchang, C., Hubault, F., Brun, C., Polin, A., Faucheux, J.-M., . . . Albert, E. (2006). Troubles musculosquelettiques et travail : quand la santé interroge l'organisation (pp. 308): ANACT.

Bourmaud, G. (2013). De l'analyse des usages à la conception des artefacts : le développement des instruments *Ergonomie constructive* (pp. 161-174): Presses Universitaires de France.

Brunet, M. (2011). *Analyse et exploitation de la variabilité gestuelle d'opérateurs travaillant sur une chaine d'assemblage dans une perspective ergonomique de prévention des TMS.* Thèse, Université d'Orléans.

Brunet, M., & Riff, J. (2009). Analyse et exploitation de la variabilité gestuelle dans la prévention des TMS *Perspectives interdisciplinaires sur le travail et la santé, 11-1*, 39. doi:10.4000/pistes.2270

Buckle, P. W., & Devereux, J. (2002). The nature of work-related neck and upper limb musculoskeletal disorders. *Applied Ergonomics, 33*(3), 207-217. doi:https://doi.org/10.1016/S0003-6870(02)00014-5

Canguilhem, G. (1943). *Le Normal et la pathologique*.

Caroly, S., Coutarel, F., Daniellou, F., Escriva, E., & Roquelaure, Y. (2008a, 2008). *Orientations pour la conception de systèmes favorisant une prévention durable des TMS.* Paper presented at the 43e congrès de la Société d'Ergonomie de Langue Française, Ajaccio, France.

Caroly, S., Coutarel, F., Escriva, E., Roquelaure, Y., Schweitzer, J. M., & Daniellou, F. (2008b). La prévention durable des TMS. Quels freins ? Quels leviers d'action ? *Rapport 2004-2007 de la DGT*, 180.

Caroly, S., Simonet, P., & Vézina, N. (2015). Operational Leeway and Power to Act in the Prevention of Repetitive Strain Injury and Occupational Stress. *Le travail humain, 78*(1), 1-8. doi:10.3917/th.781.0001

Carter, J. B., & Banister, E. W. (1994). Musculoskeletal Problems in VDT Work: A Review. *Ergonomics, 37*, 1623-1648.

CEA. (2015). Les robots s'intègrent dans l'usine du futur. Retrieved from www.cea.fr

Charpentier, P., & Sghaier, A. (2013). L'Homme au travail et le robot : une relation à inventer. *Hygiène et sécurité du travail, 231*, 5.

Chassaing, K. (2006). *Elaboration, structuration et réalisation des gestuelles de travail : les gestes dans l'assemblage automobile, et dans le coffrage des ponts d'autoroute.* Available from http://www.theses.fr/2006CNAM0539

Chassaing, K. (2010). Les " gestuelles " à l'épreuve de l'organisation du travail : du contexte de l'industrie automobile à celui du génie civil. *Le travail humain, 73*(2), 163-192.

Chassaing, K. (2011). *Former pour faire de la qualité : quelle reconnaissance pour les gestes professionnels? Un exemple dans le secteur de l'industrie automobile*. Paper presented at the Paper presented at the Troisième Congrès francophone sur les troubles musculosquelettiques (TMS). Échanges et pratiques sur la prévention, Grenoble, France.

Cherubini, A., Passama, R., Crosnier, A., Lasnier, A., & Fraisse, P. (2016). Collaborative manufacturing with physical human–robot interaction. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. doi:10.1016/j.rcim.2015.12.007

Classen, H.-J. (2019). "Les robots ne sont pas capables d'améliorer les processes". Usage programatique des robots chez toyota. *Hygiène et sécurité du travail, 255*, 110-111.

Claudon, L., & Guiguet, C. (2003). Analyse de la tenue en main des couteaux lors d'opérations de désossement dans différents secteurs de la filière viande. [Analysis of the Different Ways of Handling Knives During Boning Tasks in Various Fields of the Meat Processing Industry]. *Le travail humain, 66*(4), 377-390. doi:10.3917/th.664.0377

Clot, Y. (1999). Le geste est-il transmissible? *Apprendre autrement aujourd'hui? 10èmes entretiens de la Villette*. Retrieved from http://www.cite-sciences.fr/francais/ala_cite/act_educ/education/apprendre/commapprends_p6.htm

Clot, Y. (2004). Travail et sens du travail. In P. Falzon (Ed.), *Ergonomie* (pp. 317-331). Paris: Presses Universitaires de France.

Clot, Y. (2006). *La fonction psychologique du travail*. Paris cedex 14: Presses Universitaires de France.

Clot, Y. (2008). *Travail et pouvoir d'agir*. Paris.

Clot, Y. (2010). *Le travail à coeur. Pour en finir avec les risques psychosociaux.*: La Découverte, coll. « Cahiers libres ».

Clot, Y. (2011, 2011-05-26). *TMS-RPS : l'hypothèse de l'hypo-sollicitation de l'activité.* Paper presented at the Troisième Congrès francophone sur les troubles musculosquelettiques (TMS). Échanges et pratiques sur la prévention, Grenoble, France.

Clot, Y., Bonnefond, J.-Y., Bonnemain, A., & Zittoun, M. (2021). *Le prix du travail bien fait. La coopération conflictuelle dans les organisations*. Paris: La Découverte.

Clot, Y., & Faïta, D. (2000). Genres et styles en analyse du travail Concepts et méthodes. *Travailler, 4*.

Clot, Y., Faïta, D., Fernandez, G., & Scheller, L. (2000). Entretiens en autoconfrontation croisée : une méthode en clinique de l'activité. *Perspectives interdisciplinaires sur le travail et la santé, 2-1*. Retrieved from http://pistes.revues.org/3833 doi:10.4000/pistes.3833

Clot, Y., & Fernandez, G. (2005). Analyse psychologique du mouvement : apport à la compréhension des TMS. *Activités, 2-2*, 68-78. Retrieved from http://activites.revues.org/1818 doi:10.4000/activites.1818

Clot, Y., Fernandez, G., & Scheller, L. (2007). Le geste du métier : problèmes de la transmission. *Psychologie de l'interaction, 23*, 109-138.

CNAMTS. (2015). *Rapport de gestion 2014 de l'assurance maladie sur les risques professionnels*. Retrieved from http://www.wk-rh.fr/actualites/upload/rapport-gestion-2014-risques-professionnels-juill2015.pdf

Corbeil, P., Plamondon, A., & Denis, D. (2022). *Analyse du concept de marge de manoeuvre en ergonomie du point de vue de contrôle de la motricité humaine*. Retrieved from https://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-1149-fr.pdf?v=2022-05-23

Côté, J., Ngomo, S., Stock, S., Messing, K., Vézina, N., Antle, D., . . . St-Vincent, M. (2013). Quebec Research on Work-related Musculoskeletal Disorders: Deeper Understanding for Better Prevention. *Relations industrielles / Industrial Relations, 68*(4), 643-660. doi:https://doi.org/10.7202/1023009ar

Coutarel, F. (2015). Les gestes répétitifs. In A. Thébaud-Mony, P. Davezies, L. Vogel, & S. Volkoff (Eds.), *Les risques du travail* (pp. 207-210): La Découverte.

Coutarel, F., Aublet-Cuvelier, A., Caroly, S., Vézina, N., Roquelaure, Y., Cuny-Guerrier, A., . . . Compan, N. (2022). Marge de manœuvre et prévention des troubles musculo-squelettiques : quelles perspectives ? *Le travail humain, 85*(1), 3-31. doi:10.3917/th.851.0003

Coutarel, F., Chambon, H., Clavel, P., & coll., e. (2016). Repenser le geste professionnel pour réorienter la prévention des TMS. Une formation-action-recherche autour des agents d'inspection sanitaire en abattoirs. *Actes du 51ème Congrès de la SELF*.

Daniellou, F. (1992). *Le statut de la pratique et des connaissances de l'intervention ergonomique de conception.* (Document de synthèse présenté en vue d'obtenir l'Habilitation à diriger des recherches), Université de Toulouse.

Daniellou, F. (2007). Des fonctions de la simulation des situations de travail en ergonomie. *Activités, 4-2*, 77-83.

Daniellou, F., & Garrigou, A. (1990). Participatory approach to future work activity, case-studies in the printing industry. *Karwowski, W., Rahimi, H. Human aspects of hybrid automated systems II*, 493-500.

Daniellou, F., & Garrigou, A. (1993). La mise en oeuvre des représentations des situations passées et des situations futures dans la participation des opérateurs à la conception. In A. Weill-Fassina, P. Rabardel, & D. Dubois (Eds.), *Représentations pour l'action* (pp. 352). Toulouse: Octares.

Darses, F., & Wolff, M. (2006). How do designers represent to themselves the users' needs? *Applied Ergonomics, 37*(6), 757-764. doi:https://doi.org/10.1016/j.apergo.2005.11.004

De Keyser, V. (1983). Communications sociales et charge mentale dans les postes automatisés. *Psychologie Française, 28*, 239-246.

Dejours, C. (2003). *L'évaluation du travail à l'épreuve du réel. Critique des fondements de l'évaluation*. Versailles: Éditions Quæ.

Dejours, C., & Cru, D. (1983). Les savoir-faire de prudence dans les métiers du bâtiment. Nouvelle contribution de la psychopathologie du travail à l'analyse des accidents et de la prévention dans le bâtiment. *Les cahiers médico-sociaux, 3*, 239-247.

Dejours, C., Dessors, D., & Molinier, P. (1994). Comprendre la résistance au changement. *INRS, Documents du Médecin du Travail*.

Delépine, A., Chapouthier-Guillon, A., Jacquin-Brisbart, C., Nolland, X.-B., & Vidal, V. (2016). *Les maladies professionnelles : guide d'accès aux tableaux du régime général et du régime agricole* INRS (Ed.) *ED 835* (pp. 338).

Denis, D. (2021). Exosquelettes : solution ou mirage pour la prévention des troubles musculosquelettiques? *Reportages et conférences*.

Denis, D., Gonella, M., & St-Vincent, M. (2016). Impacts des exigences de qualité sur l'activité de travail d'une population d'assembleurs dans le secteur aéronautique. In L'Harmattan (Ed.), *Effets de modes d'organisation du travail* (pp. 79-90).

Denis, D., St. Vincent, M., Jetté, C., Nastasia, I., & Imbeau, D. (2005). Les pratiques d'intervention portant sur la prévention des troubles musculosquelettiques: un bilan critique de la littérature(B-066), 81 p. Retrieved from http://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/B-066.pdf?v=2018-01-09

Dessors, D. (1995). Précarité, précarisation, santé: lecture d'une instabilité multiple par la psychodynamique du travail. *Archives des maladies professionnelles, 56*, 176-180.

Diricq, N. (2011). *Rapport de la commission instituée par l'article L, 176-2 du code de la sécurité sociale*. Retrieved from http://www.securite-sociale.fr/IMG/pdf/11_diricq.pdf

Dodier, N. (1995). *Les Hommes et les Machines. La conscience collective dans les sociétés technicisées*. Paris: Éditions Métailié.

Falzon, P. (2013). Pour une ergonomie constructive *Ergonomie constructive* (pp. 1-16). Paris cedex 14: Presses Universitaires de France.

Fédération-Forge-Fonderie. (2019). Panorama économique. *La Forge & la Fonderie.* Retrieved from https://www.forgefonderie.org/fr/forge-fonderie/panorama-economique

FIM. (2015). *Guide pratique de l'usine du futur : enjeux et panorama de solutions*.

Forsman, M., Taoda, K., Thorn, S., & Zhang, Q. (2002). Motor-unit recruitment during long-term isometric and wrist motion contractions: a study concerning muscular pain development in computer operators. *International Journal of Industrial Ergonomics, 30*, 237-250.

Fournier, É., Kilgus, D., Landry, A., Hmedan, B., Pellier, D., Fiorino, H., & Jeoffrion, C. (2022). The impacts of human-cobot collaboration on perceived cognitive load and usability during an industrial task: an exploratory experiment. *IISE Transactions on Occupational Ergonomics and Human Factors*, 1-11. doi:10.1080/24725838.2022.2072021

Gaudart, C., Delgoulet, C., & Chassaing, K. (2008). La fidélisation de nouveaux dans une entreprise du BTP. *Activités, 5-2*. doi:https://doi.org/10.4000/activites.2013

Gaudez, C., & Aptel, M. (2008). Les mécanismes neurophysiologiques du mouvement, base pour la compréhension du geste. *Le travail humain, 71*(4), 385-404. doi:10.3917/th.714.0385

Gollac, M., & Bodier, M. (2011). *Mesurer les facteurs psychosociaux de risque au travail pour les maîtriser. Rapport du Collège d'expertise sur le suivi des risques psychosociaux au travail, faisant suite à la demande du Ministre du travail, de l'emploi et de la santé.* (pp. 223).

Guérin, F., Laville, A., Daniellou, F., Duraffourg, J., & Kerguelen, A. (2006). *Comprendre le travail pour le transformer la pratique de l'ergonomie* (ANACT Ed.).

Hägg, G.-M. (1991). Static work load and occupational myalgia-A new explanation model. In P. Anderson, Hobart, D. and Danoff, J. (Ed.), *Elecromyographical Kinesiology* (pp. 141-144). Amsterdam: Elsevier Science Publishers.

Hoc, J. M., & Amalberti, R. (1999). Analyse des activités cognitives en situation dynamique : d'un cadre théorique à une méthode. *Le travail humain, 62*(2), 97-129.

IHEST. (2018). *Cobot, d'autres robots devenus collaboratifs? - Rapport d'étonnement de l'atelier*. Retrieved from https://www.ihest.fr/la-mediatheque/collections/rapports-d-etonnement/cobots-d-autres-robots-devenus-collaboratifs

INRS. (2015). Utilisation des robots d'assistance physique à l'horizon 2030 en France(ISBN 978-2-7389-2217-5), 257. Retrieved from www.inrs.fr/dms/inrs/PDF/rap-2030-version-2015/rap-2030-version-2015.pdf

ISO13482. (2014). *Robots and robotic devices - Safety requirements for personal care robots*. Retrieved from https://www.iso.org/standard/62996.html

Jeantet, A., & Tiger, H. (1988). *Des manivelles au clavier*. Paris.

Jocelyn, S., Burlet-Vienney, D., Giraud, L., & Sghaier, A. (2017). *Robotique collaborative : évaluation des fonctions de sécurité et retour d'expérience des travailleurs, utilisateurs et intégrateurs au Québec* (R-974). Retrieved from Montréal: https://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-974.pdf

Johansson, J., Some, M., Linderholm, B.-M., Almlén, A., Curstedt, T., & Robertson, B. (2003). A synthetic surfactant based on a poly-Leu SP-C analog and phospholipids: effects on tidal volumes and lung gas volumes in ventilated immature newborn rabbits. *Journal of Applied Physiology, 95*(5), 2055-2063. doi:10.1152/japplphysiol.00153.2003

Karsenty, L. (2012). *Quand le changement affecte l'identité professionnelle et dégrade la confiance*. Paper presented at the SELF'2012, Congrès International d'Ergonomie, Lyon, France.

Lafeuillade, A.-C. (2021). *Transformer la PME à l'heure du modèle "Industrie du futur". Une question d'équilibre dans le travail des cadres.*

Lafeuillade, A.-C., Buchmann, W., & Barcellini, F. (2018, 2018-10-03). *Le travail au coeur de l'Usine du Futur. L'introduction de la robotique collaborative dans les PME's.* Paper presented at the 53ème congrès de la SELF, Bordeaux, France.

Lamonde, F. (2000). *L'intervention ergonomique. Un regard sur la pratique professionnelle.* Toulouse: Octares.

Landry, A., Cippelletti, E., & Azouaghe, S. (2020). *L'introduction d'un robot collaboratif dans une chaine de fabrication : comment réduire les facteurs de risque de TMS tout en conservant le sens du travail?* Paper presented at the 4ème congrès francophone des troubles musculo-squelettiques, Tunisie.

Larsson, B., Björk, J., Henriksson, K. G., Gerdle, B., & Lindman, R. (2000). The prevalences of cytochrome c oxidase negative and superpositive fibres and ragged-red fibres in the trapezius muscle of female cleaners with and without myalgia and of female healthy controls. *PAIN®, 84*(2), 379-387. doi:https://doi.org/10.1016/S0304-3959(99)00237-7

Leino, P. (1989). Symptoms of stress predict musculoskeletal disorders. *J Epidemiol Comm Health, 43*, 293-300.

Lémonie, Y., & Chassaing, K. (2013). De l'adaptation du mouvement au développement du geste. In P. Falzon (Ed.), *Ergonomie constructive* (pp. 61-74). Paris cedex 14: Presses Universitaires de France.

Leplat, J. (1997). *Regards sur l'activité en situation de travail : contribution à la psychologie ergonomique*: Presses universitaires de France.

Linhart, R. (1981). *L'établi*: Les éditions de minuit

Luttmann, A., Jäger, M., Griefahn, B., Caffier, G., Liebers, F., & Steinberg, U. (2003). Preventing musculoskeletal disorders in the workplace. *World Health Organization, 5*.

Mac Donald, L., Härenstam, A., Warren, N., & Punnett, L. (2008). Incorporating work organisation into occupational health research: an invitation for dialogue. *Occup Environ Med, 65*(1), 1-3.

Major, M.-E. (2011). *Etude ergonomique du travail saisonnier et de ses impacts sur les stratégies et les troubles musculo-squelettiques de travailleurs d'usines de transformation du crabe.* (Thèse de doctorat en ergonomie), Québec, Montréal.

Malchaire, J., Roquelaure, Y., Cock, N., Piette, A., Vergracht, S., & Chiron, H. (2000). Variabilité inter-individuelle du geste professionnel. *Recherche INRS*, 66.

Maurice, P., Measson, Y., Padois, V., & Bidaud, P. (2013). Assessment of physical exposure to musculoskeletal risks in collaborative robotics using dynamic simulation. *Robot design, dynamics and control, 544*, 325-332.

Maurice, P., Padois, V., Measson, Y., & Bidaud, P. (2017). Human-oriented design of collaborative robots. *International Journal of Industrial Ergonomics, 57*, 88 - 102. doi:https://doi.org/10.1016/j.ergon.2016.11.011

McAtamney, L., & Nigel Corlett, E. (1993). RULA: a survey method for the investigation of work-related upper limb disorders. *Applied Ergonomics, 24*(2), 91-99. doi:10.1016/0003-6870(93)90080-s

Meyer, J. P. (2014). Evaluation subjective de la charge de travail. Utilisation des échelles de Borg. *Références en santé au travail de l'INRS, 139*, 105-122.

Mollo, V., & Falzon, P. (2004). Auto-and Allo-Confrontation as Tools for Reflective Activities. *Applied Ergonomics, 35*(6), 531-540. doi:10.1016/j.apergo.2004.06.003

Morin, E.-M., & Aranha, F. (2007). *Sens du travail, santé mentale au travail et engagement organisationnel*. Retrieved from Montréal: http://www.irsst.qc.ca/media/documents/pubirsst/r-543.pdf

Moulières-Seban, T. (2017). *Conception de systèmes cobotiques industriels. Approche cognitique Application à la production pyrotechnique au sein d'Ariane Group.* ED SPI 209. Retrieved from https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01670146

Moulières-Seban, T., Bitonneau, D., Thibault, J.-F., Salotti, J., & Claverie, B. (2016, 21-23/09/16). *La Cobotique : un domaine pluridisciplinaire émergent utile à l'ergonome.* Paper presented at the 51ème congrès de la Société d'Ergonomie de Langue Française, Marseille.

Muhlmann, D. (2001). Des nouvelles technologies à l'image des vieilles organisations. *Sociologie du travail, 43*(3), 327-347. doi:https://doi.org/10.1016/S0038-0296(01)01158-X

Neugebauer, R., Hippmann, S., Leis, M., & Landherr, M. (2016). Industrie 4.0 - From the Perspective of Applied Research. *Procedia CIRP, 57*, 2-7. doi:https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.11.002

NIOSH. (1997). *Musculoskeletal Disorders and Workplace Factors - A Critical Review of Epidemiologic Evidence for Work-Related Musculoskeletal Disorders of the Neck, Upper Extremity, and Low Back*. Retrieved from https://www.cdc.gov/niosh/docs/97-141/

Nussbaum, M., Chaffin, D., Stump, B., Baker, G., & Foulke, J. (2000). Motion times, hand forces, and trunk kinematics when using material handling manipulators in short-distance transfers of moderate mass objects. *Applied Ergonomics, 31*(3), 227-237. Retrieved from http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0003687099000629 doi:https://doi.org/10.1016/S0003-6870(99)00062-9

Odum, K., Castillo, M. C., Das, J., & Linke, B. (2014). Sustainability Analysis of Grinding with Power Tools. *Procedia CIRP, 14*, 570-574. doi:https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.03.011

Ouellet, S. (2013). Contribution de l'ergonomie à la conception d'un outil de formation. *Activités, 10*. Retrieved from doi:10.40000/activites.690

Ouellet, S., & Vézina, N. (2008). Savoirs professionnels et prévention des TMS : réflexions conceptuelles et méthodologiques menant à leur identification et à la genèse de leur construction. *Perspectives interdisciplinaires sur le travail et la santé, 10-2*, 38.

Parasuraman, R., & Wickens, C. (2008). Humans : still vital after all these years of automation. *Human Factors, 50*(3), 511-520.

Peshkin, M., Colgate, J., Wannasuphoprasit, W., Moore, C., Gillespie, B., & Akella, P. (2001). Cobot architecture. *Robotics and Automation, IEEE Transactions on, 17*, 377-390. doi:10.1109/70.954751

Peshkin, M., & Colgate, J. E. (1999). Cobots. *Industrial Robot: An International Journal, 26*(5), 335-341. doi:10.1108/01439919910283722

Petit, J. (2005). *Organiser la continuité du service : intervention sur l'organisation d'une Mutuelle de santé.* Université Victor Segalen - Bordeaux II. Retrieved from https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00659105

Petit, J., & Dugué, B. (2013). Quand l'organisation empêche un travail de qualité : étude de cas *Perspectives interdisciplinaires sur le travail et la santé, 15-2*. doi:10.4000/pistes.3419

Pezé, M. (1998). Les athlètes du quotidien : approche psychosomatique et psychodynamique des TMS. *TMS et évolution des conditions de travail. Les actes du séminaire Paris 98*, 63-70. Retrieved from https://www.anact.fr/tms-et-evolution-des-conditions-de-travail-seminaire-paris-1998

Pezé, M. (2002). *Le deuxième corps*: La Dispute.
Rabardel, P., Carlin, N., Chesnaisn, M., Lang, N., Le Joliff, G., & Pascal, M. (1998). *Ergonomie concepts et méthodes*. Toulouse: Octares.
Rabardel, P., & Pastré, P. (2005). *Modèles du sujet pour la conception : dialectiques, activités, développement*. Toulouse: Octarès.
Ramachandran, N., Pande, S. S., & Ramakrishnan, N. (1994). The role of deburring in manufacturing: A state-of-the-art survey. *Journal of Materials Processing Technology, 44*(1), 1-13. doi:https://doi.org/10.1016/0924-0136(94)90033-7
Rapport annuel 2019 de l'Assurance Maladie - Risques professionnels. (2020). Retrieved from https://assurance-maladie.ameli.fr
Richard, J. F. (1990). *LES ACTIVITES MENTALES. COMPRENDRE, RAISONNER, TROUVER DES SOLUTIONS*. Paris: Armand Colin.
Rivière, S., Alvès, J., Smaili, S., Roquelaure, Y., & Chatelot, J. (2021). Estimation de la sous-déclaration des TMS en France : évolution entre 2009 et 2015.
Roquelaure, Y. (1999). *Les activités avec instruments et préservation de la santé : approche interdisciplinaire.* (Thèse de doctorat d'ergonomie), Paris.
Roquelaure, Y. (2016). Promoting a shared representation of workers' activities to improve integrated prevention of work-related musculoskeletal disorders. *Safety and Health at Work, 7*(2), 171-174. doi:10.1016/j.shaw.2016.02.001
Roquelaure, Y. (2018). *Troubles musculo-squelettiques et facteurs psychosociaux au travail* Retrieved from https://www.etui.org/fr/publications/rapports/troubles-musculo-squelettiques-et-facteurs-psychosociaux-au-travail
Roquelaure, Y., Ha, C., Leclerc, A., Touranchet, A., Sauteron, M., Melchior, M., . . . Goldberg, M. (2006). Epidemiologic surveillance of upper-extermity musculoskeletal disorders in the working population. *Arthritis & Rheumatism (Arthritis Care & Research), 55*(5), 765-778.
Roquelaure, Y., Malchaire, J., Cock, N., Martin, Y. H., Piette, A., Vergracht, S., . . . Leboulanger, M. A. (2001). Evaluation d'une méthode de quantification de l'activité gestuelle au cours de tâches répétitives de production de masse. *INRS documents pour le médecin du travail, 86*, 167-176.
Saraceno, M. (2020). L'homme "au coeur". *Communication, 37/1*. doi:https://doi.org/10.4000/communication.11293
Sauter, S. L., Chapman, L. J., Knutson, S. J., & Anderson, H. A. (1987). Case example of wrist trauma in keyboard use. *Applied Ergonomics, 18*(3), 183-186. doi:https://doi.org/10.1016/0003-6870(87)90002-0
Savescu, A., Riahi, M.-A., Wild, P., & Desbrosses, K. (2021). *Collaborative robotics: analysis of the koint angles of the upper arm during grinding tasks.* Paper presented at the IEA, Vancouver.
Savescu, A., & Simonet, P. (2020, 11, 12 et 13 janvier 2021). *Pourquoi et comment associer la mesure biomécanique au cadre d'intervention de la clinique de l'activité dans une action de prévention des TMS?* . Paper presented at the 55ème Congrès de la SELF, L'activité et ses frontières. Penser et agir sur les transformations de nos sociétés. , Paris.
Savescu, A., Simonet, P., Gaudez, C., & Fernandez, G. (2020). Interdisciplinary methodological framework of biomechanics and occupational psychology for MSD prevention. *Activités, 17-2*. doi:https://doi.org/10.4000/activites.5836
Schaller, A., & Caetano, G. (2018). Nouvelles technologies - nouveaux risques. Symposium de l'Institut national de médecine agricole (INMA). *Références en santé au travail, TD250*(153), 92-100.

Schoose, C., Caroly, S., Cuny-Guerrier, A., & Savescu, A. (2020). *Analyse des représentations suite à l'introduction d'un robot d'assistance physique dans un objectif de prévention des TMS*. Paper presented at the Actes du 55ème Congrès de la SELF, Paris.

Schoose, C., Cuny-Guerrier, A., Caroly, S., Claudon, L., Wild, P., & Savescu, A. (2022). Evolution of the biomechanical dimension of the professional gestures of grinders when using a collaborative robot. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 1-27. doi:10.1080/10803548.2022.2065063

Silverstein, B. A., Fine, L. J., & Armstrong, T. J. (1986). Hand wrist cumulative trauma disorders in industry. *British Journal of Industrial Medicine, 43*(11), 779-784. doi:10.1136/oem.43.11.779

Simonet, P. (2009). L'examen méthodique d'un geste de métier pour une prévention durable des TMS : une intervention en clinique de l'activité. *Perspectives interdisciplinaires sur le travail et la santé, 11-2*. doi:10.4000/pistes.2404

Simonet, P. (2011). *L'hypo-socialisation du mouvement. Prévention durable des troubles musculo-squelettiques chez des fossoyeurs municipaux.* CNAM.

Simonet, P., & Caroly, S. (2020). « Geste dialogué » et prévention des TMS. ["Dialogued gesture" and musculoskeletal disorders prevention]. *Le travail humain, 83*(1), 1-32. doi:10.3917/th.831.0001

Sperandio, J.-C. (1983). *L'ergonomie du travail mental*: Masson.

St-Vincent, M., Vézina, N., Bellemare, M., Denis, D., Ledoux, E., & Imbeau, D. (2011). L'intervention en ergonomie (pp. 360): IRRST/Editions MultiMondes.

Stock, S., Nicolakakis, N., Messing, K., Turcot, A., & Raiq, H. (2013). Quelle est la relation entre les troubles musculo-squelettiques (TMS) liés au travail et les facteurs psychosociaux ? Survol de diverses conceptions des facteurs psychosociaux du travail et proposition d'un nouveau modèle de la genèse des TMS. *Perspectives interdisciplinaires sur le travail et la santé, 15*(2), 1-24.

Sylla, N., Bonnet, V., Colledani, F., & Fraisse, P. (2014). Ergonomic contribution of able exoskeleton in automotive industry. *International Journal of Industrial Ergonomics, 44*(4), 475-481.

Sznelwar, L., Mascia, F., & Bouyer, G. (2006). L'empêchement au travail : une source majeure de TMS? . *Activités, 3-2*. doi:https://doi.org/10.4000/activites.1339

Tappin, D. C., Bentley, T. A., & Vitalis, A. (2008). The role of contextual factors for musculoskeletal disorders in the New Zealand meat processing industry. *Ergonomics, 51*(10), 1576-1593. doi:10.1080/00140130802238630

Tihay, D. (2018). Robotique collaborative : perception et attentes des industriels. *Hygiène et sécurité du travail, 250*, 8.

Tihay, D., & Perrin, N. (2018). *Human-robot co-activity: needs analysis*. Paper presented at the Proceedings of the 9th International Conference on Safety of Industrial Automated Systems SIAS 2018.

Toulouse, G., St-Arnaud, L., Duhalde, D., Lévesque, J., Delisle, A., & Comtois, A.-S. (2013). Diagnostic ergonomique résultant de la présence de risques psychosociaux contribuant aux troubles musculo-squelettiques : le cas des centres d'appels d'ugence 9-1-1. *Perpectives interdisciplinaires sur le travail et la santé, 15-2*. doi:10/4000/pistes.3385

Vaidya, S., Ambad, P., & Bhosle, S. (2018). Industry 4.0 – A Glimpse. *Procedia Manufacturing, 20*, 233-238. doi:https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.034

Vallery, G., Bobillier-Chaumon, M.-E., Brangier, E., & Dubois, M. (2016). *Psychologie du Travail et des Organisations : 110 notions clefs*: Paris : Dunod.

Van Belleghem, L. (2018). La simulation de l'activité en conception ergonomique : acquis et perspectives *Activités, 15-1*, 1-22.

Van Belleghem, L., De Gasparo, S., & Gaillard, I. (2013). Le développement de la dimension psychosociale au travail *Ergonomie constructive* (pp. 47-60). Paris cedex 14: Presses Universitaires de France.

Van De Weerdt, C. (2003). *Intérêts et difficultés de l'analyse des émotions en psycho-ergonomie* (Vol. 48).

Varghese, M. A., Saha, P. N., & Atreya, N. (1994). A rapid appraisal of occupational workload from a modified scale of perceived exertion. *Ergonomics, 37*(3), 485-491. doi:10.1080/00140139408963665

Vasselin, A., & Wioland, L. (2007). *L'utilisateur au centre d'une approche multidisciplinaire en conception : exemple des machines portatives*. Paper presented at the 42ème Congrès de la Société d'Ergonomie de Langue Française, St. Malo, France.

Vermersch, P. (2006). *L'entretien d'explicitation*. Paris: ESF.

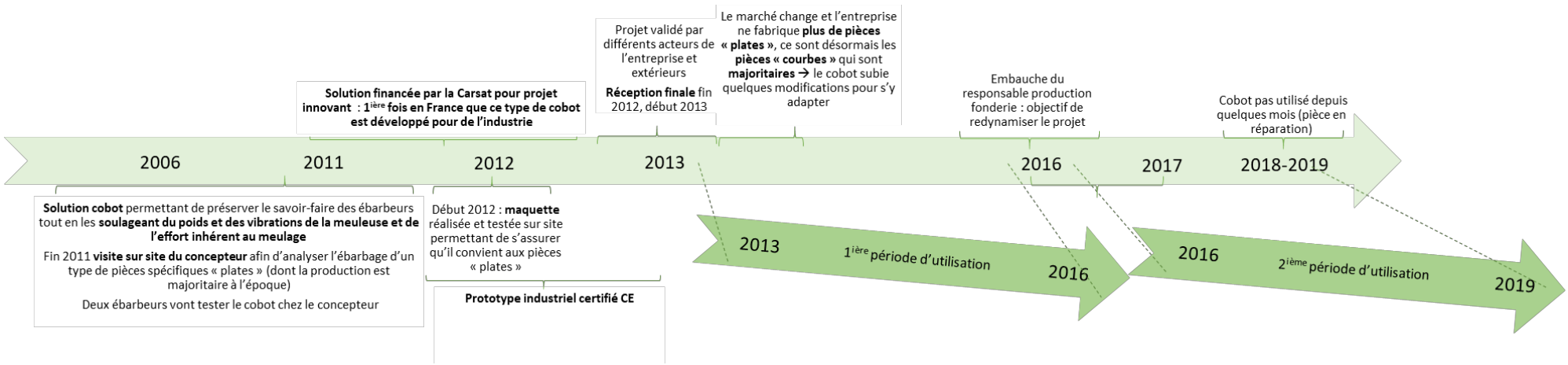
Vézina, N. (2001). La pratique de l'ergonomie face aux TMS : ouverture à l'interdisciplinarité. *Société d'Ergonomie de Langue Française-Association Canadienne d'Ergonomie (SELF-ACE)*, 44-60.

Walsh, K., Varnes, N., Osmond, C., Styles, R., & Coggon, D. (1989). Occupational causes of low-back pain. *Scand J Work Environ Health, 15*(54-59).

Wioland, L., Debay, L., & Atain-Kouadio, J.-J. (2019). Acceptation des exosquelettes par les opérateurs : étude exploratoire. *Références en santé au travail, 157*, 45-61.

Annexes

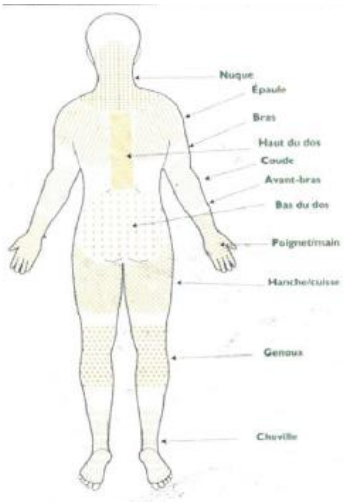
Annexe 1 : Frise chronologique de l'historique du projet de développement et d'introduction du cobot


2006
2011
2012
2013
2016
2017
2018-2019
Solution financée par la Carsat pour projet innovant : 1ière fois en France que ce type de cobot est développé pour de l'industrie
Projet validé par différents acteurs de l'entreprise et extérieurs
Réception finale fin 2012, début 2013
Le marché change et l'entreprise ne fabrique plus de pièces « plates », ce sont désormais les pièces « courbes » qui sont majoritaires → le cobot subie quelques modifications pour s'y adapter
Embauche du responsable production fonderie : objectif de redynamiser le projet
Cobot pas utilisé depuis quelques mois (pièce en réparation)
Solution cobot permettant de préserver le savoir-faire des ébarbeurs tout en les soulageant du poids et des vibrations de la meuleuse et de l'effort inhérent au meulage
Fin 2011 visite sur site du concepteur afin d'analyser l'ébarbage d'un type de pièces spécifiques « plates » (dont la production est majoritaire à l'époque)
Deux ébarbeurs vont tester le cobot chez le concepteur
Début 2012 : maquette réalisée et testée sur site permettant de s'assurer qu'il convient aux pièces « plates »
Prototype industriel certifié CE
2013
1ière période d'utilisation
2016
2016
2ième période d'utilisation
2019

Annexe 2 : Guide d'entretiens avec les ébarbeurs (entretiens semi-directifs)

Caractéristiques individuelles

- Âge
- Ancienneté dans l'entreprise
- Ancienneté en tant qu'ébarbeur (traditionnel)
- Ancienneté vis-à-vis de l'usage du cobot
- État actuel, comme d'habitude ?
- Fatigue ? Plus que d'habitude ?
- Douleurs ? (schéma corporel) Douleurs précédentes ?



Meulage traditionnel

- Qu'est-ce qui est éprouvant lors du meulage ?

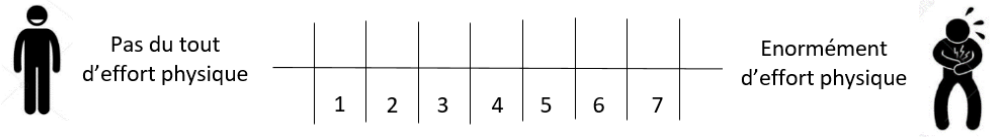
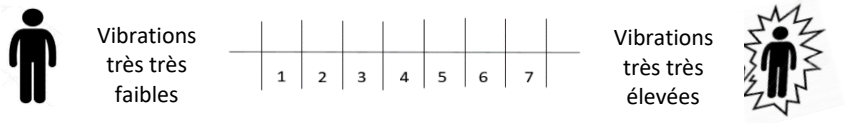
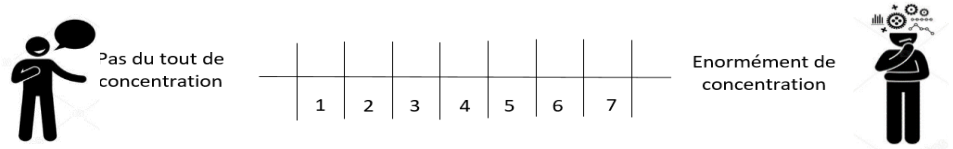
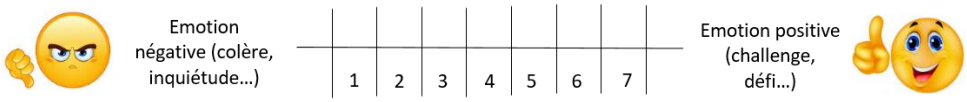
(schéma d'une pièce)

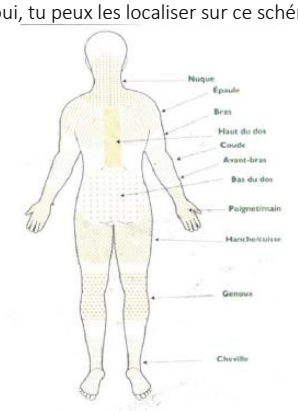
- Zones de la pièce à meuler ?
- Les plus dures à meuler ? Vis-à-vis de quoi ?
- Les plus faciles à meuler ? Vis-à-vis de quoi ?

Meulage cobot

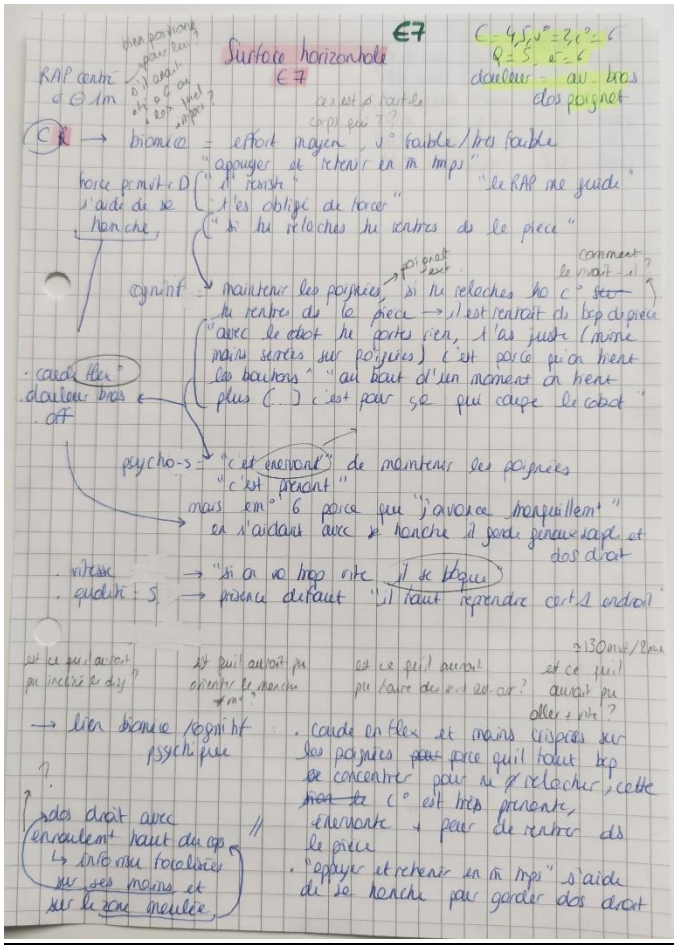
- Toutes les zones peuvent-être meulées avec le cobot ? Si non lesquelles ? Pourquoi ?
- Qu'est-ce qui est le plus compliqué lors de l'usage du cobot ? Vis-à-vis de quoi ?
- Qu'est-ce qui est le plus facile à meuler avec le cobot ? Vis-à-vis de quoi ?
- Où est-ce que le cobot est utile pour toi ?

Annexe 3 : Guide d'entretiens avec les ébarbeurs (entretiens au poste de travail)

<table>
<tr><td></td><td>- Revenir sur les moments observés (j'ai observé que… j'ai remarqué que…) : postures adoptées ? Type de mouvements réalisé ? Position par rapport à l'opérateur ? Position des mains ? Orientation meuleuse ?
- Revenir sur les moments observés : tu cherchais à faire quoi en faisant… ? Tu aurais pu faire autrement ? Et si tu avais fait comme ça… ? Quels éléments t'as fait changer… ?</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Biomécanique</td><td>- Globalement, ça t'a demandé beaucoup d'effort physique ?
- Tu noterais sur combien sur cette échelle de 1 à 7 ? 1 c'est pas du tout d'effort physique et 7 c'est énormément d'effort physique ?
  </td></tr>
<tr><td>- Tu as ressenti des vibrations ?
- Tu les estimerais à combien sur cette échelle de 1 à 7 ?
  </td></tr>
<tr><td rowspan="3">Cognitive</td><td>- Ça t'a demandé beaucoup de concentration ?
- Tu estimerais à combien sur cette échelle ta concentration de 1 pas du tout de concentration et 7 énormément de concentration?
 
- Sur quels aspects tu devais particulièrement te concentrer et inversement ?</td></tr>
<tr><td>- Qu'est-ce que tu regardes/touches/entends ? C'est une information pour toi ? Pour quoi faire ?</td></tr>
<tr><td>- C'est fini pour toi là ? Comment tu le sais ?</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Psycho-sociale</td><td>- Est-ce que tu dirais que tu étais dans des émotions très négatives (comme de la colère, de l'inquiétude, de l'énervement…) ou très positive (comme un challenge, de la hâte ou de l'envie…) ?
- Tu pourrais évaluer tes émotions à ce moment précis sur cette échelle de 1 à 7 ?
 
- Tu pourrais m'expliquer qu'est-ce qui fait que tu es dans ces émotions ?</td></tr>
<tr><td>- Tu es satisfait de ton travail ? Il dirait quoi ton collègue/contrôleur/chef ?
- La qualité te convient ? Tu l'estimerais à combien sur cette échelle de 1 où la qualité n'est pas du tout satisfaisante et 7 où la qualité est extrêmement satisfaisante ?

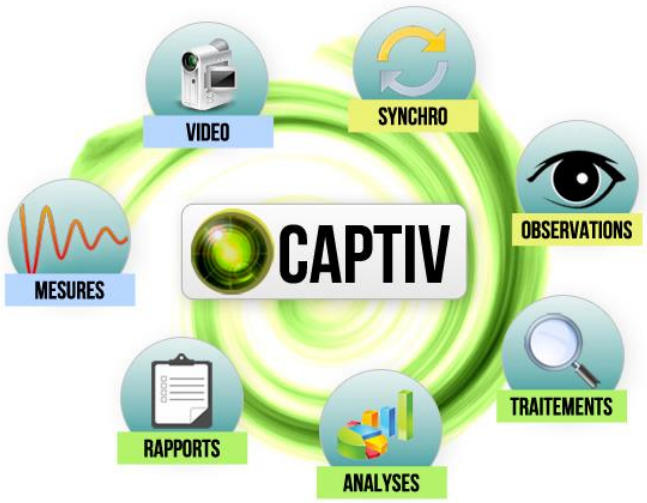
- Sur quels critères tu t'appuies ?</td></tr>
<tr><td>Douleurs</td><td>- Est-ce que tu as ressenti des douleurs ? Si oui, tu peux les localiser sur ce schéma ?
  </td></tr>
</table>

Annexe 4 : Guide d'entretiens avec les ébarbeurs (entretiens d'auto-confrontation individuelle a posteriori)



Annexe 5 : Définition et fonctionnalités de l'outil Captiv

L'outil CAPTIV a été développé par TEA (société Technologie Ergonomie Appliqués) et est un système d'acquisition qui va synchroniser des vidéos avec des observations et/ou des mesures récupérées de différents capteurs. Ce logiciel permet de réaliser l'encodage d'une vidéo dans le but d'associer à une action un code. Cela permet notamment de créer des chroniques d'activité des travailleurs observés.



Annexe 6 : Définition et fonctionnalités du logiciel NVivo

Le logiciel NVivo est un logiciel d'analyse qualitative de données. Il permet de combiner différentes sources de données comme par exemple des entretiens retranscrits, des images, des articles, des pages web etc. Il permet de réaliser des analyses de contenu (codage, requêtes, visualisation) et d'identifier des connexions entre les différents éléments du projet.

Annexe 7 : Postures adoptées par le cou lors des gestes traditionnels et lors des gestes cobot

	Ebarbeur 1	Ebarbeur 2		Ebarbeur 3		Ebarbeur 5		Ebarbeur 7	
	Cobot	Traditionnel	Cobot	Traditionnel	Cobot	Traditionnel	Cobot	Traditionnel	Cobot
	SURFACE VERTICALE								
Flexion	100% >20°	3% 0°-10° 28% 10°-20° 69% >20°	100% 10°20°	68% 10°-20° 32% >20°	100% >20°	27% 10°-20° 73% >20°	100% >20°	100% >20°	100% >20°
Extension	100% off	100% off	100% off	100% off	100% off	100% off	100% off	100% off	100% off
Flexion latérale droite	100% off	7% 0°-10° 93% >10°	100% off	100% off	24% 0°-10° 66% >10°	24% 0°-10° 76% >10°	100% off	24% 0°-10° 55% >10° 21% off	43% 0°-10° 27% >10° 30% off
Flexion latérale gauche	100% >10°	100% off	10% 0°-10° 4% >10° 86% off	100% >10°	100 % off	100% off	3% 0°-10° 49 % >10° 48% off	4% 0°-10° 3% >10° 93% off	3% 0°-10° 10% >10° 87% off
Torsion droite	100% 0°-45°	40% 0°-45° 60% off	100% off	100% off	100% off	100% 0°-45°	1% >45° 99% off	66% 0°-45°	2% >45° 98% off
Torsion gauche	100% off	100% off	100% off	100% off	12% 0°-45° 88% off	100% off	100% off	100% off	100% off
	SURFACE HORIZONTALE								
Flexion	2% 0°-20° 98% >20°	40% 10°-20° 60% >20°	100% >20°	100% >20°	100% >20°	100% >20°	100% >20°	100% >20°	100% >20°
Extension	100% off	100% off	100% off	100% off	100% off	100% off	100% off	100% off	100% off
Flexion latérale droite	100% off	100% off	74% 0°-10° 26% >10°	100% off	100% off	100% off	100% off	76% 0°-10° 24% off	17% 0°-10° 41% >10° 42% off
Flexion latérale gauche	36% 0°-10° 63% >10° 1% off	100% off	100% off	63% 0°-10° 27% off	48% 0°-10° 32% >10° 20% off	13% 0°-10° 87% off	13% 0°-10° 87% off	100% off	100% off
Torsion droite	67% 0°-45° 33% off	100% off	100% off	1% 0°-45° 1% >45°	100% off	100% off	100% off	100% off	100% off

Torsion gauche	1% 0°-45° 2% >45° 97% off	100% off	100% off	100% off	100% off	100% off	100% off	78% 0°-45° 22% off	100% 0°-45°

Annexe 8 : Postures adoptées par le tronc lors des gestes traditionnels et lors des gestes cobot

	Ebarbeur 1	Ebarbeur 2		Ebarbeur 3		Ebarbeur 5		Ebarbeur 7	
	Cobot	Traditionnel	Cobot	Traditionnel	Cobot	Traditionnel	Cobot	Traditionnel	Cobot
	SURFACE VERTICALE								
Flexion	100% 20°-60°	10% 0°-20° 90% 20°-60°	100% 20°-60°	100% 20°-60°	46% 0°-20° 54% 20°-60°	73% 0°-20° 27% 20°-60°	99% 0°-20° 1% 20°-60°	32% 0°-20° 68% 20°-60°	100% 20°-60°
Extension	100% off	100% off	100% off	100% off	100% off	100% off	100% off	100% off	100% off
Flexion latérale droite	100% off	92% >10° 8% off	100% >10°	100% off	27% 0°-10° 73% >10°	100% >10°	100% off	31% 0°-10° 61% >10° 8% off	100% off
Flexion latérale gauche	100% >10°	8% 0°-10° 92% off	100% off	100% >10°	100° off	100% off	46% 0°-10° 54% >10°	100% off	15% 0°-10° 71% >10° 14% off
Rotation droite	100% >10°	100% off	100% >10°	100% off	100% off	100% >10°	91% 0°-10° 9% >10°	24% 0°-10° 76% >10°	48% 0°-10° 23% >10° 29% off
Rotation gauche	100% off	100% off	100% off	100% off	26% 0°-10° 74% >10°	100% off	100% off	100% off	29% >10° 71% off
	SURFACE HORIZONTALE								
Flexion	100% 0°-20°	100% 20°-60°	100% 20°-60°	1% 0°-20° 99% 20°-60°	100% 0° 20°	100% 0° 20°	28% 0° 20° 72% 20°-60°	100% 20°-60°	59% 0° 20° 41% 20°-60°
Extension	100% off	100% off	100% off	100% off	100% off	100% off	100% off	100% off	100% off

Flexion latérale droite	100% off	2% 0°-10° 10% >10° 88% off	5% >10° 95% off	10% 0°-10° 5% >10° 85% off	100% off	20% 0°-10° 64% >10° 16% off	95% 0°-10° 5% off	3% 0°-10° 73% >10° 24% off	100% >10°
Flexion latérale gauche	38% 0°-10° 62% >10°	40% 0°-10° 48% >10° 12% off	71% 0°-10° 24% >10° 5% off	32% 0°-10° 52% >10° 15% off	45% 0°-10° 55% >10°	2% 0°-10° 13% >10° 84% off	5% >10° 95% off	3% 0°-10° 21% >10° 76% off	100% off
Rotation droite	41% 0°-10° 51% >10° 8% off	96% 0°-10° 4% >10°	100% off	12% 0°-10° 42% >10° 46% off	100% off	12% 0°-10° 66% >10° 22% off	84% >10° 16% off	19% >10° 81% off	100% >10°
Rotation gauche	8% > 10° 92% off	100% off	100% off	2% 0°-10° 16% >10° 82% off	31% 0°-10° 69% >10°	5% 0°-10° 13% >10° 81% off	100% off	81% >10° 19% off	100% off

Annexe 9 : Postures adoptées par les épaules lors des gestes traditionnels et lors des gestes cobot

	Ebarbeur 1	Ebarbeur 2		Ebarbeur 3		Ebarbeur 5		Ebarbeur 7	
	Cobot	Traditionnel	Cobot	Traditionnel	Cobot	Traditionnel	Cobot	Traditionnel	Cobot
	SURFACE VERTICALE								
Epaule droite abduction	100% 20°60°	100% 0°20°	100% 20° -60°	54% 20° - 60° 5% >60° 41% off	47% 0°-20° 53% 20° -60°	100% NV	100% 20°-60°	100% 0°-20°	10% 0°-20° 80% 20°-60° 10% >60°
Epaule gauche abduction	100% 0°20°	25% 0°-20° 75% 20°-60°	100% off	100% NV	3% 0°-20° 60% 20°-60° 37% >60°	41% 0°-20° 40% 20°-60° 2% >60° 17% off	100% NV	75% 0°-20° 25% 20°-60°	44% 0°-20° 47% 20° à 60° 8% >60° 1% off
Epaule droite adduction	100% off	100% off	100% off	100% off	100% off	100% NV	100% off	100% off	100% off

Epaule gauche adduction	100% off	100% off	100% >0°	100% NV	100% off	17% >0° 83% off	100% NV	100% off	1% >0° 99% off
Epaule droite antépulsion	100% 0°20°	100% NV	100% 20°-60°	26% 0°-20° 73% 20°-60° 1% >60°	44% 20°-60° 56% >60°	100% NV	37% 0° - 20° 63% off	100% NV	42% 0°-20° 58% off
Epaule gauche antépulsion	5% 0°-20° 95% 20°-60°	77% 0°-20° 23% off	100% 20°-60°	100% NV	35% 0°-20° 30% 20°-60° 35% >60°	16% 0°-20° 84% 20°-60°	100% NV	58% 0°-20° 42% 20°-60°	100% NV
Epaule droite rétropulsion	100% off	100% NV	100% off	100% off	100% off	100% NV	63% >0° 37% off	100% NV	58% >0° 42% off
Epaule gauche rétropulsion	100% off	23% >0° 77% off	100% off	100% NV	100% off	100% off	100% NV	100% off	100% NV
	SURFACE HORIZONTALE								
Epaule droite abduction	68% 20°-60° 32% >60°	50% 0°-20° 50% 20°-60°	100% 20° -60°	86% 0°-20° 6% 20°-60° 8% off	82% 20°-60° 18% NV	9% 0°-20° 91% 20°-60° 16% off	73% 20°-60° 27% >60°	81% 0°-20° 19% 20°-60°	14% 0° 20° 86% 20°-60°
Epaule gauche abduction	63% 0°-20° 28% 20°-60° 9% off	85% 0°-20° 6% 20°-60° 9% off	50% 0°-20° 50% 20°-60°	66% 0°-20° 7% 20°-60° 27% off	100% 20°-60°	57% 0°-20° 27% 20°-60°	100% 20°-60°	19% 0°-20° 81% 20°-60°	100% 20°-60°
Epaule droite adduction	100% off	100% off	100% off	8% >0° 92% off	82% off 18% NV	100% off	100% off	100% off	100% off
Epaule gauche adduction	9% >0° 91% off	7% >0° 93% off	100% off	27% >0° 73% off	100% off	16% >0° 84% off	100% off	100% off	100% off
Epaule droite antépulsion	71% 0°-20° 6% 20°-60° 23% off	29% 0°-20° 71% off	100% NV	72% 0°-20° 28% 20°-60°	49% 0°-20° 25% 20°-60° 8% off 18% NV	79% 0°-20° 21% off	64% 0°-20° 36% off	82% 0°-20° 18% 20°-60°	100% 0°-20°

Epaule gauche antépulsion	33% 0°-20° 67% 20°-60°	99% 0°-20° 1% off	100% 0°-20°	1% 0°-20° 99% 20°-60°	95% 0°-20° 5% 20°-60°	97% 0°-20° 3% 20°-60°	79% 0°-20° 21% 20°-60°	100% 20°-60°	27% 0°-20° 73% 20°-60°
Epaule droite rétropulsion	22% >0° 78% off	71% >0° 29% off	100% NV	100% off	8% >0° 74% off 18% NV	21% >0° 79% off	36% >0° 64% off	100% off	100% off
Epaule gauche rétropulsion	100% off	1% >0° 99% off	100% off	100% off	100% off	100% off	100% off	100% off	100% off

Annexe 10 : Postures adoptées par les coudes lors des gestes traditionnels et lors des gestes cobot

	Ebarbeur 1	Ebarbeur 2		Ebarbeur 3		Ebarbeur 5		Ebarbeur 7	
	Cobot	Traditionnel	Cobot	Traditionnel	Cobot	Traditionnel	Cobot	Traditionnel	Cobot
	SURFACE VERTICALE								
Coude droit flexion	5% 0° 10° 95% off	100% NV	100% off	45% NV 22% 10°-80°	43% 10°-80° 57% off	36% NV 1% 0°-10° 63% 10°-80°	15% NV 21% 0°-10° 57% 10° -80° 7% off	100% NV	11% 0°-10° 89% 10°-80°
Coude gauche flexion	100% off	35% 0°-10° 9% 10°-80° 56% off	100% off	100% NV	43% 10°-80° 57% off	45% NV 38% 10°-80° 17% off	100% NV	47% NV 19% 10°-80° 20% off	15% NV 28% 0°-10° 39% 10°-80° 18% off
Coude droit extension	95% 0°-30° 5% off	100% NV	100% 30°-80°	45% NV 24% 0°-30° 31% off	8% 0°-30° 49% 30°-80° 43% off	36% NV 64% off	15% NV 7% 0°-30° 78% off	100% NV	100% off
Coude gauche extension	6% 0°-30° 94% 30°-80°	46% 0°-30° 10% 30°-80° 44% off	100% 30°-80°	100% NV	9% 0°-30° 48% 30°-80° 43% off	45% NV 55% off	100% NV	47% NV 17% 0°-30° 3% 30°-80°	15% NV 18% 0°-30° 67% off

								33% off	
	SURFACE HORIZONTALE								
Coude droit flexion	12% 0°-10° 88% 10°-80°	40% 0°-10° 55% 10°-80° 44% off	76% 0°-10° 24% 10° 80°	100% off	6% 0°-10° 92% 10°-80° 2% off	100% off	100% 10°-80°	100% off	100% 10°-80°
Coude gauche flexion	55% 0°-10° 45% 10°-80°	3% 0°-10° 97% off	98% 0°-10° 2% 10°-80°	100% off	13% 0°-10° 87% 10°-80°	100% off	100% 10°-80°	100% off	100% 0°-10°
Coude droit extension	100% off	5% 0°-30° 95% off	100% off	100% 30°-80°	2% 0°-30° 98% off	47% 0°-30° 53% 30°-80°	100% off	8% 0°-30° 92% 30°-80°	100% off
Coude gauche extension	100% off	97% 0°-30° 3% off	100% off	100% 30°-80°	100% off	100% 0°-30°	100% off	100% 30° 80°	100% off

Annexe 11 : Postures adoptées par les poignets lors des gestes traditionnels et lors des gestes cobot

	Ebarbeur 1	Ebarbeur 2		Ebarbeur 3		Ebarbeur 5		Ebarbeur 7	
	Cobot	Traditionnel	Cobot	Traditionnel	Cobot	Traditionnel	Cobot	Traditionnel	Cobot
	SURFACE VERTICALE								
Poignet droit flexion	100% NV	100% NV	100% 0°-15°	100% NV	5% 0°-15° 95% >15°	100% NV	6% NV 94% >15°	47% NV 53% 0°-15°	78 % 0° - 15° 22% >15°
Poignet gauche flexion	100% NV	100% NV	100% off	100% NV	3% 0°-15° 37% >15° 60% off	100% NV	100% NV	100% NV	13% NV 87% >15°
Poignet droit extension	100% NV	100% NV	100% off	100% NV	100% off	100% NV	6% NV 94% off	100% NV	100% off
Poignet gauche extension	100% NV	100% NV	100% 0°-15°	100% NV	17% 0°-15° 43% >15° 40% off	100% NV	100% NV	100% NV	13% NV 87% off

Poignet droit abduction	100% NV	100% NV	100% >0°	100% NV	100% >0°	100% NV	6% NV 94% >0°	100% NV	100% >0°
Poignet gauche abduction	100% NV	100% NV	100% off	100% NV	81% >0° 19% off	100% NV	100% NV	100% NV	13% NV 87% >0°
Poignet droit adduction	100% NV	100% NV	100% off	100% NV	100% off	100% NV	12% NV 88% off	100% NV	100% off
Poignet gauche adduction	100% NV	100% NV	100% >0°	100% NV	19% >0° 81% off	100% NV	100% NV	100% NV	13% NV 87% off
	SURFACE HORIZONTALE								
Poignet droit flexion	36% 0°-15° 64% off	96% 0°-15° 4% >15°	16% 0°-15° 84% >15°	100% 0°-15°	13% 0°-15° 69% >15° 18% NV	15% 0°-15° 85% >15°	27% 0°-15° 55% >15° 18% off	100% 0°-15°	100% off
Poignet gauche flexion	23% 0°-15° 77% >15°	47% 0°-15° 47% >15° 6% off	100% off	60% 0°-15° 40% off	2% 0°-15° 15% >15° 65% off 18% NV	74% 0°-15° 11% >15° 15% off	26% 0°-15° 30% >15° 44% off	29% 0°-15° 71% >15°	41% 0°-15° 59% >15°
Poignet droit extension	27% 0°-15° 73% off	100% off	100% off	100% off	82% off 18% NV	100% off	18% 0°-15° 82% off	100% off	100% 0°-15°
Poignet gauche extension	100% off	6% 0°-15° 94% off	38% 0°-15° 62% >15°	40% 0°-15° 60% off	8% 0°-15° 57% >15° 17% off 18% NV	15% 0°-15° 85% off	2% 0°-15° 42% >15° 56% off	100% off	100% off
Poignet droit abduction	100% >0°	100% >0°	100% >0°	94% >0° 6% off	82% >0° 18% NV	100% >0°	100% >0°	100% >0°	100% >0°
Poignet gauche abduction	100% >0°	99% >0° 1% off	100% >0°	98% >0° 2% off	82% >0° 18% NV	100% >0°	100% >0°	100% >0°	100% >0°
Poignet droit adduction	100% off	100% off	100% off	100% off	82% off 18% NV	100% off	100% off	100% off	100% off

Poignet gauche adduction	100% off	1% >0° 99% off	100% off	100% off	82% off 18% NV	100% off	100% off	100% off	100% off