

Titre: Réduction des risques liés aux Troubles Musculo-Squelettiques (TMS) et aux Vibrations Mains-Bras (VMB) lors des activités d'ébavurage de pièces en aéronautique
Title:

Auteur: Clément Croissant
Author:

Date: 2020

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Croissant, C. (2020). Réduction des risques liés aux Troubles Musculo-Squelettiques (TMS) et aux Vibrations Mains-Bras (VMB) lors des activités d'ébavurage de pièces en aéronautique [Master's thesis, Polytechnique Montréal].
Citation: PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/5576/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/5576/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Daniel Imbeau
Advisors:

Programme: Maîtrise recherche en génie industriel
Program:

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

**Réduction des risques liés aux Troubles Musculo-Squelettiques (TMS) et aux
Vibrations Mains-Bras (VMB) lors des activités d'ébavurage de pièces en
aéronautique**

CLÉMENT CROISSANT

Département de mathématiques et de génie industriel

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maitrise ès sciences appliquées*

Génie industriel

Décembre 2020

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

Réduction des risques liés aux Troubles Musculo-Squelettiques (TMS) et aux Vibrations Mains-Bras (VMB) lors des activités d'ébavurage de pièces en aéronautique

présenté par **Clément CROISSANT**

en vue de l'obtention du diplôme de *Maitrise ès sciences appliquées*

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

Samuel-Jean BASSETTO, président

Daniel IMBEAU, membre et directeur de recherche

Pierre-Luc SIMARD, membre

REMERCIEMENTS

Je tiens, tout d'abord, à remercier le professeur Daniel IMBEAU qui m'a proposé ce projet et, par la même occasion, m'a donné l'opportunité de continuer mes études au Canada. J'aimerais également le remercier pour le temps qu'il m'a consacré pendant toute la durée de ma maîtrise, pour ses conseils, ses idées, son expertise, ses compétences, son sérieux, sa présence en tant que directeur de recherche et également pour la qualité de l'enseignement qu'il m'a prodigué sur le sujet de l'ergonomie occupationnelle. Son enseignement m'a permis d'acquérir les compétences nécessaires pour appréhender le travail humain.

Je tiens également à remercier, Mr Pierre-Luc SIMARD, responsable santé et sécurité chez Héroux-Devtek Inc., pour m'avoir donné l'opportunité de participer au projet de réduction des risques liés aux TMS et aux VMB lors des activités d'ébavurage, pendant lequel j'ai pu mettre en pratique les connaissances acquises à Polytechnique Montréal. Sa disponibilité ainsi que les moyens mis à ma disposition m'ont permis de vivre pleinement le projet.

Ensuite, j'aimerais remercier toutes les personnes avec qui j'ai pu échanger au sein de la compagnie Héroux-Devtek Inc., pour leur disponibilité, leur accueil dans la culture québécoise et sans qui le projet n'aurait pas abouti. Plus particulièrement, Mr Filbert LAZARRE, pour sa coopération et son soutien durant tout mon séjour dans l'entreprise.

Finalement, je souhaiterais remercier ma famille et mes proches qui m'ont supporté et encouragé tout au long de mes études et de mon séjour au Canada.

RÉSUMÉ

Le travail avec des outils vibrants est très répandu dans les industries du milieu aéronautique. Or, l'exposition aux vibrations est, depuis plus de 50 ans maintenant, associée à des risques pour la santé. Ils peuvent se manifester par différents types d'atteintes (vasculaires, nerveuses, musculo-squelettiques). Ainsi, dans le but de prévenir ces risques liés aux TMS et aux VMB, et suite à une intervention en prévention des TMS réalisée en 2018 (Lemay, Turcot, & Cloutier, 2018), l'équipe santé et sécurité de l'usine Héroux-Devtek cherche à mettre en place des solutions afin d'améliorer les conditions de travail aux postes d'ébavurage.

Ce mémoire fait une synthèse des travaux réalisés avec l'équipe Santé et Sécurité, chez Héroux-Devtek Inc. L'objectif général de ce projet est d'identifier, développer, puis tester différentes solutions permettant de réduire les facteurs de risques de Troubles Musculo-Squelettiques (TMS) incluant ceux liés aux vibrations mains-bras (VMB) à différents postes d'ébavurage chez Héroux-Devtek Inc.

Dans le but d'atteindre cet objectif, une comparaison des valeurs de vibration mesurées par l'outil HMV200 a été réalisée afin de déterminer quels outils d'ébavurage (propices pour réaliser les tâches demandées) sont les plus recommandés à ces postes. En parallèle de ces mesures, un nouveau poste de travail a été conçu et installé au sein de l'usine de Héroux-Devtek Inc. et des prototypes de dispositifs de réduction des VMB ont été testés sur le terrain avec les opérateurs. Ce projet contribue à l'avancement et à la documentation de la recherche sur la réduction des risques liés aux Troubles Musculo-Squelettiques (TMS) et aux vibrations mains-bras (VMB) dans le but d'améliorer les performances en matière de santé, de sécurité au travail dans les industries aéronautiques.

Par ailleurs, plus de 280 mesures de vibration ont été réalisées avec 9 outils, provenant de 3 manufacturiers différents, couplés aux 5 abrasifs les plus utilisés. 4 prototypes de dispositifs de réduction des VMB ont été développés, impliquant l'utilisation de support et de matériaux anti-vibration. Il ressort de cette étude que les matériaux anti-vibration sont des pistes très prometteuses en matière d'absorption de vibration tout comme l'utilisation de support. Il est donc recommandé de poursuivre la recherche sur ces deux aspects afin d'arriver à des solutions concrètes. Les mesures de vibration ont, quant à elles, montré que le choix des outils et des abrasifs était un paramètre

important dans l'objectif de réduire les expositions aux vibrations. Il en est de même pour ce qui est de l'utilisation de rallonge ou d'extension.

ABSTRACT

Working with vibrating tools is very common in the aeronautical industries. However, exposure to vibration has been associated with health risks for over 50 years. They can manifest themselves in different types of disorders (vascular, nervous, musculoskeletal). Thus, with the aim of preventing these risks related to MSDs and HAV, and following an intervention in prevention of MSDs carried out in 2018 (Lemay et al., 2018), the health and safety team of the Héroux-Devtek Inc. seeks to implement solutions to improve working conditions at deburring stations.

This thesis summarizes the work carried out with the Health and Safety team at Héroux-Devtek Inc. The general objective of this project is to identify, develop and then test different solutions making it possible to reduce the risk factors for Musculoskeletal Disorders (MSD) including those related to hand-arm vibrations (HAV) at various deburring workstations at Héroux-Devtek Inc.

In order to achieve this objective, a comparison of the vibration values measured by the HMV200 tool was carried out to determine which deburring tools (suitable for performing the tasks requested) are most recommended for these positions. In parallel with these measures, a new workstation was designed and installed at the Héroux-Devtek Inc. and prototypes of HAV reduction devices were tested in the field with the operators. This project contributes to the advancement and documentation of research on the reduction of risks associated with Musculoskeletal Disorders (MSDs) and hand-arm vibrations (HAV) with the aim of improving health performance, occupational safety in the aeronautical industries.

In addition, more than 280 vibration measurements were carried out with 9 tools, from 3 different manufacturers, coupled with the 5 most used abrasives. 4 prototypes of HAV reduction devices have been developed, involving the use of support and anti-vibration materials. It emerges from this study that anti-vibration materials are very promising avenues for vibration absorption, as is the use of a tool support. It is therefore recommended to continue research on these two aspects in order to arrive at concrete solutions. Vibration measurements have shown that the choice of tools and abrasives is an important parameter in the goal of reducing vibration exposure. The same holds true for the use of an extension cord or extension.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	III
RÉSUMÉ.....	IV
ABSTRACT	VI
TABLE DES MATIÈRES	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	IX
LISTE DES FIGURES.....	XI
LISTE DES ANNEXES.....	XIV
CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....	1
1.1 Contexte	1
1.2 Revue de littérature	1
1.3 Problématique.....	9
1.4 Objectifs	13
CHAPITRE 2 DISPOSITIFS DE REDUCTION DES VMB	15
2.1 Introduction	15
2.2 Méthodologie	18
2.3 Résultats / Discussion.....	19
CHAPITRE 3 POSTE DE TRAVAIL.....	31
3.1 Introduction	31
3.2 Méthodologie	35
3.3 Résultats / Discussion.....	36
CHAPITRE 4 TESTS DE VIBRATION.....	40
4.1 Introduction	40
4.2 Méthodologie	40

4.2.1	Les outils	40
4.2.2	Les abrasifs	43
4.2.3	La rallonge	48
4.2.4	La pièce test	50
4.2.5	Déroulement des tests	52
4.3	Résultats / Discussion	56
4.3.1	Outils à angle (90°)	56
4.3.2	Outils droits	60
4.3.3	Outils avec rallonges	62
CHAPITRE 5 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS		70
RÉFÉRENCES		72
ANNEXES		75

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1: Nombre et % de dossiers ouverts et acceptés, selon l'indicateur de lésion TMS et l'année d'inscription du dossier. (Commission des normes, 2019).....	4
Tableau 1.2: Nombre et % des dossiers TMS ouverts et acceptés, selon la nature de la lésion et l'année d'inscription du dossier. (Commission des normes, 2019).....	6
Tableau 2.1: Exemple de mesures issues du rapport de Surveillance des troubles musculo-squelettiques – Intervention en prévention des risques liés aux vibrations mains-bras. (Lemay et al., 2018).....	16
Tableau 4.1: Résumé des spécifications des outils droits	42
Tableau 4.2: Résumé des spécifications des outils à angle	43
Tableau 4.3: Moyenne par phase - Outils à angle	56
Tableau 4.4: Moyenne par condition des abrasifs - Outils à angle	57
Tableau 4.5: Moyenne par abrasif - Outils à angle	57
Tableau 4.6: Moyenne par manufacturier - Outils à angle.....	58
Tableau 4.7: Moyenne par manufacturier - Outils à angle (valeurs terrains incluses).....	58
Tableau 4.8: Durée limite d'exposition par manufacturier - Outils à angle	59
Tableau 4.9: Moyenne par phase - Outils droits	60
Tableau 4.10: Moyenne par abrasif - Outils droits.....	61
Tableau 4.11: Moyenne par manufacturier - Outils droits	61
Tableau 4.12: Durée limite d'exposition par manufacturier - Outils droits.....	62
Tableau 4.13: Moyenne par phase - Outils avec rallonge - main outil	63
Tableau 4.14: Moyenne par abrasif - Outils avec rallonge - main outil.....	63
Tableau 4.15: Moyenne par manufacturier - Outils avec rallonge - main outil	64
Tableau 4.16: Durée limite d'exposition par manufacturier - Outils avec rallonge - main outil....	64

Tableau 4.17: Moyenne par phase - Outils avec rallonge - main rallonge.....	65
Tableau 4.18: Moyenne par abrasif - Outils avec rallonge - main rallonge.....	65
Tableau 4.19: Moyenne par fabricant - Outils avec rallonge - main rallonge	66
Tableau 4.20: Durée limite d'exposition par fabricant - Outils avec rallonge - main rallonge	66

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1: Top 3 : Nombre de dossiers TMS ouverts et acceptés, selon le secteur SCIAN, 2018. (Commission des normes, 2019).....	4
Figure 1.2: Position contraignante illustrant une abduction et flexion de l'épaule, une déviation du poignet droit, une flexion latérale et une torsion du cou. (Lemay et al., 2018)	11
Figure 1.3: Position contraignante illustrant une flexion latérale et une torsion du cou. (Lemay et al., 2018).....	11
Figure 1.4: Position contraignante illustrant une abduction et flexion de l'épaule, une flexion avant/ latéral du dos, une flexion avant/ latérale et une torsion du cou. (Lemay et al., 2018).....	11
Figure 2.1: Manchon en bois.....	18
Figure 2.2: Prototype 1	20
Figure 2.3: Cas de vibrations atténuées.....	22
Figure 2.4: Cas de vibrations élevées	23
Figure 2.5: Prototype 2.....	24
Figure 2.6: Prototype 3.....	25
Figure 2.7: Prototype 4.....	26
Figure 2.8: Mise en plan prototype 4	27
Figure 2.9: Mesures prometteuses sur la main outil du prototype 4	28
Figure 2.10: Mesures prometteuses sur la main rallonge du prototype 4	29
Figure 3.1: Abduction et flexion de l'épaule, flexion avant/ latéral du dos, flexion avant/ latérale et torsion du cou. (Lemay et al., 2018)	31
Figure 3.2: Abduction et flexion de l'épaule, flexion avant/ latéral du dos, flexion avant/ latérale et torsion du cou. (Lemay et al., 2018)	32
Figure 3.3: Abduction et flexion des épaules, flexion du dos, flexion avant/ latérale et torsion du cou. (Lemay et al., 2018).....	32

Figure 3.4: Abduction et flexion des épaules, déviation du poignet droit, flexion latérale et torsion du cou. (Lemay et al., 2018).....	33
Figure 3.5: Poste de production actuel	34
Figure 3.6: Concept du nouveau poste de travail (table d'ébavurage)	39
Figure 4.1: Abrasif Roulette.....	44
Figure 4.2: Abrasif Bristle.....	45
Figure 4.3: Abrasif Papier carton	46
Figure 4.4: Abrasif Papillon	47
Figure 4.5: Abrasif Disque	47
Figure 4.6: Rallonge entière	48
Figure 4.7: Taille de la rallonge	49
Figure 4.8: Pièce test en vue entière.....	51
Figure 4.9: Pièce test vue de la zone travaillée	52
Figure 4.10: Illustration de la position de l'accéléromètre sur l'outil pendant les tests	54
Figure 4.11: Accéléromètre HVM 200	55
Figure 4.12: Exemple de combinaison ne dépassant pas le seuil d'exposition	68
Figure 4.13: Exemple de combinaison dépassant le seuil d'exposition	69
Figure 4.14: Exemple de combinaison dépassant la limite d'exposition.....	69
Figure A.1: Spécifications DYN52258	75
Figure A.2: Spécifications DYN52668	76
Figure A.3: Spécifications DYN54359	77
Figure A.4: Spécifications DOT12L2001-01	78
Figure A.5: Spécifications DOT12L2502-01	78
Figure A.6: Spécifications DOT12L2384-01	79
Figure A.7: Spécifications ATCLSF19 S200-2	80

Figure A.8: Spécifications ATCLSF29 S180.....	81
---	----

LISTE DES ANNEXES

Annexe A Spécifications détaillées des outils.....	75
--	----

CHAPITRE 1 INTRODUCTION

1.1 Contexte

Ce projet s'inscrit dans la suite d'une intervention en prévention des troubles musculo-squelettiques (TMS) liés au travail réalisé en 2017 et 2018 et résultant d'une demande paritaire du milieu de travail afin de réduire le risque de TMS au poste d'ébavurage. Cette intervention faisait elle-même suite à une maladie professionnelle indemnisée par la CNESST en 2016 en lien avec les vibrations mains-bras (VMB) et pour laquelle des limitations fonctionnelles ont été confirmées et conséquemment une assignation du travailleur à un autre poste de travail demandée chez Héroux-Devtek Inc.

L'usine de Héroux-Devtek Inc. à Longueuil se spécialise dans la remise à neuf de composantes de train d'atterrissage d'aéronefs variés. Ces composantes sont principalement des cylindres hydrauliques de dimensions et diamètres très variés dont la remise à neuf requiert du travail d'ébavurage, de polissage et de finition de types différents. Ce travail est typiquement réalisé avec des meuleuses pneumatiques droites ou à angle que l'on adapte en ajoutant des rallonges de types variés (ex., pour aller meuler au fond d'un cylindre profond) et différentes adaptations comme des poignées faites maison permettant de réaliser le travail. Les adaptations ont essentiellement pour but de rendre le travail possible. Il est à noter que ce travail est très spécialisé et artisanal puisque deux pièces en apparence identiques n'exigeront pas nécessairement exactement le même travail. Les types d'abrasifs et de brosses métalliques utilisés avec les meuleuses sont très variés. Cette variation est nécessaire pour permettre le large éventail des travaux réalisés. Le travail est habituellement réalisé sur un établi. Lorsque les pièces sont petites, le travailleur peut s'asseoir, tandis que pour les pièces de grandes dimensions la posture de travail est debout.

1.2 Revue de littérature

Les vibrations main-bras sont reconnues depuis plus d'un siècle comme facteur de risque important pour la santé des travailleurs. Les VMB produisent habituellement trois types d'atteintes : vasculaires, neurologiques et musculo-squelettiques (Dong, Welcome, Xu, & McDowell, 2020; INRS, 2019; Turcot, Vézina-nadon, Pelletier, & Tremblay, 2016). Les premières manifestations d'une atteinte à la santé sont les atteintes neurologiques sous forme d'engourdissements, de

picotements dans les doigts accompagnés par une perte de sensibilité. La seconde manifestation la plus connue est celle des doigts blancs ou encore le phénomène de Raynaud. Finalement, on reconnaît une atteinte musculo-squelettique sous forme de raideur, douleur, limitations des articulations des membres supérieurs. Le syndrome du tunnel carpien accompagne également la maladie dans de nombreux cas. Les atteintes vasculaires sont celles pour lesquelles les valeurs limites d'exposition sont proposées dans différents documents normatifs (ACGIH, 2018 ; ISO5349-1, 2001; ISO5349-2, 2001).

Selon le Réseau de la Santé Publique en Santé Au Travail (RSPSAT) (RSPSAT, 2013), les TMS se définissent comme étant « un ensemble de symptômes et d'atteintes inflammatoires ou dégénératives qui concernent les segments corporels suivants : le cou, le dos, les membres supérieurs et les membres inférieurs. Ces problèmes touchent diverses structures telles que les tendons, les muscles, les ligaments, les gaines synoviales et les articulations en incluant les disques intervertébraux. Les nerfs et les vaisseaux sanguins connexes à ces structures peuvent également être affectés. La douleur ou la perte de fonction sont des manifestations courantes de ces atteintes. Bien qu'ils puissent se manifester de façon soudaine, ces troubles évoluent habituellement de façon progressive. Ils proviennent d'un cumul de dommages causés par le dépassement de la capacité d'adaptation et de réparation des structures. Les blessures qui résultent d'un événement unique, une chute par exemple, ne sont pas considérées comme des TMS, mais plutôt comme des événements accidentels.

Les TMS reliés au travail peuvent être causés, aggravés, accélérés ou exacerbés par le travail. Ainsi, des facteurs de risque en milieu de travail peuvent contribuer à l'émergence de ces problèmes. Les principaux sont : l'effort, la répétition, le travail statique et les postures contraignantes. D'autres facteurs y contribuent également, ce sont : la pression mécanique, le froid, les vibrations, les chocs mécaniques, les facteurs reliés à l'organisation du travail et les facteurs psychosociaux. » Ces atteintes sont parfois associées à des absences du travail et à des demandes d'indemnisation. En effet, l'enquête québécoise sur des conditions de travail, d'emploi et de santé et sécurité du travail (EQCOTESST) (Vézina et al., 2011) confirme la forte prévalence des TMS : près de 732 000 travailleurs, soit 20.5 % de la population visée par l'enquête, déclarent un TMS liés à leur emploi principal à au moins une région corporelle. On note également que le dos et les membres supérieurs sont des régions affectées qui représentent respectivement 9.3 % et 9.1 % des zones traumatisées pour les 732 000 travailleurs. Ce sont là, les deux zones les plus touchées par les TMS.

L'enquête stipule que les douleurs musculosquelettiques sont une des raisons d'absences du travail. Celles-ci sont d'une durée moyenne de 17,5 jours ouvrables (mesures prises sur les 12 mois précédant l'enquête). Les trois quarts de ces absences sont d'une durée inférieure ou égale à 10 jours (76,4 %), or on note quand même que 7 % des absences liés à des douleurs musculosquelettiques sont d'une durée de plus de 60 jours. On retrouve, encore une fois, les douleurs liées aux membres supérieurs qui engendrent les plus longues absences avec une moyenne de 25,6 jours et 11,3 % d'entre elles sont supérieurs à 60 jours.

Il apparaît que, malgré ces taux non négligeables d'absentéisme en raison de douleurs musculosquelettiques liées au travail, peu de travailleurs ont fait une demande d'indemnisation auprès de la CNESST (auparavant CSST au moment de l'enquête). D'après l'enquête, seulement 13,3 % des travailleurs, qui se sont absentés en raison de douleurs musculosquelettiques partiellement ou complètement liées au travail, ont eu recours à une demande d'indemnisation à la CNESST. Ce pourcentage représente 32 000 personnes. Il est quand même mentionné dans l'étude que le nombre de demande d'indemnisation est sous-estimé car les travailleurs croyaient qu'ils n'étaient pas couverts ou que ce type de douleurs n'était pas couvert. Ce genre de sous déclarations des troubles musculosquelettiques est également mentionné dans d'autres études (Vergara, 2012; Vézina et al., 2011).

Dans une étude faisant le portrait montréalais de surveillance des TMS indemnisés entre 1998 et 2007 (Vergara, 2012), il est reporté que les TMS représentent environ 38 % des lésions professionnelles indemnisées et correspondent à plus de 40 % des coûts d'indemnisation versés par la commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail (CNESST). On retrouve dans cette même étude que les zones du dos et des membres supérieurs sont les plus affectées par les TMS avec, respectivement 56,7 % et 25,1 % de la totalité des TMS reportés.

Selon une étude menée par la CNESST, intitulée *Statistiques sur les lésions attribuables aux troubles musculosquelettiques (TMS) en milieu de travail entre 2015 et 2018*, le nombre total de dossiers ouverts semble augmenter d'année en année. Néanmoins, la proportion de dossiers acceptés ne semble pas suivre la même courbe et aurait même tendance à diminuer, même si le nombre de dossiers acceptés augmente (Tableau 1.1).

Tableau 1.1: Nombre et % de dossiers ouverts et acceptés, selon l'indicateur de lésion TMS et l'année d'inscription du dossier. (Commission des normes, 2019)

Indicateur de lésion TMS	2015		2016		2017		2018		Variation 2017-2018	
	Nombre	%	Nombre	%	Nombre	%	Nombre	%	Écart	Variation
Oui	25 559	29,2%	25 993	28,7%	28 539	29,7%	28 225	27,3%	-314	-1,1%
Non	62 059	70,8%	64 421	71,3%	67 596	70,3%	75 181	72,7%	7 585	11,2%
Total	87 618		90 414		96 135		103 406		7 271	7,6%

Comme expliqué plus haut, l'usine de Héroux-Devtek Inc. à Longueuil est spécialisée dans la remise à neuf de composantes de train d'atterrissage d'aéronefs variés, ce qui la place dans la catégorie « fabrication de matériel de transport » selon le système de classification des industries de l'Amérique du Nord (SCIAN). Or, la précédente étude présente également les statistiques selon le secteur SCIAN, et il apparaît que la « fabrication de biens non durables » (qui inclut la « fabrication de matériel de transport ») se classe 3^{ème} dans le nombre de dossiers ouverts et acceptés, avec 2889 dossiers en 2018 soit 10,2%. Elle se classe derrière les « Soins de santé et assistance sociale » et la « Fabrication de biens durables » (Figure 1.1).

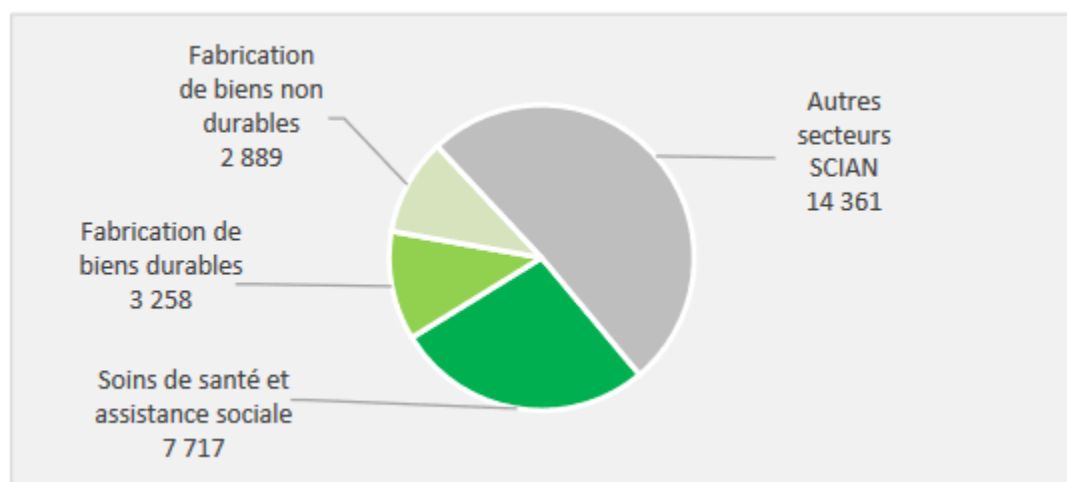


Figure 1.1: Top 3 : Nombre de dossiers TMS ouverts et acceptés, selon le secteur SCIAN, 2018. (Commission des normes, 2019)

Comme suggéré plus haut dans la définition et confirmé par diverses études (Bernard & Putz-Anderson, 1997; Daveluy, Pica, Audet, Courtemanche, & Lapointe, 2000; David, 2005; Vézina et al., 2011), les TMS apparaissent comme étant des maladies à caractères multifactoriels. Parmi ces facteurs, on retrouve tout aussi bien les facteurs physiques (Council, 2001; Putz-Anderson, 1988) que les facteurs psychosociaux ou encore les facteurs organisationnels (Bernard & Putz-Anderson,

1997; Vézina et al., 2011). On entend généralement par « facteurs physiques » les contraintes qui se réfèrent à la biomécanique tel que les postures contraignantes, la répétition des tâches, le travail statique, les efforts physiques, les vibrations (mains-bras ou globales) et les chocs mécaniques, la pression mécanique, le froid, etc (Agences de la santé et des services sociaux, 2015). Les facteurs organisationnels et psychosociaux réfèrent, quant à eux, à la demande psychologique du travail, le soutien social, la tension au travail, la reconnaissance, les horaires, la cadence, etc. On parle ici des dimensions de l'organisation du travail pouvant avoir un impact pathogène sur la santé des travailleurs (Vézina et al., 2011). Les possibles combinaisons de ces facteurs de risque pendant une situation de travail viennent à fortement favoriser l'apparition des TMS.

Parmi les TMS on retrouve notamment les syndromes des vibrations mains-bras (SVMB) (Hand-arm vibration syndrome ou HAVS en anglais). Ces syndromes représentent une catégorie à part entière. Les VMB sont définies comme étant le transfert de vibrations depuis un outil vers la main et le bras d'un travailleur. Ces vibrations sont caractérisées par le niveau d'accélération généré par l'outil, lorsqu'il est maintenu par le travailleur et en utilisation. Les vibrations sont généralement mesurées à partir de la poignée de l'outil pendant une phase d'utilisation pour ainsi déterminer les niveaux d'accélération transférés à l'opérateur (Bernard & Putz-Anderson, 1997). L'unité typiquement utilisée, pour caractériser ces niveaux de vibrations, est le m/s^2 . Les effets de ces vibrations sont maintenant connus depuis que Loriga, a en 1911, identifié un lien entre l'exposition aux vibrations et les « spasmes vasculaires » des doigts, observés chez des mineurs utilisant des outils pneumatiques (Boileau & Turcot, 2004). On sait maintenant que l'exposition aux vibrations peut provoquer l'apparition de syndromes. Ces derniers peuvent être localisés sur différentes régions comme le système vasculaire, le système neurologiques ou encore le système musculosquelettiques (Carra, Monica, & Vignali, 2019; Vihlborg, Bryngelsson, Lindgren, Gunnarsson, & Graff, 2017).

En ce qui concerne les atteintes au système vasculaire, on parle plus couramment du syndrome de Raynaud (ou phénomène de Raynaud) ou encore du phénomène des doigts blancs. Les premiers signes de manifestation de ce syndrome sont des engourdissements au niveau des doigts. Cela peut mener ensuite à un blanchissement des doigts lors des expositions au froid, de la cyanose ou même, dans des cas rares, des nécroses partielles au niveau du bout des doigts (Taylor, 1985). Les perturbations liées au système nerveux, quant à elles, peuvent se manifester de sorte qu'on observe des engourdissements ou une perte de sensation ou de dextérité, particulièrement au niveau de la

main ou des doigts (Taylor, 1985). Finalement, les atteintes musculosquelettiques apparaissent au niveau des os et des articulations sous forme de douleurs, raideurs, diminution de la force de préhension au niveau de la main, et limitations des articulations des membres supérieurs (Taylor, 1985) (Tableau 1.2). Ces atteintes sont également accompagnées, dans de nombreux cas, par le syndrome du tunnel carpien.

Tableau 1.2: Nombre et % des dossiers TMS ouverts et acceptés, selon la nature de la lésion et l'année d'inscription du dossier. (Commission des normes, 2019)

Nature de la lésion	2015		2016		2017		2018	
	Nombre	%	Nombre	%	Nombre	%	Nombre	%
1. Entorse, foulure, déchirure	20 590	80,6%	20 405	78,5%	22 036	77,2%	21 829	77,3%
2. Tendinite	2 681	10,5%	3 384	13,0%	4 031	14,1%	4 074	14,4%
3. Épicondylite, épitrochléite	513	2,0%	584	2,2%	749	2,6%	748	2,7%
* Bursite	174	0,7%	207	0,8%	250	0,9%	232	0,8%
* Lombalgie, lumbago	406	1,6%	224	0,9%	195	0,7%	221	0,8%
* Douleur	234	0,9%	156	0,6%	179	0,6%	148	0,5%
* Syndrome du canal carpien	132	0,5%	129	0,5%	146	0,5%	128	0,5%
* DIM (déplacement intervertébral mineur)	75	0,3%	72	0,3%	108	0,4%	124	0,4%
* Hernie discale	108	0,4%	135	0,5%	137	0,5%	115	0,4%
* Ténosynovite (incluant de Quervain)	113	0,4%	116	0,4%	110	0,4%	108	0,4%
* Sciatalgie, lombo-sciatalgie	109	0,4%	66	0,3%	110	0,4%	96	0,3%
* Blessures aux muscles, tendons, etc., nca	36	0,1%	119	0,5%	111	0,4%	52	0,2%
* Capsulite	21	0,1%	26	0,1%	34	0,1%	40	0,1%
* Synovite	16	0,1%	45	0,2%	22	0,1%	36	0,1%
* Spasmes	19	0,1%	29	0,1%	32	0,1%	34	0,1%
* Rhumatisme, sauf le rachis (dos)	33	0,1%	35	0,1%	50	0,2%	29	0,1%
* Cervicalgie	56	0,2%	45	0,2%	42	0,1%	28	0,1%
* Dorsalgie	60	0,2%	40	0,2%	30	0,1%	24	0,1%
* Syndrome de Raynaud (doigts blancs)	17	0,1%	26	0,1%	18	0,1%	24	0,1%
* Myosite	10	0,0%	18	0,1%	15	0,1%	17	0,1%
* Syndrome de la coiffe des rotateurs	14	0,1%	14	0,1%	52	0,2%	17	0,1%
* Myalgie, fibromyalgie	12	0,0%	8	0,0%	11	0,0%	11	0,0%
* Autres natures ou inconnue	130	0,5%	110	0,4%	71	0,2%	90	0,3%
Total	25 559	100%	25 993	100%	28 539	100%	28 225	100%

Il est clairement établi dans la littérature, que la composante d'intensité des vibrations ainsi que la durée d'exposition sont des facteurs de risques très importants en ce qui concerne les troubles vasculaires (Vézina et al., 2011; Vihlborg et al., 2017), les manifestations de problèmes nerveux au niveau des mains ou des doigts (Vihlborg et al., 2017) et les apparitions du syndrome du tunnel carpien (Bernard & Putz-Anderson, 1997). Néanmoins, il n'existe pas de corrélation avec la gravité des symptômes observés (Nilsson, Burström, & Hagberg, 1989), de même qu'il n'y a pas de clair lien entre quelle composante de vibration (ex., fréquence, durée, intensité) affecte quel système ou quel sens.

D'après (Vihlborg et al., 2017), Il existerait seulement une faible corrélation entre l'exposition aux vibrations et l'apparition de TMS. D'autre part, il stipule également qu'il y a une très forte relation entre les outils vibrants et l'apparition de TMS. L'hypothèse faite est que les TMS n'apparaissent

pas que à cause de l'exposition aux vibrations mais à cause d'un ensemble de combinaisons de plusieurs facteurs (ceci inclut les facteurs ergonomiques et psychosociaux). On retrouve à travers une autre étude que les outils vibrants sont aussi la cause d'apparition de symptômes vasculaires ou nerveux (Greenslade & Larsson, 1997). Ces mêmes études assurent que les symptômes peuvent être réversibles moyennant une absence totale d'exposition aux vibrations et une détection prématurée.

Dans la littérature, il apparaît que la combinaison exposition aux vibrations avec les facteurs ergonomiques, les facteurs physiques, tel que le travail statique, la charge de travail, les postures extrêmes et les facteurs psychosociaux, comme la monotonie, le niveau de support social et l'insatisfaction au travail, augmentent l'apparition de troubles nerveux et de syndrome du tunnel carpien (Burdorf, Van Der Beek, & health, 1999; Council, 2001; Vihlborg et al., 2017). Cependant les corrélations entre les facteurs physiologiques et l'apparition de troubles vasculaires, neurologiques ou musculosquelettiques sont controversées. Le poids corporel n'apparaît pas comme un facteur de risque mais l'âge semble être un facteur ayant une influence (Bernard & Putz-Anderson, 1997). Néanmoins il est possible que ce facteur soit confondu avec d'autres, notamment avec la durée d'exposition cumulée (Pelmear, Taylor, Wasserman, & Fletcher, 1993).

Les études apparaissant dans la littérature (Burdorf, 2010; Silverstein & Clark, 2004) montrent qu'à ce jour, la stratégie la plus efficace pour lutter contre l'apparition des TMS chez les travailleurs est de réduire leur exposition aux facteurs de risques de TMS. On trouve, dans la littérature, une grande variété de méthodes pour évaluer l'exposition des travailleurs aux facteurs de risques de TMS dans une situation de travail. Néanmoins, il est évident de dire qu'une des principales causes de l'apparition des syndromes de vibrations mains-bras, est la source de vibrations. Celle-ci est généralement matérialisée par un outil de travail motorisé (pneumatique, thermique, électrique) et généralement maintenu à l'aide des mains. Récemment, des suggestions de méthodes visant à limiter l'exposition aux vibrations pour les activités comme l'ébavurage ou le polissage ont été proposées (Dong et al., 2020). Cette étude propose des pistes de réflexions pour des potentielles solutions pour des activités où la pièce est maintenue à la main, mais ne parle pas des situations où ce sont les outils qui sont tenus manuellement comme lors de l'ébavurage chez Héroux Devtek Inc.

Tout comme les méthodes d'évaluation, on trouve, dans le monde professionnel, un très large panel d'outils vibrants répondant à diverses tâches. Une étude montre qu'en 1983, le nombre d'outils

servant à polir ou poncer était estimé à plus de 300 000 avec 67 types différents, possédant des caractéristiques également différentes (Greenslade & Larsson, 1997). Malgré cette diversité et le risque que ces outils représentent pour les travailleurs, peu de constructeurs communiquent sur l'aspect ergonomique et vibratoire de leurs produits (Greenslade & Larsson, 1997; Reinvee, Aia, & Pääsuke, 2019; Rimell, Notini, Mansfield, & Edwards, 2008). Certains constructeurs affichent des niveaux de vibrations pris dans des conditions idéales, en laboratoire. Néanmoins, nulle part dans la littérature on trouve des valeurs de vibrations mesurées dans des conditions réelles de travail. Cela ralentit les industries dans leur but de réduire l'exposition aux vibrations en les empêchant de se faire un véritable avis sur les outils. Les vibrations engendrées par du polissage, du ponçage, du sablage ou encore de l'enlèvement de matière grâce à des outils maintenu à la main, font partie des industries de la fabrication depuis longtemps. C'est ainsi que les Troubles Musculo-Squelettiques (TMS) sont devenus un enjeu important dans une majorité de secteurs industriels.

Les taux de vibrations générés par ces mêmes outils sont influencés par divers paramètres tels que le type d'outils évidemment, son poids, le déséquilibre de l'abrasif (ou de l'outil qui y est fixé), s'il est en utilisation ou non, l'usure des pièces mobiles et la qualité du matériel de travail et de fixation. Il y a également des paramètres extérieurs à l'outil en lui-même qui peuvent affecter la transmission des vibrations. On trouve par exemple, parmi ces derniers, l'utilisation de gants de protection, les forces de préhension et de pression, les postures de travail, et le plus important, le niveau total d'exposition journalier (Greenslade & Larsson, 1997).

Plusieurs axes d'approches sont donc à travailler afin de réduire l'exposition aux vibrations : comme mentionné plus haut le premier axe est celui des vibrations à la source. Cette phase amène à choisir les « meilleurs » outils, ceux qui présentent les meilleures caractéristiques vibratoires et ergonomiques et à les associer avec les bons accessoires (poignée, rallonges, grip, outils et abrasifs, etc.). Le deuxième axe de travail est l'aspect contexte ergonomique de l'environnement de travail. L'étude de cet aspect permet de réduire la transmission des vibrations de la source vers les mains ou les bras par l'intermédiaire d'un poste bien conçu évitant toute posture contraignante. La qualité de l'environnement de travail au regard des poussières produites par l'enlèvement de matières de même que les conditions de températures et d'humidité doivent être pris en compte afin qu'ils ne produisent pas de facteurs de risque additionnels pour la santé des travailleurs. Le troisième et dernier axe, est au niveau organisationnel. Par le biais d'une organisation de travail repensée il est

possible de réduire le temps d'exposition aux vibrations. Cela peut se faire notamment par la rotation entre les postes ou par de la formation. (Carra et al., 2019; Cole et al., 2003; INRS, 2011)

1.3 Problématique

Lors de l'intervention de l'ergonome de l'équipe de santé au travail de CISSS de la Montérégie-Centre, Christiane Lemay, et de Dre Alice Turcot de l'INSPQ en 2017-2018, des mesures de vibration main-bras (VMB) ont été réalisées au moyen d'équipements de mesures prêtés par l'IRSST (Institut Robert Sauvé pour la recherche en santé et en sécurité du travail au Québec) (Lemay et al., 2018). Un ensemble de 19 tâches jugées représentatives ont fait l'objet de mesures. Des niveaux vibratoires très variables, dont certains allant jusqu'à 21 fois la valeur d'accélération maximale permise pour une exposition journalière selon les normes ont été mesurées, témoignant d'un risque certain lors de certaines activités pouvant se prolonger sur quelques heures durant la journée. Les niveaux élevés sont souvent liés aux plus longues rallonges ajoutées aux meuleuses, nécessaires pour réaliser le travail au fond d'un long cylindre.

Suite aux mesures de vibrations, des observations aux postes de travail et des entrevues avec les travailleurs ont aussi été réalisées au cours de l'intervention de 2017-2018 (Lemay et al., 2018). Les observations montrent que le travail d'ébavurage, de polissage et de finition requiert une grande minutie et précision sur des pièces de haute valeur à tolérances précises. Les opérations se font à l'aide de petits outils manuels pneumatiques à vitesse de rotation variable comme des meuleuses droites avec ou sans rallonge, ou extension et assiette, des meuleuses à angle, des polisseuses, etc. de différents manufacturiers : Dynabrade, Dotco, Atlas Copco, Snap-on. Chaque travailleur utilise une variété d'outils manuels pneumatiques « adaptés » selon la tâche à réaliser, ce qui évite d'avoir à les remonter selon l'opération. Les outils manuels pneumatiques seraient remplacés lorsque le travailleur insiste auprès de ses supérieurs.

Comme le travail est minutieux, il exige un contrôle visuel constant de sorte que les postures de travail sont généralement statiques ou quasi statiques (durant des périodes de durées variables allant de quelques minutes à plusieurs minutes) et très souvent contraignantes tant au niveau du tronc et du cou, que des membres supérieurs (épaules et poignets) (Lemay et al., 2018). Par exemple, lorsque le cylindre est de petit diamètre (ex., 9 cm), celui-ci est habituellement déposé à l'horizontale sur des supports en V fixés sur une table. Le travailleur assis sur une chaise doit fléchir fortement le tronc et le cou pour voir le fond du cylindre, soit là où l'outil travaille (ex., une brosse

métallique) et ce, tout en manipulant l'outil pneumatique à deux mains. Cette posture s'observe également avec des pièces de plus gros diamètres, lesquelles sont habituellement plus profondes. Lors de certains travaux, une force importante doit être appliquée sur l'outil (ex., corrosion importante au fond du cylindre ou retrait d'un excès de placage). Dans presque tous les cas d'utilisation des meuleuses droites, le poignet de la main droite (celle qui actionne l'outil) est en déviation cubitale extrême, ce qui entraîne systématiquement une élévation du coude droit (abduction de l'épaule) (l'axe longitudinal de l'outil est aligné avec celui de l'avant-bras). La main gauche quant à elle prend appui sur le devant de la meuleuse ou sur la rallonge qui y est fixée et ce, par le biais d'un cylindre de bois (poignée fait maison souvent appelée manchon) pour guider l'outil qui travaille au bout de la rallonge. La poigne de la main gauche doit être ferme pour assurer la précision du geste. La déviation cubitale du poignet droit est aussi observée lors de l'utilisation d'une meuleuse à angle utilisée pour des travaux sur la partie extérieure des cylindres. Ces postures contraignantes sont reconnues non seulement comme des facteurs de risques de TMS au dos et aux membres supérieurs (Council, 2001; Putz-Anderson, 1988), mais elles contribuent vraisemblablement à augmenter la transmission des vibrations aux structure musculo-squelettiques des membres supérieurs (Marcotte, Boileau, Rakheja, Aldien, & Boutin, 2006). En effet, une articulation à la limite de sa plage de mouvement (ex., déviation cubitale extrême du poignet) est souvent « bloquée » et donc plus rigide ce qui favorise la transmission des ondes vibratoires à travers les structures du membre supérieur ainsi couplées plus solidement. L'ensemble des facteurs de risque reliés au meulage des petites et grosses pièces, soit l'abduction de l'épaule (Figure 1.2), les mouvements répétitifs, la force de préhension et de poussée, les vibrations, la posture statique, les postures contraignantes du cou (Figure 1.3, Figure 1.4) et des poignets sont autant de facteurs de risques qui, seuls ou combinés, sont reliés au développement des lésions professionnelles telles que la tendinopathie de la coiffe des rotateurs, le syndrome du tunnel carpien, l'épicondylite (van der Molen et al., 2017). Rappelons qu'un travail de précision des doigts exige le maintien en statique de l'épaule pour l'exécution des tâches.



Figure 1.2: Position contraignante illustrant une abduction et flexion de l'épaule, une déviation du poignet droit, une flexion latérale et une torsion du cou. (Lemay et al., 2018)



Figure 1.3: Position contraignante illustrant une flexion latérale et une torsion du cou. (Lemay et al., 2018)



Figure 1.4: Position contraignante illustrant une abduction et flexion de l'épaule, une flexion avant/ latéral du dos, une flexion avant/ latérale et une torsion du cou. (Lemay et al., 2018)

Les observations et entrevues ont aussi montré une problématique de ventilation. En effet, les systèmes de ventilation locale actuels aux postes de travail ne permettent pas de toujours bien aspirer les poussières de métal, de matières ébavurées (ex., corrosion) et d'abrasif projetées par les outils lors du travail. Les travailleurs ont aussi rapporté un ensemble d'aspects rendant les travaux plus exigeants (Lemay et al., 2018).

On retrouve dans cet ensemble, le fait de faire des intérieurs de cylindres (train) et on note que la corrosion qui se trouve à l'intérieur est difficile à enlever. Cette corrosion doit être complètement enlevée tout en faisant attention à ne pas retirer trop de bonne matière. De manière générale, cette tâche demande de la force et d'autres facteurs peuvent la rendre encore plus difficile, comme par exemple la visibilité, qui est généralement réduite à l'intérieur du cylindre et encore plus quand l'espace est exigu. On a aussi des contraintes liées à la longueur de la rallonge utilisée sur l'outil, l'emplacement de la corrosion et son épaisseur, et, les rebords internes qui, quand présents, demandent plus de précision et d'effort de la part du travailleur.

Les activités d'ébavurage peuvent survenir un peu partout dans le processus de production et notamment après le placage. Il se peut que, pendant cette phase, trop de placage soit posé sur la pièce. Dans ce cas, l'ébavureur doit enlever le surplus de chrome. Ce dernier est un matériau très difficile à retirer et selon les travailleurs, il n'y aurait pas de possibilité de mieux faire le placage pour réduire cette étape.

On note quand même que ce sont les pièces en début de processus qui se trouvent être les plus difficiles. Il y a, sur ces dernières, plus de corrosion à enlever et plus de défauts à corriger que sur les pièces en fin de processus qui nécessitent généralement des retouches de finition.

Comme indiqué plus haut les pièces qui arrivent à l'ébavurage peuvent parvenir de plusieurs endroits. Elles peuvent venir du début de processus et sont ensuite envoyées soit au démontage, soit au sablage, soit à l'ébavurage dans le but d'enlever la corrosion avant d'être envoyées au placage.

Elles peuvent venir du placage car, comme expliqué plus haut, il arrive qu'il y ait des surplus de matière à enlever. Finalement, il se peut que des pièces viennent de l'assemblage pour subir des petites retouches qui sont généralement des tâches rapides et plus faciles. Après chaque retouche à l'ébavurage, beaucoup de temps est passé afin de s'assurer que cela correspond aux spécifications de la pièce.

En résumé, il ressort de l'intervention réalisée par Mme Lemay que la problématique comporte différents aspects inter-reliés et devant être traités en même temps :

- Vibrations main-bras (variable selon l'outil, la vitesse de rotation nécessaire, le type d'abrasif ou de brosse utilisé, la longueur de l'extension, la prise sur l'outil, les poignées rajoutées, etc.)
- Conception du poste de travail : conception et aménagement du dispositif de retenue de la pièce et positionnement des mains sur l'outil, en relation avec la posture de travail, les exigences de visibilité et les dimensions anthropométriques du travailleur.
- Conception d'un éclairage approprié de la zone à travailler, ainsi que d'un dispositif d'aspiration adéquat.

1.4 Objectifs

L'objectif général de ce projet de recherche est d'identifier, développer, puis tester différentes solutions permettant de réduire les facteurs de risques de TMS incluant ceux liés aux vibrations mains-bras à différents postes d'ébavurage chez Héroux-Devtek Inc.

Cet objectif général peut être divisé en sous-objectifs autour desquels s'articulera tout le projet. Ainsi les activités seront organisées autour de la norme ISO9241-210 (2010) décrivant un processus de conception centré sur l'opérateur humain.

L'étape de compréhension et de spécification du contexte d'utilisation est une phase pendant laquelle une bonne partie du temps est passé sur le terrain pour observer et interagir avec les travailleurs afin d'acquérir une excellente connaissance du travail tel qu'il est réalisé à l'heure actuelle. Elle vise à choisir les opérations à améliorer, à se familiariser avec le milieu de travail, les différents membres de l'équipe et la problématique exposée plus haut.

Il ressort de cette étape trois sous-objectifs principaux qui permettront d'apporter des éléments de réponses à la problématique. Ces sous-objectifs sont les suivants :

- 1- Développer des dispositifs permettant de réduire les VMB.
- 2- Aménager un poste ergonomiquement adéquat pour les tâches à effectuer.

Selon le document, *Surveillance des troubles musculo-squelettiques – Intervention en prévention des risques liés aux vibrations mains-bras* (Lemay et al., 2018), écrit à la suite d'une intervention

aux postes d'ébavurage chez Héroux-Devtek Inc., il apparaît que les niveaux de vibrations transmis par les outils représentent un problème majeur. Ainsi, de manière à aider les entreprises dans leur choix de matériel aux postes d'ébavurage, des mesures de vibrations sont réalisées sur plusieurs outils neufs, provenant de constructeurs différents. Ceci nous apporte donc un troisième sous-objectif :

- 3- Créer un premier jeu de mesures de vibrations en situations idéales (valeur de base) et en situations réelles (valeurs typiques) d'ébavurage.

CHAPITRE 2 DISPOSITIFS DE REDUCTION DES VMB

2.1 Introduction

Dans cette partie, on aborde les pistes explorées à travers le projet. On voit les prototypes essayés et le nouveau poste de travail imaginé en fonction des contraintes utilisateurs et des recommandations ergonomiques de santé et sécurité.

Essais libres

Selon le document, *Surveillance des troubles musculo-squelettiques – Intervention en prévention des risques liés aux vibrations mains-bras (Lemay et al., 2018)*, écrit à la suite d’une intervention aux postes d’ébavurage chez Héroux-Devtek Inc., nous pouvons voir que les tâches impliquant des rallonges ou autres extensions, présentent des niveaux de vibrations particulièrement élevés (Tableau 2.1).

Tableau 2.1: Exemple de mesures issues du rapport de Surveillance des troubles musculo-squelettiques – Intervention en prévention des risques liés aux vibrations mains-bras. (Lemay et al., 2018)

Type de mesure	Type d'outil	Ordre	Rallonge	Main	Abrasif	Condition Abr	Phase	a_{rms}
Terrain christiane	Dotco	1	oui (36po)	outil	roulette	use	1	6,31
Terrain christiane	Dyna	2	oui (24po)	outil	papillon	use	1	10,07
Terrain christiane	Dyna	3	oui (24po)	rallonge	papillon	use	1	4,04
Terrain christiane	Dotco	4	oui (68po)	collet/poignée	papillon	use	1	8,53
Terrain christiane	Dotco	5	oui (68po)	rallonge	papillon	use	1	107,44
Terrain christiane	Dotco	6	oui (68po)	bout de l'outil	papillon	use	1	24,70
Terrain christiane	Dyna	1	non	outil	papier carton	use	1	37,03
Terrain christiane	Dyna	2	non	outil	papier carton	use	1	1,21
Terrain christiane	Atlas	3	non	outil	papier carton	use	1	3,06
Terrain christiane	Atlas	4	non	outil	papier carton	use	1	3,08
Terrain christiane	Dotco	5	non	outil	roulette	use	1	3,53

On voit à travers ce tableau qu'en moyenne, les rallonges ont des valeurs de vibrations supérieures à celles des outils droits. On remarque notamment la valeur 107,44 m/s² se démarque des autres. Pour remettre dans le contexte, pour respecter les normes d'exposition aux vibrations, qui stipule que le seuil d'action est de $A(8) = 2,5 \text{ m/s}^2$ (la limite est à $A(8) = 5 \text{ m/s}^2$) (INRS, 2019), cette combinaison ne peut être utilisée que pendant 15 secondes, sinon le seuil d'exposition sera dépassé et des atteintes à la santé pourraient apparaître.

$$A(8) = a_{rms} * \left(\frac{T}{8}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$T = \left(\frac{A(8)}{a_{rms}}\right)^2 * 8$$

$$T = \left(\frac{2,5}{107,44}\right)^2 * 8 = 15,6 \text{ s}$$

Selon les superviseurs ainsi que les opérateurs, les tâches impliquant des rallonges représentent environ 30% à 40% de l'activité totale des travailleurs à l'ébavurage. C'est pourquoi nous nous sommes focalisés pendant quelques mois sur comment réduire les niveaux de vibrations sur ces tâches.

Il est à noter que, dépendamment du travailleur, il existe plusieurs méthodes de travail. Certains utilisent un guide en bois (ou manchon) fait maison, d'environ 10 cm de long (Figure 2.1), contrôlé par la main ne tenant pas l'outil, dans le but d'orienter l'abrasif de manière précise et d'appliquer de la force si nécessaire. D'autres utilisent un gant de protection, qui leur permet de faire exactement la même chose qu'avec le guide en bois. Dans ces deux cas, l'accessoire présent assure la non-transmission de la chaleur qui peut se créer par friction de la main avec la tige. Certains opérateurs n'utilisent aucun équipement, simplement par confort. Ils tiennent donc très peu de temps la tige fermement, et appliquent de la pression par petits coups dans le but d'éviter la création de chaleur.



Figure 2.1: Manchon en bois

2.2 Méthodologie

Dans l'optique de diminuer les niveaux de vibration perçus par les travailleurs, lors d'activités d'ébavurage impliquant l'utilisation de rallonges ou d'extensions, plusieurs idées ont été creusées suite à 3 réunions assises avec 3 travailleurs et des rencontres hebdomadaires avec 3 outilleurs d'expérience (10 années d'expérience pour tous les intervenants). A la suite de ces idées, des prototypes ont été conçus, fabriqués puis testés en interne. Étant donné qu'il semble impossible de diminuer les niveaux de vibrations générés par les outils eux-mêmes, dû au fait que ces derniers sont difficilement modifiables et que toute modification pourrait affecter la fiabilité et la durabilité des outils, l'idée principale est donc de dévier les vibrations créées par le déséquilibre de l'abrasif et la rallonge, avant que celles-ci atteignent les mains et bras du travailleur. De plus, l'entreprise ne peut pas se permettre de faire le travail du manufacturier ni de d'altérer la fiabilité des outils étant donné leur prix.

4 prototypes mécaniques, pour contrer les vibrations engendrées par le déport des rallonges, ont été développés, puis testés. Des mesures ont été faites et les commentaires et les ressentis du travailleur ont été récoltés (un seul travailleur a participé aux tests, il possède plus de 15 années d'expérience). Ces prototypes ont été créés en fonction des exigences utilisateur et donc répondent correctement aux méthodes à utiliser pour effectuer les tâches (par exemple : diamètres adaptés

pour pouvoir rentrer dans la pièce, forme idéale pour une bonne prise en main). Ces prototypes se placent autour de la tige et servent à son guidage à l'intérieur de la pièce à traiter. Le but est d'utiliser les propriétés mécaniques de ces prototypes pour absorber ou dévier les vibrations engendrées par les outils.

2.3 Résultats / Discussion

Le premier prototype (Figure 2.2) est simplement inspiré du manchon en bois couramment utilisé. C'est un tube en aluminium d'environ 40 cm (environ 15 po), doté de deux roulements (un à chaque extrémité) pour assurer un bon guidage et éviter que la rallonge vibre librement. Ces roulements laissent quand même la possibilité au guidage de glisser selon l'axe longitudinal car ils ne sont pas montés en force (« slight fit » est le terme utilisé en industrie). L'idée derrière ce prototype est de voir si les roulements peuvent dévier une partie des vibrations qui passent dans la rallonge avant que ces dernières ne remontent dans l'outil puis dans la main de l'opérateur. Le but est de répartir la charge vibratoire (à défaut de pouvoir l'éliminer). Cela ouvrirait également des pistes à des supports qui pourraient remplacer la main qui guide la rallonge.

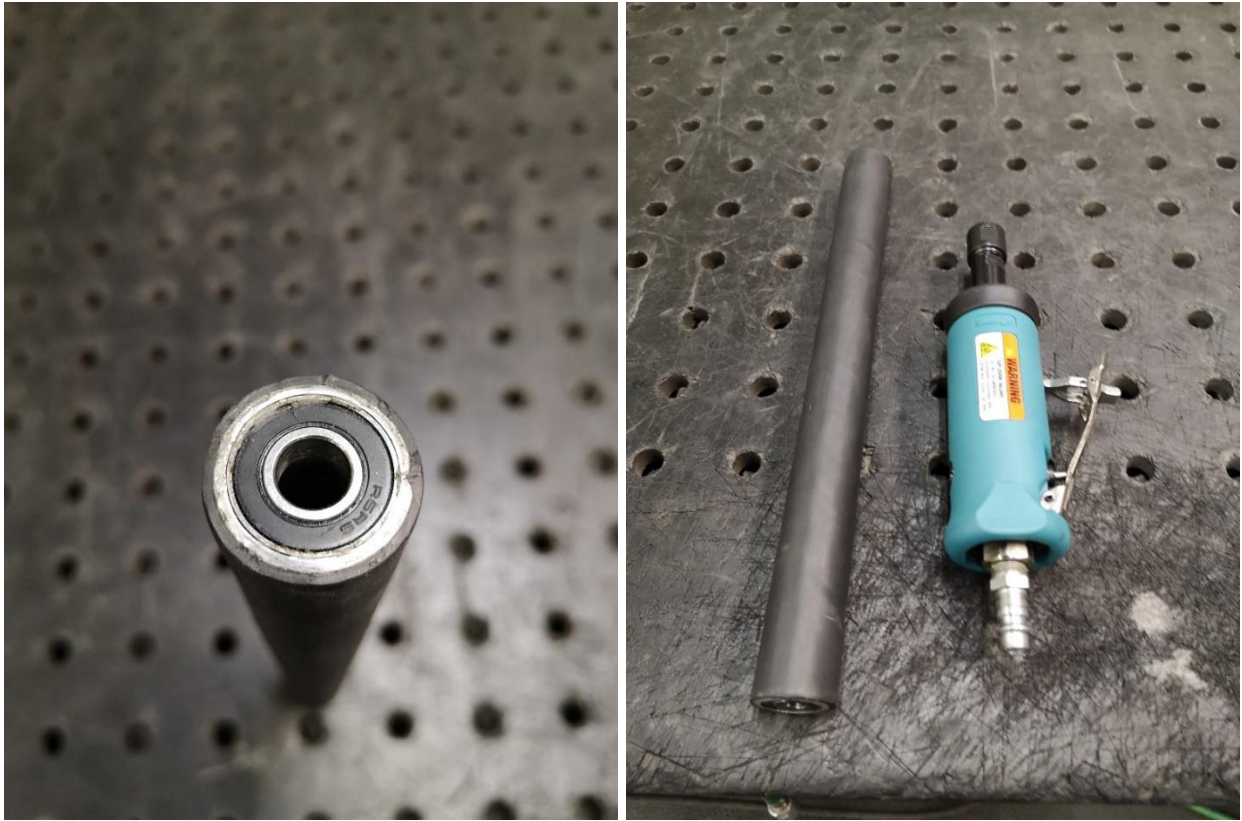


Figure 2.2: Prototype 1

Le prototype a été testé avec les outils et les abrasifs personnels de l'opérateur. Les essais ont été faits sur une partie d'un train d'atterrissage appelée « piston de main C130 ». Cette pièce peut nécessiter tous les types de corrections, que ce soit du polissage extérieur, de la rectification, de l'enlèvement de points de corrosion ou en encore, des tâches sur la partie intérieure du cylindre. Les mesures ont été prises avec l'appareil HVM100 configuré pour la mesure de vibrations sur des outils.

Les observations faites durant l'utilisation de ce prototype lors d'essais sur une pièce prévue pour ce genre d'essais, sont que les roulements (« bearings ») sont des sources de contraintes mécaniques et amplifient, dans certaines conditions, la sensation de vibration. On remarque également que le guidage se fait mal étant donné que les roulements sont en contact avec la rallonge qui, elle-même, vibre et se déforme sous l'effet de la rapide rotation de l'outil. L'opérateur ressent la sensation de résistance au déplacement dans l'axe longitudinal. C'est une sensation qu'il ne ressent pas habituellement avec le manchon en bois.

En ce qui concerne les vibrations, elles sont dans certaines conditions réduites (Figure 2.3) et dans d'autres amplifiées (Figure 2.4). Il n'est pas possible de contrôler ces conditions car trop de paramètres sont en jeu.

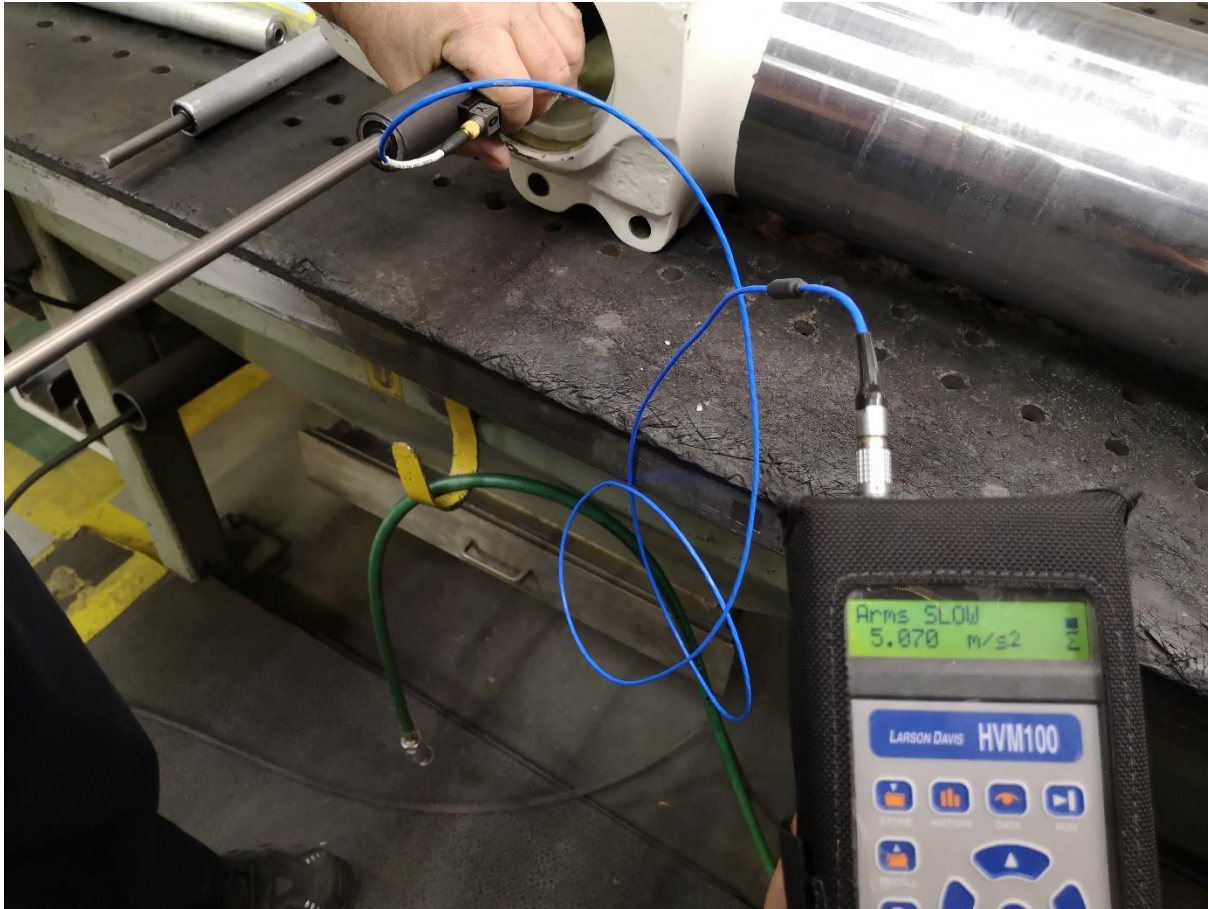


Figure 2.3: Cas de vibrations atténuées

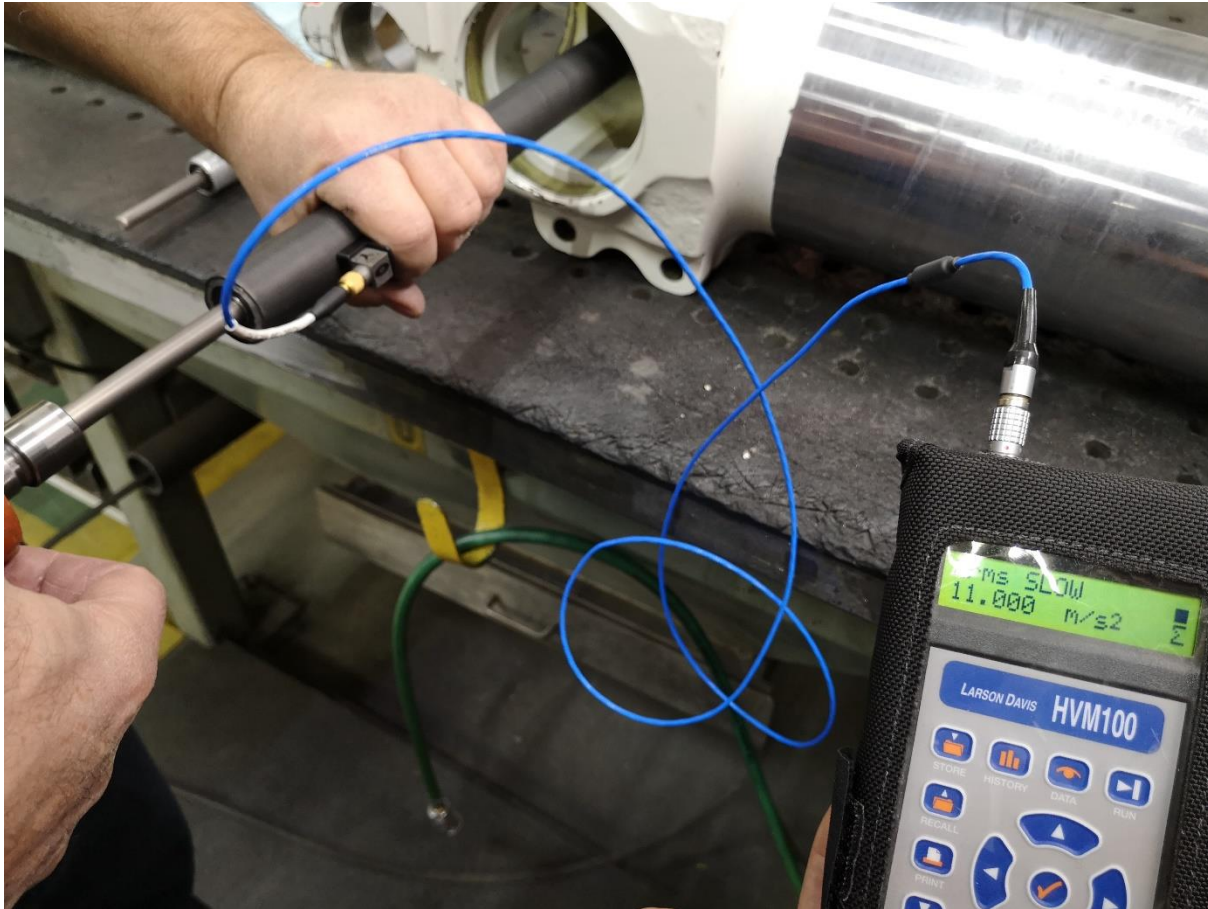


Figure 2.4: Cas de vibrations élevées

Le deuxième prototype (Figure 2.5), inspiré du premier, est toujours un tube en aluminium qui fait la même longueur que la rallonge afin de contrer le problème de glissement. Les roulements, posés aux deux extrémités, sont montés en force (« press fit » est le terme utilisé en industrie) sur la rallonge. Cela veut dire qu'ils sont fixés à un unique endroit sur la rallonge et ne permettent pas le glissement dans l'axe longitudinal. Dans ce cas, c'est la main de l'opérateur qui glisse autour du guidage pour ajuster la position.

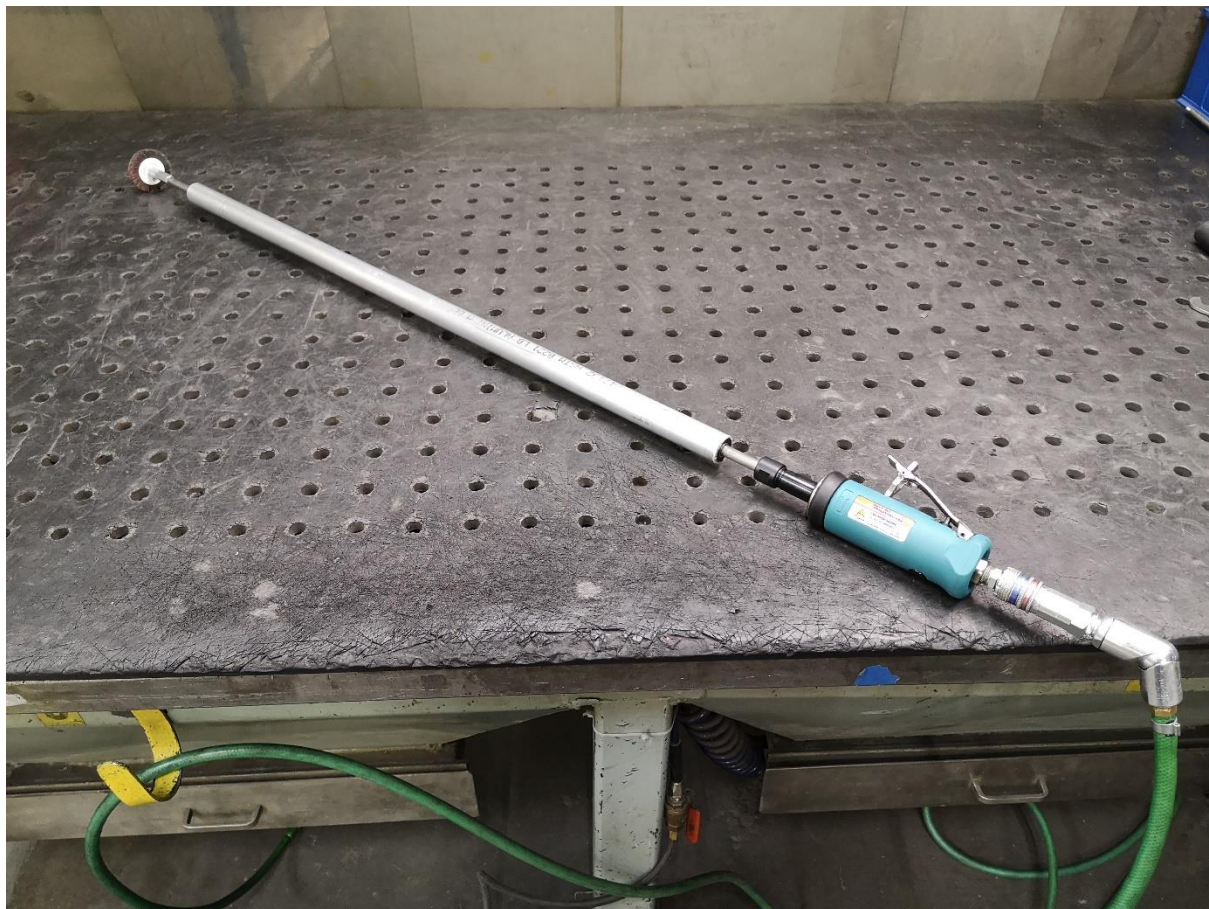


Figure 2.5: Prototype 2

On observe sur ce prototype que les roulements restent des potentielles sources de contraintes mécaniques même si le fait qu'ils soient montés en force (« press fit ») sur la rallonge procure à l'opérateur, une sensation d'amélioration par rapport au prototype précédent. Sur ce prototype, seules des mesures subjectives ont été réalisées, les commentaires et les sensations de l'opérateur ont été relevés. On note que l'opérateur dit percevoir plus de vibrations sur sa main qui guide la rallonge que sur celle qui tient l'outil. On peut assumer que les vibrations ont été déviées par les roulements et le guidage mais elles n'ont pas été éliminées.

Le troisième prototype (Figure 2.6) est une adaptation du deuxième, il consiste à venir poser et fixer le guide sur un support pour voir si les vibrations peuvent être déviées autre part que dans la main de l'opérateur. L'idée est de voir si les vibrations peuvent être déviées dans le sol constitué de caoutchouc. Ce prototype est une idée exploratoire et son utilisation ne permet pas de refléter exactement le travail réalisé habituellement dû aux contraintes de mouvements qu'il engendre. En

effet, l'installation visible sur la Figure 2.6 montre l'impossibilité de mouvoir l'outil dans n'importe quelles directions.



Figure 2.6: Prototype 3

Sur ce prototype, seules des mesures subjectives ont été réalisées, les commentaires et les sensations de l'opérateur ont été relevés. Avec cette combinaison, nous avons remarqué que les vibrations étaient transmises au sol et que l'opérateur ressentait les vibrations par les pieds et les jambes. L'opérateur a qualifié cette sensation « désagréable » et « inhabituelle ». Néanmoins, les vibrations sur la main outil sont toujours présentes. Cette piste pourrait être plus exploitée étant donné qu'en 2020, une étude a montré qu'il était possible de quantifier l'absorption des vibrations par un support, dans un autre contexte (Dong et al., 2020).

Le problème de ce dispositif est que les mouvements de la rallonge sont très limités par la fixation. En effet, aucun mouvement n'est permis avec ce prototype (aucune rotation ni translation possible). Pour rendre ce prototype fonctionnel dans des conditions normales d'utilisation alors il faudrait

trouver un moyen pour que la jonction entre le support et la rallonge permette au moins une translation et deux rotations.

Le quatrième prototype (Figure 2.7, Figure 2.8) est semblable au premier mais il est doté de plomb, un matériau qui permet d'absorber les vibrations en résonnant en opposition de phase avec le signal reçu. Le diamètre de ce prototype est plus grand que les autres et pèse également plus lourd (0,64 kg pour ce prototype contre 0,34 kg pour le prototype 1. Le prototype 2, bien plus grand que les deux autres, pèse 0,74 kg tige incluse).



Figure 2.7: Prototype 4

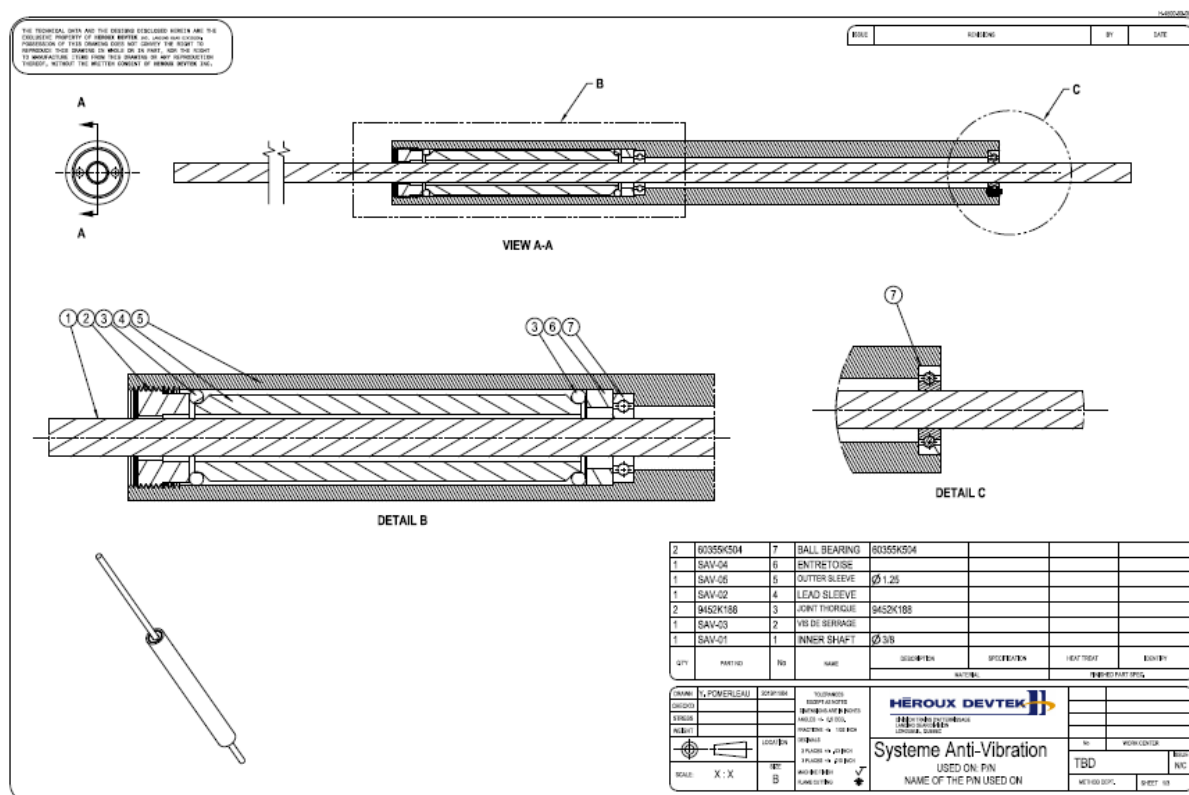


Figure 2.8: Mise en plan prototype 4

Ce prototype a montré, pour certaines conditions d'utilisation, des résultats très prometteurs (Figure 2.9, Figure 2.10) avec des valeurs parfois divisées par 3 par rapport aux autres prototypes et au manchon en bois. Mais trop de paramètres sont impliqués pour pouvoir stabiliser les conditions dans lesquels le prototype permet de réduire de façon significative les niveaux de vibrations. On remarque que les résultats peuvent dépendre de la pression d'air donnée par l'opérateur à l'outil, de la position du guide sur la rallonge, ainsi que de la force exercée sur la pièce. Ces trois paramètres sont très difficiles à contrôler même individuellement.

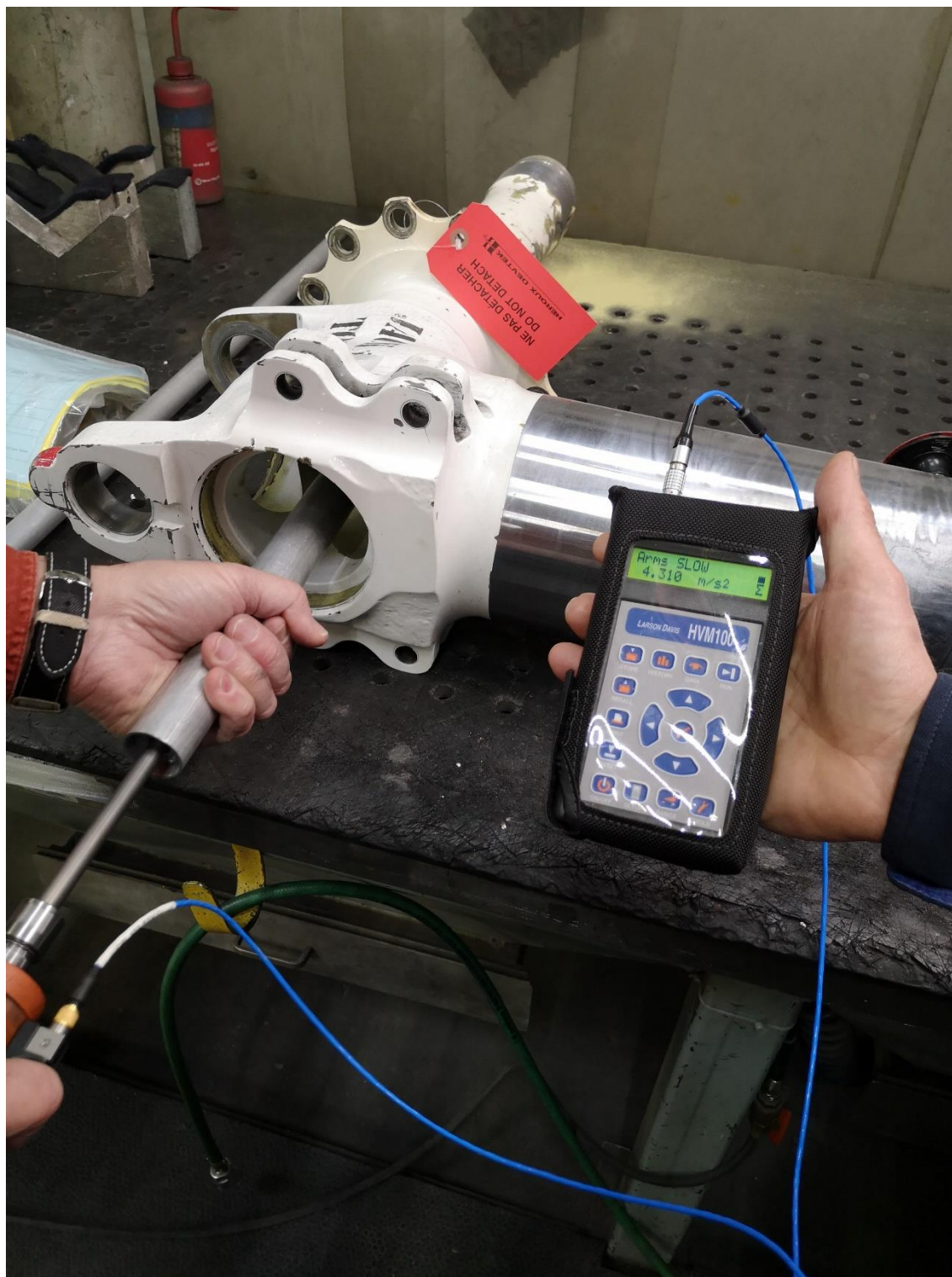


Figure 2.9: Mesures prometteuses sur la main outil du prototype 4

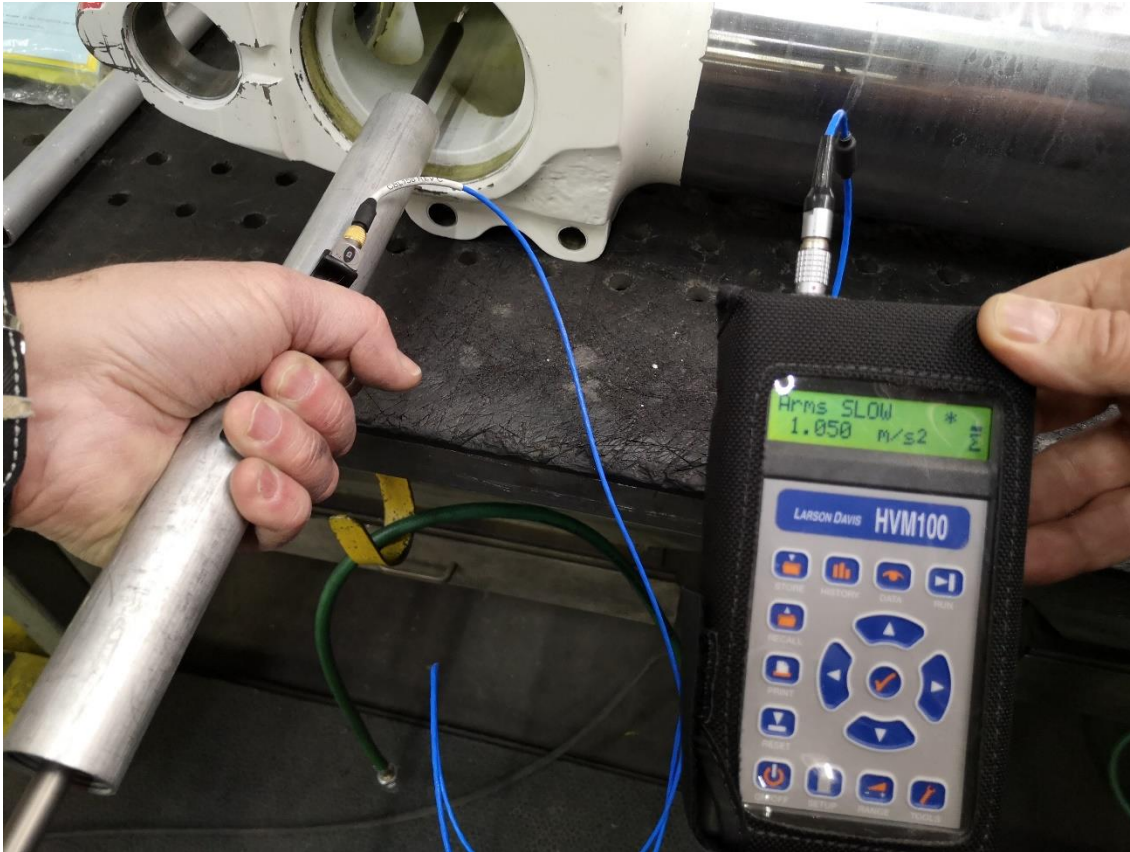


Figure 2.10: Mesures prometteuses sur la main rallonge du prototype 4

Lors de la phase de test, ces prototypes ont été testés en association avec différentes marques d'outils. Beaucoup de choses sont à retenir de ces tests, même si le problème de vibration n'est pas encore résolu. Plusieurs observations intéressantes ont pu être faites. Celles-ci sont appuyées par des mesures informatives de vibrations, aucun test systématique n'a été fait avec ces combinaisons.

- Observation 1 : nous avons été capable de dévier certaines vibrations par le biais de guidage sur les rallonges. Néanmoins ces vibrations sont toujours perçues par l'opérateur par l'intermédiaire de son bras guide.

- Observation 2 : les guidages avec des roulements à billes ("bearings") seuls ne sont pas efficaces pour atténuer les vibrations. Ils sont sources de contraintes (rendant difficile le glissement de la tige sur l'axe longitudinal de la pièce), transmettent les vibrations, et peuvent être sources de résonnances. En effet, les vibrations reçues de la rallonge sont transmises dans les roulements, les billes se mettent à vibrer et le tout est transmis aux mains de l'opérateur.

- Observation 3 : les matériaux anti-vibration comme le plomb, couplés à un guidage autour des rallonges/tiges, montrent des résultats prometteurs à exploiter. Dans certaines conditions

d'utilisation, les niveaux de vibrations ont pu être divisés par 3. Malheureusement ces conditions d'utilisation varient rapidement et l'atténuation des vibrations n'est donc pas toujours constante. A l'image des Figure 2.9 et Figure 2.10, on voit que les conditions sont vite changeantes et que seul le fait de déplacer le prototype fait varier les niveaux de vibration. Les conditions changent rapidement en raison du nombre de paramètres impliqués (vitesse de rotation, position du guidage, force exercée sur la pièce, type d'abrasif...). Mais cette piste reste encourageante et dans le cas où les conditions d'utilisation peuvent être contrôlées alors les résultats pourraient se stabiliser.

CHAPITRE 3 POSTE DE TRAVAIL

3.1 Introduction

Toujours dans l'objectif de répondre aux différents problèmes identifier lors de l'intervention de 2018 (Lemay et al., 2018), le poste de travail est un élément à améliorer, qui peut notamment entraîner des postures contraignantes s'il est mal conçu (Figure 3.1, Figure 3.2, Figure 3.3, Figure 3.4). On remarque dans le rapport fait à la suite de l'intervention de 2018, que pour la plupart des tâches étudiées on retrouve un problème de posture. Ce dernier se localise généralement au cou, au dos, aux épaules aux coudes, aux poignets et aux mains/doigts. Ces postures ont également été identifiées lors de la phase d'observation en début de projet. Ce paramètre est d'autant plus important car c'est un facteur aggravant en ce qui concerne les TMS et peut également être un facteur d'amplification des vibrations.



Figure 3.1: Abduction et flexion de l'épaule, flexion avant/ latéral du dos, flexion avant/ latérale et torsion du cou. (Lemay et al., 2018)



Figure 3.2: Abduction et flexion de l'épaule, flexion avant/ latéral du dos, flexion avant/ latérale et torsion du cou. (Lemay et al., 2018)



Figure 3.3: Abduction et flexion des épaules, flexion du dos, flexion avant/ latérale et torsion du cou. (Lemay et al., 2018)



Figure 3.4: Abduction et flexion des épaules, déviation du poignet droit, flexion latérale et torsion du cou. (Lemay et al., 2018)

Les tests ont été réalisés sur le même poste de travail que pendant l'intervention de Christiane LEMAY et Alice TURCOT, qui a eu lieu en 2018 (Figure 3.5). C'est un poste de travail fixe, non ajustable en hauteur sur lequel les opérateurs travaillent assis ou debout selon leur préférence. Les opérateurs apportent les pièces sur le plan de travail à l'aide d'un pont roulant la plupart du temps. Lorsque les pièces sont jugées « relativement légère », ils se permettent de les apporter à la force des bras.

Les pièces sont ensuite posées sur le plan de travail sur lequel se trouve un revêtement en caoutchouc pour éviter d'abimer les pièces. Ce même revêtement est muni de trous pour que les poussières résiduelles créées lors de l'ébavurage tombent dans les bacs de récupération ou soient aspirées par le système d'aspiration. Les bacs de récupération récupèrent les « grosses poussières » qui sont trop lourdes pour être aspirées par le système d'aspiration et sont vidés régulièrement. Les montants font également partie du système d'aspiration et servent à attraper les poussières légères. Le système d'aspiration à ce poste est classé comme aspiration sèche, c'est-à-dire que les particules de poussières ne sont pas aspergées d'eau pour être refroidies, mais cela veut aussi dire que toutes les poussières ne peuvent pas passer dans l'aspiration (notamment les « grosses poussières ») et doivent être récupérées.

Sous leurs pieds se trouve un revêtement absorbant pour le confort car il est possible que les travailleurs soient dans une position debout pendant une longue période de temps.



Figure 3.5: Poste de production actuel

3.2 Méthodologie

En s'appuyant sur les recommandations du rapport de *Surveillance des troubles musculo-squelettiques - Intervention en prévention des risques liés aux vibrations mains-bras*, du document guide : TMS – Idées de prévention pour les meuleurs et les polisseurs (St-Jacques & Ross, 2018), et des exigences et idées des travailleurs, nous avons pu commencer la conception d'un nouveau modèle de poste de travail. Ainsi après 3 rencontres avec les travailleurs et le comité Santé et Sécurité nous avons dressé la liste des idées :

- Poste de travail facilement ajustable
 - Garder la tête et le dos à la verticale
 - Les bras doivent être le plus près du corps
 - Un poste multiniveau permettrait d'ajuster la hauteur en fonction des dimensions des pièces tout en gardant une posture moins contraignante.
- Possibilité de tourner autour de la table
- Possibilité d'orienter la pièce dans n'importe quelle position

Une fois les idées réorganisées et validées par le comité Santé et Sécurité, nous avons pu faire une liste des spécifications indispensables que doit rencontrer ce nouveau poste. On retrouve parmi cette liste les items suivant :

- Ajustable en hauteur à l'aide d'un système motorisé.
 - Ce critère permet d'ajuster la position pour garder la tête et le dos à la verticale et répond au poste multiniveau recommandé dans le rapport de *Surveillance des troubles musculo-squelettiques - Intervention en prévention des risques liés aux vibrations mains-bras*.
- Avoir une zone aspirante qui couvre complètement la zone de travail.
 - Cela permettrait de rapprocher la pièce du bord de la table et ainsi garder les bras plus près du corps
- Avoir un espace pour les genoux bien dimensionné pour donner la possibilité de travailler en position assise.

- Avoir un plateau central rotatif pour éviter la sur-manutention, et ainsi permettre de diminuer les risques d'abimer les pièces.
 - Étant donné que l'environnement de travail ne permet pas aux travailleurs de tourner autour de la table, c'est donc la pièce qui pourra tourner sur elle-même. Ce système permet une seule rotation.
- Garder un type d'aspiration sèche qui peut se raccorder au système actuellement présent.

3.3 Résultats / Discussion

Après avoir démarché les fournisseurs potentiels et fait notre choix, nous avons pu commencer à évaluer et valider les modèles de conception que ce dernier nous proposait. L'aspect général du nouveau poste a été repris du précédent, ce qui permet de respecter les contraintes de dimensions et d'espace imposées par l'environnement de travail.

Les pieds de la table sont dotés de vis sans fin, qui sont entraînées deux à deux par des tiges horizontales passant dans l'armature de la table. Ces tiges sont elles-mêmes reliées à une courroie qui est entraînée par un moteur électrique. Celui-ci permet de faire monter et descendre la table à une vitesse de 10 mm/sec. La table peut s'ajuster entre les hauteurs suivantes : 65 cm en position basse et 100 cm en position haute. Le moteur permet une variation d'un peu plus de 30 cm (environ 12 pouces). Ces positions ont été déterminées en assumant que le travail fait à l'ébavurage peut être considéré comme un « travail léger » car ils ont souvent besoin d'objets et d'espace pour manipuler mais n'utilise pas le poids du haut du corps pour fournir un effort. Ainsi, la hauteur du plan de travail (surface de la table) doit se situer 5 à 10 cm plus bas que la hauteur de coude (Bleau, 2005). La hauteur de coude debout moyenne chez l'homme étant de 107 cm, et la hauteur des pièces étant de 15-20 cm, il est donc idéal d'avoir un poste de travail centré autour de 80 cm de haut ($h = 107 - 10 - 20 = 77$ cm). La plage de 30-35 cm de marge est le maximum que le moteur puisse offrir. Cette plage permet de faire varier la hauteur du poste tout en acceptant les variations de hauteur de coudes des opérateurs et les variations de hauteur des pièces. L'action de monter/descendre est choisie à l'aide d'un interrupteur, puis, le mouvement est donné par la pression sur les 2 boutons de la commande bimanuelle disposée à côté de la table.

Le choix d'une commande bimanuelle a été fait au regard des recommandations données par le département santé et sécurité. D'autres éléments ont été rajoutés pour assurer la sécurité du poste pendant la mise en mouvement de la table. On retrouve donc des garde-corps sur la face arrière et la face de côté (l'autre face est raccordée au système de ventilation et donc inaccessible). La face avant de la table ne possède pas de garde-corps pour permettre au travailleur d'avoir l'espace nécessaire pour ses genoux lorsqu'il travaille en position assise. Néanmoins, cette dernière est dotée d'un système de sécurité de fin de course pour prévenir le risque que la table tombe sur les jambes du travailleur. En ce qui concerne la position assise du travailleur, les bacs de récupération de poussières ont été reculés par rapport à la version originale du poste de travail dans le but d'avoir de l'espace pour les genoux. Cet espace n'est pas forcément nécessaire étant donné que, quand les opérateurs travaillent en position assise, ils sont à environ 30-40 cm derrière la table pour pouvoir manipuler correctement l'outil avec la rallonge.

Comme expliqué plus haut, le nouveau poste dispose du même système d'aspiration que le précédent. C'est un système d'aspiration sèche qui permet de capturer les poussières légères, tandis que les poussières lourdes (parfois encore en fusion) tombent dans les bacs de récupération. Cela évite que les conduits prennent feu car les poussières ne sont pas refroidies comme pour les systèmes à aspiration humide. Pour que le système puisse être raccordé au système de ventilation général, des modifications doivent être apportées au conduit pour le rendre extensible pour ainsi accepter les variations de hauteur de la table.

En ce qui concerne l'autre majeure modification apportée à cette nouvelle table, le plateau pivotant, elle a été imaginée dans le but de limiter la manutention des pièces. Toutes les manipulations de pièces sont des sources de risques pour le travailleur comme pour la pièce elle-même. Les pièces sont généralement lourdes (maximum 200 kg), ce qui peut être contraignant pour le travailleur qui peut, par conséquence abîmer la pièce en l'accrochant sur quelque chose lors d'une mauvaise manipulation. L'idée de concevoir un plateau pivotant permettant une rotation de 360°, contribue à réduire le nombre de manipulations car la pièce peut être retournée sans devoir être levée. Ce même système peut également être bloqué à l'aide d'une vis située juste dessous la poutre avant de la table. La Figure 3.6 ne représente pas bien le système de blocage car les dernières modifications n'ont pas été actualisées sur les dessins de conception.

Malheureusement, aucun test n'a pu être réalisé sur ce poste de travail étant donné que la réception est prévue pour le 17 juillet 2020 et l'installation le 3 août 2020 pendant la période de « shutdown ». Le poste sera ensuite essayé pendant plusieurs mois et par plusieurs employés afin d'évaluer le niveau de satisfaction. Dans le cas où ce dernier est suffisant alors cette table sera reproduite en plusieurs exemplaires et installée à tous les postes d'ébavurage de tous les sites chez Héroux-Devtek Inc.

Pour la suite du projet, avant de reproduire ce nouveau poste de travail, il faudrait évaluer les performances ergonomiques de ce dernier. Pour ce faire, la méthode d'évaluation ergonomique REBA (Rapid Entire Body Assessment) pourrait être utilisée. Elle utilise un processus systématique pour évaluer les risques de TMS pour le corps entier et les risques liés à la conception ergonomique associés au travail. Elle permet d'évaluer les différentes postures corporelles requises, les efforts énergiques, le type de mouvement ou d'action, la répétition et la difficulté de la prise. Un score est attribué à chacune des régions corporelles suivantes : poignets, avant-bras, coudes, épaules, cou, tronc, dos, jambes et genoux (dans notre cas, les jambes et genoux ne seront peut-être pas nécessaires). Par la suite, les tables de la méthode compilent les variables de facteur de risque et génèrent un score unique représentant le niveau de risque de TMS.

Il serait donc intéressant d'utiliser cette méthode sur les deux postes de travail (l'ancien et le nouveau) pour ainsi vérifier que la posture est effectivement améliorée. Une idée serait de réévaluer les 21 tâches étudiées lors de l'intervention en prévention des TMS de 2018. Pour cette évaluation il serait intéressant de faire participer plusieurs travailleurs (3 minimum) pour voir si le poste est adéquat pour chacun d'entre eux. Ainsi, 63 tâches pourraient être évaluées et comparées. Ces tâches sont très diverses et impliquent l'utilisation d'outils à angle, d'outils droits et de rallonges. Cela permettrait de couvrir la majorité des activités d'ébavurage. L'analyse des données collectées permettra de dire si le niveau de risque de TMS du nouveau poste est meilleur que celui de l'ancien, et montrera aussi les points d'amélioration restants.

CHAPITRE 4 TESTS DE VIBRATION

4.1 Introduction

Dans cette partie, on aborde les mesures de vibration réalisées au poste d'ébavurage de l'usine Héroux-Devtek Inc. Ces tests visent à créer un premier jeu de mesures de vibrations en situations idéales (valeur de base) et en situations réelles (valeurs typiques) d'ébavurage. En effet, peu de manufacturiers adressent les niveaux de vibration de leurs outils (Greenslade & Larsson, 1997). Dans le cas où des valeurs sont présentées ces dernières sont souvent issues de tests ne reflétant pas la réalité des situations de travail.

4.2 Méthodologie

La section suivante aborde la méthodologie utilisée pour l'exécution des tests d'outils pneumatiques neufs, typiquement utilisés pour l'ébavurage. Elle décrit les outils et abrasifs testés ainsi que le poste de travail et la façon dont se sont déroulés les tests.

4.2.1 Les outils

Les taux de vibration sont mesurés sur des outils provenant de plusieurs constructeurs différents, parmi lesquels on retrouve Dynabrade, Dotco et Atlas Copco qui sont les plus courants. Trois outils de chaque constructeur sont testés et comparés par rapport à leurs homologues respectifs. Malgré le fait que les outils ne possèdent pas toutes les mêmes spécifications (Tableau 4.1, Tableau 4.2) (voir Annexe A pour les spécifications détaillées), ils restent comparables car ils sont vendus dans le but de réaliser le même travail ou la même tâche.

Pour chaque constructeur on trouve :

- 1 outil droit puissant (D2) fait pour des tâches impliquant beaucoup d'enlèvement de matière, comme des gros points de corrosion par exemple. Cet outil n'est généralement pas utilisable pour des tâches de précision.
- 1 outil droit de puissance moyenne (D1), mais qui possède une vitesse de rotation maximale élevée. Cet outil peut être utilisé pour des tâches légères d'enlèvement de matière, des tâches de finition ou encore des tâches de polissage.




- Enfin, 1 outil à angle (90°) possédant une puissance moyenne, pour des tâches particulières nécessitant de travailler la matière avec un angle différent. Il peut par exemple servir à travailler les angles de la pièce.

Toutes les mesures sont réalisées sur des outils complètement neufs, achetés pour l'occasion, afin qu'il n'y ait aucune différence d'usure entre eux.

Tableau 4.1: Résumé des spécifications des outils droits

Outils	Marque	Numéro de modèle	Orientati on	Puissance (HP)	Vitesse de rotation (RPM)
DynaD1 	Dynabrade	DYN52258	Droit	0,7	20000
DotcoD1 	Dotco	DOT12L2001-01	Droit	0,6	20000
AtlasD1 	Atlas Copco	ATCLSF19 S200-2	Droit	0,7	20000
DynaD2 	Dynabrade	DYN52668	Droit	1	18000
DotcoD2 	Dotco	DOT12L2502-01	Droit	0,9	18000
AtlasD2 	Atlas Copco	ATCLSF29 S180	Droit	1,2	18000

Tableau 4.2: Résumé des spécifications des outils à angle

Outils	Marque	Numéro de modèle	Orientatio n	Puissance (HP)	Vitesse de rotation (RPM)
Dyna90 	Dynabrade	DYN54359	90°	0,7	18000
Dotco90 	Dotco	DOT12L2384-01	90°	0,5	20000
Atlas90 	Atlas Copco	ATCLSV19 S200-2	90°	0,6	20000

4.2.2 Les abrasifs

Tous les types d'abrasifs sont testés, avec presque (voir 4.2.3 ci-dessous) tous les outils, dans deux états différents : le premier état étant « neuf », c'est-à-dire que l'abrasif est directement sorti de sa boîte et n'a jamais été utilisé auparavant. Le second état est donc « usé ». Suite à des observations du travail régulier, on considère à la vue de la délicatesse de ces éléments, que l'abrasif devient « usé » à partir de 30 secondes cumulées d'utilisation. Il est effectivement possible que l'abrasif puisse être décentré ou déséquilibré après la première utilisation. Dans le cas où l'abrasif est altéré (décentré ou déséquilibré) les niveaux de vibration vont nécessairement se retrouver affectés.

4.2.2.1 Roulette

Les roulettes (Figure 4.1) sont les abrasifs les plus utilisées, elles sont très polyvalentes car utilisable sur toutes les surfaces et sont très efficace autant pour enlever la corrosion profonde que pour des tâches de polissage.



Figure 4.1: Abrasif Roulette

Diamètre (Diameter)	2-1/2''
Largeur (Width)	1/4''
Tige (Shank)	1/4-20
Grain (Grit)	A60

4.2.2.2 Bristle

Le bristle (Figure 4.2) est un abrasif très flexible, utilisé pour des tâches spécifiques. Ils sont utilisés par paquet de 5 pour traiter la corrosion dans les filets et les rainures. Ils sont parfois utilisés pour du travail de finition grâce à leur finesse lors du polissage.

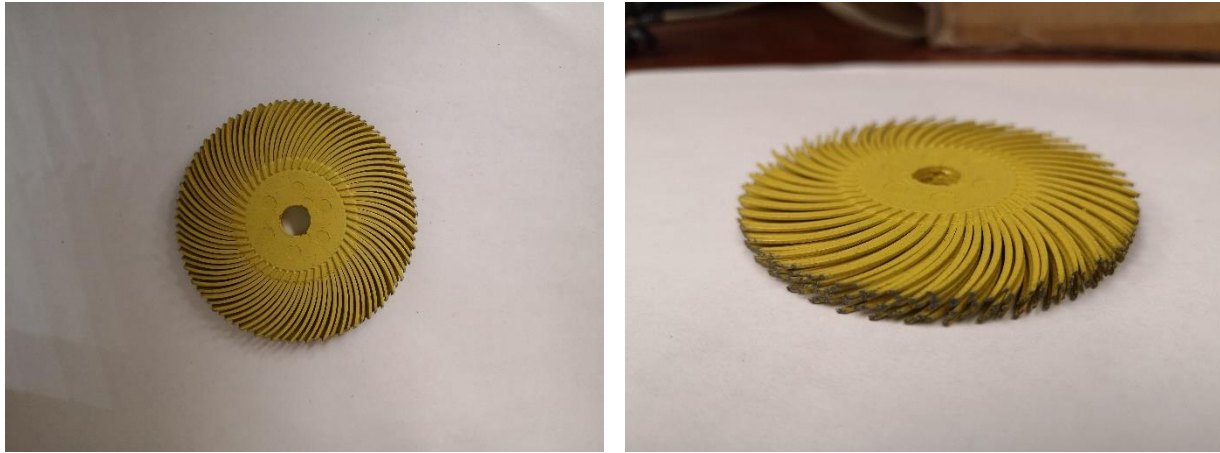


Figure 4.2: Abrasif Bristle

Diamètre (Diameter)	76,2 mm / 3 in
Largeur (Width)	9,53 mm / 3/8 in
Grain (Grit)	80

4.2.2.3 Papier carton

Le papier carton (Figure 4.3) est un abrasif très rigide. C'est pourquoi il est essentiellement utilisé dans les cas de grosse corrosion ou alors quand les points sont très profonds. Étant donné sa fine forme, il est idéal pour les rainures ou les filets.



Figure 4.3: Abrasif Papier carton

Diamètre (Diameter)	2 in
Largeur (Width)	1/8 in
Diamètre du trou (Hole diameter)	3/8 In

4.2.2.4 Papillon

Le papillon (Figure 4.4) est uniquement utilisé pour faire les tâches « d'intérieur ». Cet abrasif est très flexible et large ce qui permet de polir toute la circonférence intérieure d'un tube sans appliquer trop d'effort. C'est également la différence essentielle qu'il y a entre utiliser un papillon ou une roulette.



Figure 4.4: Abrasif Papillon

Diamètre (Diameter)	3 in
---------------------	------

4.2.2.5 Disque

Le disque (Figure 4.5) est généralement utilisé avec des outils orientés à 90°. Il est utilisé pour attaquer en profondeur la corrosion et se combine très bien à la pression qui peut être exercée avec un outil à 90°. Il est également parfois utilisé pour polir les fonds des intérieurs de pièce.



Figure 4.5: Abrasif Disque

Diamètre (Diameter)	2 in
Grain (Grit)	80

4.2.3 La rallonge

Il faut savoir que plusieurs types de rallonges existent pour s'adapter aux différentes tailles de pièces. C'est pourquoi, pour les tests et les mesures réalisés avec les outils décrits précédemment, la rallonge de taille standard a été utilisée. Le type de rallonge le plus utilisé est une rallonge de 24 pouces (environ 61 cm) (Figure 4.6, Figure 4.7). Toutes les rallonges sont en titane, ce qui apporte plus de légèreté que si elles étaient en acier, mais garde quand même une très bonne rigidité.

On note que les outils de la marque Atlas Copco ne peuvent pas s'adapter aux changements de diamètres des embouts. Cela signifie que ces outils sont incompatibles avec les rallonges. Ainsi aucune mesure n'a pu être prise impliquant ces combinaisons. On note également que les rallonges ne sont jamais utilisées avec des outils à angles.

La façon dont les rallonges sont utilisées dépend entièrement de l'opérateur qui les utilise. Il peut parfois se servir du manchon en bois tout comme ne pas l'utiliser du tout et maintenir la rallonge avec la main. Etant donné que la rallonge est lisse, il n'y a pas de risque de blessure par abrasion de la main.

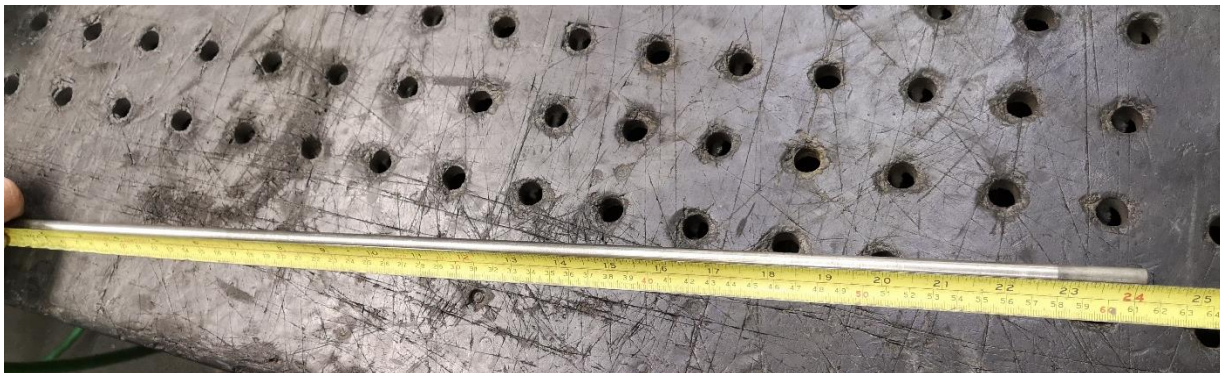


Figure 4.6: Rallonge entière



Figure 4.7: Taille de la rallonge

4.2.4 La pièce test

La pièce choisie pour faire les tests est une pièce abîmée qui n'a pas été remise en production (Figure 4.8, Figure 4.9). C'est une partie d'un train d'atterrissage appelée « piston de main C130 ». Ce piston a été choisie parmi d'autres pièces pour sa grande fréquence d'apparition au poste d'ébavurage. Il apparaît que cette pièce fait partie des 3 pièces qui passent le plus fréquemment entre les mains des ébavureurs pour subir des retouches ou des corrections impliquant différentes tâches d'ébavurage.

Cette pièce peut nécessiter tous les types de corrections, que ce soit du polissage extérieur, de la rectification, de l'enlèvement de points de corrosion ou en encore, des tâches sur la partie intérieure du cylindre.



Figure 4.8: Pièce test en vue entière

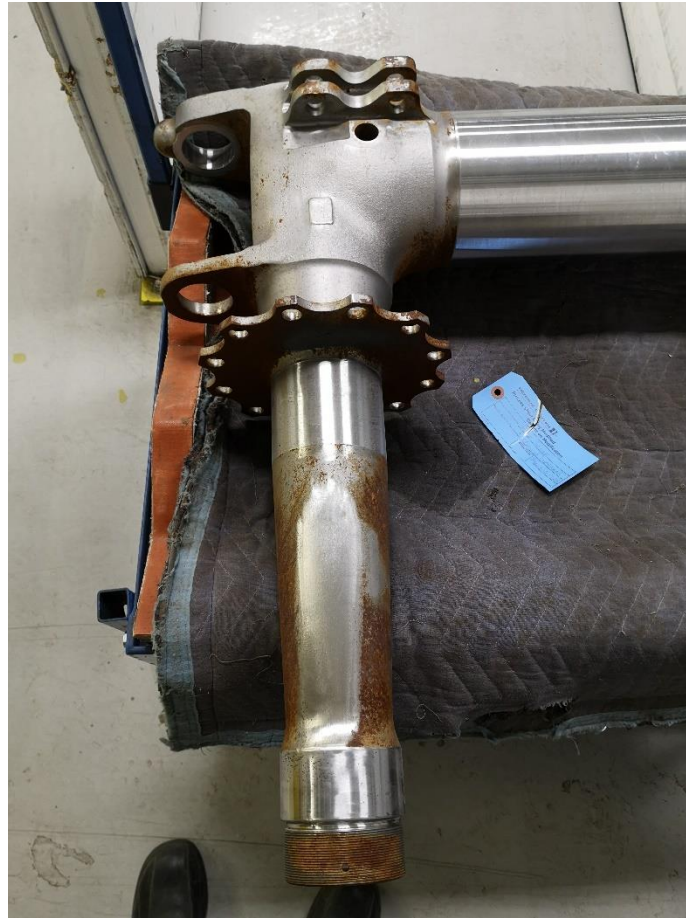


Figure 4.9: Pièce test vue de la zone travaillée

4.2.5 Déroulement des tests

Les mesures ont été prises entre le 8 juin 2020 et le 19 juin 2020 avec un HVM200 configuré pour la mesure de vibrations sur des outils et calibré avec un calibrateur pour accéléromètre Bruël & Kjaer type 4294. Le logiciel G4 LD Utility a permis la récupération des données sur l'ordinateur et l'exportation vers Excel, avec lequel les analyses ont été faites.

L'accéléromètre triaxial a été tenu contre le manche de l'outil par l'opérateur à l'aide d'un accessoire qu'il tenait entre sa main et l'outil (Figure 4.10). L'accéléromètre était maintenu contre le manche de l'outil, du côté de la partie tournante et au plus proche de la main du travailleur sans que cela nuise à son travail.

Chaque combinaison est testée 2 fois sous forme de deux phases (phase 1 et phase 2, étalées sur 3 jours) dans le but de confirmer les valeurs mesurées. Étant donné que les conditions sont très uniformes, pour chacune des phases les combinaisons sont testées pendant une période de 30 secondes malgré le fait que la directive européenne 2002/44/EC suggère 1 minute. Les mesures ont été réalisées sur la pièce d'essai décrite ci-dessus.

Entre chaque combinaison, le numéro de fichier enregistré avec le HVM 200 (Figure 4.11) est noté pendant que l'opérateur change lui-même les abrasifs mis à sa disposition.

Dans le but d'éviter de répéter toujours les mêmes séries lors des tests, l'ordre des outils a été modifié entre les abrasifs. Cela évite d'avoir toujours le même outil en premier dans les séries d'essais associés à un abrasif et d'avantager n'importe quel outil par rapport à un autre.

Pour toutes les phases de tests, nous avons des jeux d'abrasifs pour chaque outil, ce qui permet de reproduire les mêmes conditions pour chacune des combinaisons.

Tous les tests ont été réalisés avec le même opérateur. Cet opérateur est très expérimenté (15 ans d'expériences) ce qui permet d'assumer que le facteur d'erreur humaine est homogène et faible.

Pour ces tests, nous avons utilisé huit variables :

- « Type de mesure » : elle nous informe des conditions dans lesquelles la mesure a été prise, si c'est en condition de test ou sur le terrain.
- « Outils » : elle permet de différencier les types d'outils (« droits » ou « à angle »), leurs puissances respectives (« D1 » pour les moins forts et « D2 » pour les plus forts), et enfin les constructeurs.
- « Ordre » : elle permet de montrer que l'ordre des outils a été changé régulièrement afin d'éviter d'avantager un outil par rapport aux autres.
- « Rallonge » : elle nous indique simplement s'il y a présence ou non de rallonge pour cette combinaison.
- « Main » : elle permet de différencier l'endroit où la mesure a été prise, si c'est sur la main outil ou sur la main rallonge. Ce paramètre n'est pas utile quand aucune rallonge n'est utilisée car la mesure est forcément sur la main outil.
- « Abrasif » : elle nous indique quel abrasif a été utilisé dans cette combinaison.

- « ConditionAbr » : elle nous informe sur la condition de l'abrasif utilisé (« neuf » ou « usé »).
- « Phase » : elle nous indique l'ordre de la mesure, si c'est la première fois qu'elle est réalisée ou la deuxième.



Figure 4.10: Illustration de la position de l'accéléromètre sur l'outil pendant les tests



Figure 4.11: Accéléromètre HVM 200

4.3 Résultats / Discussion

Cette partie présente les résultats des tests fait avec les outils acheter à cet effet. Les parties sur les outils à angle, les outils droits et les outils avec rallonge seront différenciées.

4.3.1 Outils à angle (90°)

Dans cette catégorie d'outils à angle, les moyennes des trois phases de mesures durant les tests (mesures terrain exclues) sont très semblables, 3,50 m/s² pour la phase 1, 3,59 m/s² pour la phase 2 et 3,24 pour la phase 3 (Tableau 4.3). Comme les moyennes de phases sont semblables au point où la différence n'est pas statistiquement significative ($F_{2,23} = 0,552, p < 0,946$), alors on peut regrouper les données sans différencier les phases.

Tableau 4.3: Moyenne par phase - Outils à angle

Outils 90	$a_{rms} \pm ET$
Phase 1 (n = 12)	3,50 \pm 1,36
Phase 2 (n = 12)	3,59 \pm 1,41
Phase 3 (n = 2)	3,24 \pm 1,77

Cela nous permet de calculer la moyenne générale de toutes les valeurs $a_{rms\ moy} = 3,52\ m/s^2$.

On remarque que les valeurs sont très semblables, que ce soit avec des abrasifs « neufs » ou « usés ». On peut donc tirer la même conclusion que pour les phases qui est de dire que la différence n'est pas statistiquement significative ($F_{1,24} = 0,148, p < 0,704$) (Tableau 4.4). Contrairement aux hypothèses, ce paramètre n'a pas d'effet sur les valeurs de vibrations. Il faut peut-être revoir la classification des catégories « neuf » et « usé » car il est possible que les abrasifs ne soient pas vraiment usés au point d'affecter les niveaux vibratoires après 30 secondes d'utilisation.

Il faut, cependant, noter que l'écart-type de l'abrasif « disque » est trois fois plus élevé que celui des « roulettes » (Tableau 4.5). Cet écart est seulement dû à trois valeurs élevées relevées sur le disque ($>6\ m/s^2$). Parmi ces trois valeurs, il y en deux avec un abrasif « neuf » et une avec un abrasif « usé ». Il est fort possible que les abrasifs « disque » aient un problème d'équilibrage même neufs.

Cela viendrait confirmer des observations faites sur le terrain : on observe, sur certains disques neufs, un petit jeu entre la partie centrale du disque qui vient se fixer sur l'outil et la partie « papier abrasif » qui l'entoure. Autrement dit, le disque abrasif apparaît excentré par rapport à son axe d'entraînement (shank). Il serait peut-être intéressant de faire une évaluation de ce défaut, voir si c'est quelque chose de récurrent et si le problème peut être remonté au fournisseur.

Tableau 4.4: Moyenne par condition des abrasifs - Outils à angle

Condition Abr – Outils 90	$a_{rms} \pm ET$
Neuf (n = 14)	$3,62 \pm 1,61$
Use (n = 12)	$3,41 \pm 1,03$

Ici, la moyenne des valeurs avec les abrasifs « disque » est plus élevée ($3,84 \text{ m/s}^2$) que celle avec les abrasifs « roulette » ($3,15 \text{ m/s}^2$), la différence est notable mais non significative, elle représente presque 1/3 du seuil de $2,5 \text{ m/s}^2$ acceptable pour une journée ($F_{1,24} = 1,702, p < 0,204$) (Tableau 4.5). Comme expliqué juste au-dessus, la grosse différence se trouve sur les écarts-types. Effectivement, si on recalcule la moyenne et l'écart-type pour le « disque » sans les 3 valeurs aberrantes alors on trouve $a_{rms} = 3,06 \pm 0,83 \text{ m/s}^2$. Cela montre donc que les abrasifs « disques » ont parfois un problème même lorsqu'ils sont neufs.

Tableau 4.5: Moyenne par abrasif - Outils à angle

Abrasif – Outils 90	$a_{rms} \pm ET$
Roulette (n = 12)	$3,15 \pm 0,55$
Disque (n = 14)	$3,84 \pm 1,74$

Finalement, on remarque que seulement 9 des 26 combinaisons présentent des valeurs supérieures à la moyenne ($3,52 \text{ m/s}^2$). Parmi ces 9 combinaisons, aucune d'elles n'impliquent les outils de la marque Dynabrade. Néanmoins, les moyennes par manufacturier ne sont pas significativement différentes ($F_{2,23} = 2,568, p < 0,0985$) (Tableau 4.6). Ceci est probablement dû aux grands

écarts-types des outils Dotco et Atlas Copco, qui font que la valeur moyenne des outils Dynabrade se retrouve incluse dans l'intervalle de dispersion des autres manufacturiers. Pour aller à l'encontre de ce problème, il faudrait augmenter le nombre de mesures pour ainsi réduire les écarts-types, ou les confirmer auquel cas la moyenne pour Dynabrade pourrait être trouvée significativement plus petite que les deux autres

Tableau 4.6: Moyenne par manufacturier - Outils à angle

Manufacturier – Outils 90	$a_{rms} \pm ET$
Dyna90 (n = 8)	$2,72 \pm 0,36$
Dotco90 (n = 9)	$4,11 \pm 1,68$
Atlas90 (n = 9)	$3,64 \pm 1,30$

Dans cette catégorie d'outils à angle, la différence entre les mesures terrains (mesures terrains Clément et terrains Christiane incluses) et les mesures tests est significative ($F_{2,37} = 5,657, p < 0,007$). En effet, on voit que les outils Dynabrade sont plus performants dans la réalité que dans les tests.

Si on refait le calcul des moyennes par manufacturier en incluant maintenant les valeurs terrains alors, avec ces nouvelles valeurs, on trouve que le paramètre « manufacturier » a un impact significatif sur les niveaux de vibration ($F_{2,37} = 4,292, p < 0,022$) (Tableau 4.7). On voit que Dynabrade présente, pour les outils à angle, les meilleurs résultats et Dotco les pires.

Tableau 4.7: Moyenne par manufacturier - Outils à angle (valeurs terrains incluses)

Manufacturier – Outils 90	$a_{rms} \pm ET$
Dyna90 (n = 19)	$2,39 \pm 0,67$
Dotco90 (n = 12)	$4,08 \pm 1,64$
Atlas90 (n = 9)	$3,64 \pm 1,30$

Pour contextualiser ces chiffres, et les comparer avec les valeurs données par le guides des bonnes pratiques (INRS, 2019), nous pouvons calculer les limites d'exposition journalières avec ces outils. Pour ce faire nous utilisons les valeurs mesurées pendant les « tests » (les valeurs « terrains » ne sont pas incluses)

$$A(8) = a_{rms} * \left(\frac{T}{8}\right)^{\frac{1}{2}}$$

$$T = \left(\frac{A(8)}{a_{rms}}\right)^2 * 8$$

On se sert comme donnée $A(8)_{action} = 2,5 \text{ m/s}^2$ et $A(8)_{limite} = 5 \text{ m/s}^2$.

Tableau 4.8: Durée limite d'exposition par manufacturier - Outils à angle

Manufacturier – Outils 90	$a_{rms} \pm \text{ET}$	$T_{A(8)=2,5}$	$T_{A(8)=5}$
Dyna90 (n = 19)	$2,72 \pm 0,36$	6h45	>8h
Dotco90 (n = 12)	$4,11 \pm 1,68$	2h58	>8h
Atlas90 (n = 9)	$3,64 \pm 1,30$	3h46	>8h

On voit donc que les outils Atlas copco et Dotco ne peuvent pas assurer une demi-journée de travail classique sans que le seuil d'exposition soit dépassé. Les outils Dynabrade, quant à eux, peuvent être utilisés pendant presque toute la durée d'un quart de travail classique (8h) (Tableau 4.8). En ce qui concerne la limite d'exposition, elle n'est jamais atteinte, quel que soit l'outil utilisé. On note ici que ces données concernent les abrasifs « roulette » et « disque ». Si d'autres abrasifs viennent à être utilisés sur les outils à angle alors il faut recalculer le seuil et la limite d'exposition.

On note que la quantité de données collectées pour les outils à angle n'est pas très élevée, c'est donc une limite de l'étude. Cependant, je pense qu'on peut avoir confiance en ces résultats et qu'ils sont utilisables pour tirer des conclusions. Les mesures ont été prises rigoureusement, à des moments différents (les phases, mesurées sur 3 jours), et l'opérateur est très expérimenté (15 ans d'expérience), ce qui limite l'effet du facteur humain sur les résultats (mauvaise manipulation de l'outil ou mauvais montage des abrasifs par exemple). Cependant, les mesures ont été prises avec un seul opérateur, ce qui est aussi une limite de l'étude. Il serait peut-être intéressant de faire varier

ce paramètre en répétant ces mesures avec des opérateurs moins expérimenté ou de sexe différent pour vérifier la fiabilité de ces résultats.

4.3.2 Outils droits

Dans cette catégorie d'outils droits sans rallonges (mesures terrain exclues) ($n = 102$), les moyennes des deux phases de mesures sont également très semblables, $2,75 \text{ m/s}^2$ pour la phase 1 et $2,84 \text{ m/s}^2$ pour la phase 2. Tout comme pour les outils à angle, les moyennes sont semblables au point où la différence n'est pas statistiquement significative ($F_{2,99} = 0,064, p < 0,938$) (Tableau 4.9). On peut donc rassembler toutes les valeurs sans tenir compte des phases.

Ainsi la moyenne générale de toutes les valeurs pour les outils droits est $a_{rms\ moy} = 2,78 \text{ m/s}^2$

Tableau 4.9: Moyenne par phase - Outils droits

Outils droits	$a_{rms} \pm \text{ET}$
Phase 1 ($n = 48$)	$2,75 \pm 2,48$
Phase 2 ($n = 48$)	$2,84 \pm 2,06$
Phase 3 ($n = 6$)	$2,51 \pm 1,23$

On remarque que 31 combinaisons sur 102 ont des valeurs supérieures à la moyenne. Parmi ces 31 combinaisons, 22 d'entre elles impliquent l'abrasif « bristle ». De plus, on peut remarquer que sur 29 tests impliquant un abrasif « bristle », 22 d'entre eux ont des valeurs supérieures à $2,78 \text{ m/s}^2$. Parmi les abrasifs testés, les combinaisons avec les abrasifs « roulette », « papillon » et « papier carton » possèdent respectivement des moyennes de $1,83 \text{ m/s}^2$, $1,85 \text{ m/s}^2$ et $2,11 \text{ m/s}^2$ tandis que celles avec le « bristle » sont en moyenne à $4,92 \text{ m/s}^2$. Ici, les différences sont statistiquement significatives ($F_{3,98} = 19,659, p < 0,0001$) (Tableau 4.10), le « bristle » montre un gros écart avec les autres abrasifs et impacte fortement les niveaux de vibration.

Concrètement, le « bristle » ne peut pas être utilisé plus de 2h ($T_{A(8)=2,5} = 2h04$) quel que soit l'outil sur lequel il est monté, tandis que les autres abrasifs peuvent être utilisé pendant tout le quart de travail.

Tableau 4.10: Moyenne par abrasif - Outils droits

Abrasif – Outils droits	$a_{rms} \pm ET$
Roulette (n = 25)	1,83 \pm 0,65
Bristle (n = 29)	4,92 \pm 3,05
Papier carton (n= 24)	2,11 \pm 1,16
Papillon (n = 24)	1,85 \pm 0,61

Finalement, le deuxième paramètre montrant des différences statistiquement significatives ($F_{2,99} = 12,779, p < 0,0001$) est le manufacturier. En effet, Atlas Copco montre une moyenne significativement plus élevée que les autres manufacturiers : 1,67 m/s² pour Dynabrade, 2,58 m/s² pour Dotco et 4,09 m/s² pour Atlas Copco (Tableau 4.11).

Tableau 4.11: Moyenne par manufacturier - Outils droits

Manufacturier – Outils droits	$a_{rms} \pm ET$
Dynabrade (n = 34)	1,67 \pm 1,18
Dotco (n = 34)	2,58 \pm 1,72
Atlas copco (n = 34)	4,09 \pm 2,76

Concrètement, les outils Atlas copco ne peuvent pas être utiliser plus de 3h sans quoi le seuil d'exposition journalier sera dépassé et cela exposera le travailleur à des risques pour sa santé (Tableau 4.12). Les autres outils peuvent, quant à eux, couvrir l'équivalent d'une journée de travail sans que le travailleur ne soit exposé à des niveaux de risques élevés. Encore une fois, les limites d'exposition journalières ne peuvent pas être atteintes, quel que soit l'outil.

Tableau 4.12: Durée limite d'exposition par manufacturier - Outils droits

Manufacturier – Outils droits	$a_{rms} \pm ET$	$T_{A(8)=2,5}$	$T_{A(8)=5}$
Dynabrade (n = 34)	$1,67 \pm 1,18$	17h56	>8h
Dotco (n = 34)	$2,58 \pm 1,72$	7h31	>8h
Atlas copco (n = 34)	$4,09 \pm 2,76$	3h	>8h

Il est à noter que l'interaction entre le manufacturier et l'abrasif est significative. L'abrasif a un effet différencié en fonction du manufacturier sur lequel il est monté. En effet, la pire combinaison est Atlas Copco/bristle ($a_{rms} = 6,88 \pm 2,53$) suivi Dotco/bristle ($a_{rms} = 4,66 \pm 2,17$) et la meilleure est Dynabrade/papier carton ($a_{rms} = 1,14 \pm 0,58$). Les autres combinaisons ne sont pas significativement différentes entre elles ($F_{6,109} = 4,921, p < 0,0002$). Il est intéressant de noter que cet effet disparaît lorsqu'il y a une rallonge (les mesures sont faites sur la main outil afin de pouvoir faire la comparaison) ($F_{1,48} = 0,556, p < 0,4596$).

4.3.3 Outils avec rallonges

Le paramètre « rallonge » est très important. Au regard des résultats, sur la totalité de l'échantillon « test » (mesures terrain exclues), on voit que la présence ou non d'une rallonge a une influence non négligeable sur les niveaux de vibration ($F_{1,193} = 102,871, p < 0,0001$). Tout comme le paramètre « rallonge », le paramètre « main » (sur l'échantillon « test » des outils droits avec rallonges, n = 67) est tout aussi important quant aux niveaux de vibration perçus par l'opérateur. Ces derniers sont significativement différents en fonction de si la main est sur l'outil ou sur la rallonge ($F_{1,65} = 23,170, p < 0,0001$). C'est pourquoi, dans cette catégorie d'outils avec rallonges, on différencie, dans un premier temps, les mesures faites sur la main outil et celles faites sur la main rallonge.

- Main Outil

Pour la partie main outil seulement, les moyennes, pour la phase 1 puis 2 de l'échantillon « test » (outils droits avec rallonge et mesurés sur la main outil), sont respectivement 5,13 m/s² et 5,66 m/s². Ces deux moyennes ne présentent pas de différence significative ($F_{1,30} = 0,176, p <$

0,6777) (Tableau 4.13), donc on peut, sans se soucier des phases, calculer la moyenne générale de la catégorie main outil. Ainsi, on trouve $a_{rms\ moy\ main\ outil} = 5,40\ m/s^2$.

Tableau 4.13: Moyenne par phase - Outils avec rallonge - main outil

Outils avec rallonges – main outil	$a_{rms} \pm ET$
Phase 1 (n = 16)	5,13 \pm 3,36
Phase 2 (n = 16)	5,66 \pm 3,86

Pour l'ensemble des deux phases on remarque que 15 combinaisons ont des valeurs supérieures à la moyenne et que parmi ces 15 combinaisons, 13 d'entre elles impliquent l'abrasif « roulette ». De plus, on note que 16 mesures ont été faites avec l'abrasif « roulette » et, comme mentionné, 13 d'entre eux ont des valeurs supérieures à 5,40 m/s². En comparant les moyennes entre les abrasifs (Tableau 4.14), on remarque une différence significative ($F_{1,30} = 22,597, p < 0,0001$), la « roulette » possède des niveaux de vibration 2,5 fois plus élevés que ceux avec le « papillon ».

Tableau 4.14: Moyenne par abrasif - Outils avec rallonge - main outil

Abrasif – Outils avec rallonge – main outil	$a_{rms} \pm ET$
Roulette (n = 16)	7,70 \pm 3,45
Papillon (n = 16)	3,09 \pm 1,77

Finalement, les moyennes des valeurs des deux différents manufacturiers qui ont pu être mesurées, ne présentent pas de différence significative ($F_{1,30} = 0,390, p < 0,5369$) (Tableau 4.15). Contrairement aux autres mesures (Outils à angle, et Outils droits), le paramètre « manufacturier » semble, dans ce cas-ci, ne pas avoir d'effet sur les niveaux de vibrations. Néanmoins, il est à noter que, même si les valeurs de moyennes sont presque identiques, la dispersion des valeurs est bien différente. Les valeurs sont plus centrées autour de la moyenne pour les outils Dynabrade, on observe une certaine constance, tandis qu'avec les outils Dotco les valeurs sont assez dispersées (très bonnes ou très mauvaises).

Tableau 4.15: Moyenne par fabricant - Outils avec rallonge - main outil

Manufacturier – Outils avec rallonge – main outil	$a_{rms} \pm ET$
Dynabrade (n = 16)	5,00 \pm 2,08
Dotco (n = 16)	5,79 \pm 4,66
Atlas copco	N/A

Dans cette partie sur la main outil, on remarque que l'opérateur ne peut pas utiliser les outils trop longtemps sans s'exposer à des risques (Tableau 4.16). On voit également que la valeur de la limite d'exposition est inférieure à la durée totale d'un quart de travail. Ceci dit, il est donc vraiment important de limiter l'utilisation des rallonges ou alors de mesurer les temps d'utilisation afin de ne pas dépasser cette limite. Ces valeurs illustrent seulement les vibrations mesurées sur la main outil, elles ne sont pas suffisantes pour tirer des conclusions sur la durée maximale acceptable d'utilisation des outils. Il faut également analyser celles de la main rallonge.

Tableau 4.16: Durée limite d'exposition par fabricant - Outils avec rallonge - main outil

Manufacturier – Outils avec rallonge – main outil	$a_{rms} \pm ET$	$T_{A(8)=2,5}$	$T_{A(8)=5}$
Dynabrade (n = 16)	5,00 \pm 2,08	2h	8h
Dotco (n = 16)	5,79 \pm 4,66	1h29	5h58
Atlas copco	N/A	N/A	N/A

- Main Rallonge

En ce qui concerne maintenant la partie main rallonge (échantillon « test » des outils droits avec rallonge et mesurés sur la main rallonge), la moyenne de la phase 1 est 11,11 m/s² et celle de la phase 2 est 9,70 m/s². Encore une fois, la différence entre ces deux valeurs n'est pas significative ($F_{2,32} = 0,426, p < 0,6568$) (Tableau 4.17). Par la suite, on utilisera toutes les valeurs sans se

soucier des phases. Le calcul de la moyenne générale nous donne $a_{rms\ moy\ main\ rallonge} = 10,31\ m/s^2$.

Tableau 4.17: Moyenne par phase - Outils avec rallonge - main rallonge

Outils avec rallonges – main rallonge	$a_{rms} \pm ET$
Phase 1 (n = 16)	11,11 \pm 5,61
Phase 2 (n = 16)	9,70 \pm 3,69
Phase 3 (n = 3)	9,35 \pm 4,67

De manière générale, on a 12 des 35 combinaisons testées présentent des valeurs supérieures à la moyenne (10,31 m/s²) et plus de 75% (9/12) de ces combinaisons impliquent l'abrasif « roulette ». La différence entre les moyennes des abrasifs est significative ($F_{1,33} = 4,341, p < 0,0450$) et il est important de noter que les roulettes présentent la majorité des valeurs élevées (Tableau 4.18).

Tableau 4.18: Moyenne par abrasif - Outils avec rallonge - main rallonge

Abrasif – Outils avec rallonge – main rallonge	$a_{rms} \pm ET$
Roulette (n = 17)	11,93 \pm 4,98
Papillon (n = 18)	8,79 \pm 3,89

Finalement, contrairement à la partie main outil, les moyennes entre les manufacturiers sont significativement différentes ($F_{1,33} = 7,520, p < 0,0098$). On remarque que les outils Dynabrade présentent des niveaux de vibration significativement plus élevés que les outils Dotco. De plus, contrairement à la partie main outil, l'écart-type des outils Dynabrade est bien plus élevé que celui des outils Dotco. On voit que les valeurs sont assez centrées autour de la moyenne pour les outils Dotco, tandis que les outils Dynabrade présentent des valeurs très dispersées (Tableau 4.19).

Tableau 4.19: Moyenne par fabricant - Outils avec rallonge - main rallonge

Manufacturier – Outils avec rallonge – main rallonge	$a_{rms} \pm ET$
Dynabrade (n = 19)	12,13 \pm 5,58
Dotco (n = 16)	8,16 \pm 1,66
Atlas copco	N/A

Dans cette partie sur la main rallonge, les résultats sont encore plus contraignants que ceux sur la main outil. Ici, on voit que les activités avec une main sur la rallonge ne peuvent pas durer plus de 45 mn sans que le travailleur soit exposé à des risques (Tableau 4.20).

Tableau 4.20: Durée limite d'exposition par fabricant - Outils avec rallonge - main rallonge

Manufacturier – Outils avec rallonge – main rallonge	$a_{rms} \pm ET$	$T_{A(8)=2,5}$	$T_{A(8)=5}$
Dynabrade (n = 19)	12,13 \pm 5,58	20 mn	1h22
Dotco (n = 16)	8,16 \pm 1,66	45 mn	3h
Atlas copco	N/A	N/A	N/A

De manière générale, dans cette catégorie d'outil avec rallonge, on remarque que quel que soit l'outil choisi, son utilisation ne peut pas être très longue sans quoi, les travailleurs se trouvent exposés à des risques pour leur santé (20 mn pour les outils Dynabrade, 45 mn pour les outils Dotco). Ici aussi, on voit que les limites d'exposition sont très facilement atteignables en un quart de travail. L'importance de limiter l'utilisation des rallonges est encore plus visible dans ce cas-ci. La répartition sur plusieurs jours des tâches impliquant des rallonges serait peut-être une solution afin de limiter les expositions journalières.

On remarque également que c'est la main rallonge qui reçoit les niveaux de vibration les plus élevés et qui est ainsi le paramètre qui contraint la durée limite d'utilisation.

De façon globale, pour tous les outils droits (avec et sans rallonge), on remarque que le paramètre puissance n'a pas d'impact significatif sur les niveaux de vibration ($p < 0,819$). On peut supposer

que l'expérience de l'opérateur fait qu'il ajuste lui-même la vitesse de rotation de l'outil pour ne pas dépasser un certain seuil, ce qui neutraliserait l'effet de la puissance. Néanmoins, pour les situations de travail mesurées, il serait tout à fait possible de prendre l'outil le moins cher d'entre les deux, dans le cas où la puissance a un impact sur le prix.

Durant ces phases de tests, certains paramètres n'ont pas été pris en compte dans les analyses. Le poids des outils et le bruit qu'ils génèrent sont deux paramètres ayant une influence non négligeable auprès des travailleurs. Des remarques importantes que l'opérateur a relevé pendant les tests ont attiré mon attention : l'outil DynaD2 est très lourd comparé aux autres outils testés, et le bruit de tous les outils Atlas Copco est très fort et irritant. On notera que l'utilisation de bouchons d'oreilles était nécessaire lors de l'emploi des outils Atlas Copco. Certains opérateurs d'autres secteur venaient même voir ce qu'il se passait tellement le bruit était fort.

Ces commentaires sont des paramètres importants à prendre en compte avant de prendre quelque décision sur les outils. Il est important de valider auprès des travailleurs, les outils choisis. Réciproquement, il faut que les opérateurs soient également conscients des niveaux de vibration de chaque outil avant de donner leur avis. Il ne faudrait pas que leur choix soit uniquement basé sur des paramètres tels que le poids, le bruit, le grip ou encore la marque de l'outil.

De manière générale, un seul opérateur a été impliqué lors de ces mesures. Ce dernier est très expérimenté ce qui a permis de relever des commentaires très intéressants mentionnés plus haut. Cependant, cet opérateur a déjà eu par le passé, et encore maintenant, des douleurs s'apparentant à des TMS (douleurs aux bras, aux mains et tendinite au coude droit). On peut supposer qu'à cause de ces douleurs, il essaye, dans son travail, de réguler le plus possible les vibrations provenant de l'outil (en adaptant la vitesse de rotation de l'outil et la pression exercée sur la pièce par exemple). Le fait de faire des tests avec des opérateurs moins expérimentés permettrait de voir si ces derniers s'exposent à des niveaux de vibrations plus élevés ou non par une moins bonne régulation de la vitesse de l'outil par exemple.

On note également que dans le rapport, *Surveillance des troubles musculo-squelettiques – Intervention en prévention des risques liés aux vibrations mains-bras* (Lemay et al., 2018), il est écrit que le temps total d'utilisation de l'outil vibrant est de 1h23. Lors des observations faites en début de projet, une estimation avait été donnée et se trouvait autour de 3h. Dans tous les cas, on remarque que les opérateurs ne passent pas tout leur quart de travail avec l'outil vibrant en main,

la manipulation des pièces occupe également une grande partie de leur journée. Ainsi, des outils, paraissant « inacceptable » au regard des durées limites d'exposition, sont peut-être à reconsidérer.

Il en est de même pour les tâches impliquant des rallonges. Les opérateurs ne passent pas la totalité de leur temps avec les outils vibrants en main, à faire des activités nécessitant des rallonges. Les durées limites d'exposition sont à regarder en conséquence.

Etant donné que les opérateurs utilisent plusieurs outils par jour, il serait possible de calculer le temps d'utilisation à ne pas dépasser pour chacun de ces outils grâce au calculateur produit par le Health and Safety Executive (HSE) (HSE, 2020).

Voici trois exemples fait avec les moyennes des tests présentées précédemment :

Exemple 1 – Le seuil d'exposition n'est pas atteint (Figure 4.12) : Utilisation de l'outil Dyna 90 pendant 1h, puis d'un outil Dynabrade droit sans rallonge pendant 3h et enfin, un outil Dotco droit avec rallonge pendant 30 mn. (Temps total d'utilisation : 4h30mn)

Tool or process name <small>Select HSE recommended initial values or enter your own information</small>	Vibration magnitude m/s ²	Exposure points per hour	Time to reach EAV 2.5 m/s ² A(8)		Time to reach ELV 5 m/s ² A(8)		Exposure duration		Partial exposure m/s ² A(8)	Partial exposure points
			hours	minutes	hours	minutes	hours	minutes		
Dyna 90	2,72	15	6	45	>24		1		1,0	15
Dyna droit	1,67	6	17	56	>24		3		1,0	17
Dotco rallonge - main rallonge	8,16	133		45	3	0		30	2,0	67

Zoom to fit **Help**

Reset **Print (preview)**

Reset Options:

☐ Lock tool or process information

☐ Lock company and calc. by names

Instructions for use:

Enter vibration magnitudes and exposure durations (for an individual worker or a task carried out by several workers) in the white areas. Results are displayed in the yellow areas

Information on tool types may be entered directly into the tools/process names columns, or selected from a drop-down list of HSE recommended initial data values.

To clear all cells, click on the 'Reset' button

Tick the 'Lock tool or process information' check box to prevent 'Reset' clearing these cells

Additional information such as company name, worker name may be added if printing or saving the calculation.

For more information, click the 'Help' button

Daily exposure
m/s² A(8)

2,5

Total exposure
points

99

WARNING: Exposure potentially above 2.5m/s²A(8) EAV (100 points)

Figure 4.12: Exemple de combinaison ne dépassant pas le seuil d'exposition

Exemple 2 – Seuil d'exposition dépassé (Figure 4.13) : Utilisation de l'outil Dyna 90 pendant 1h, puis d'un outil Dotco droit sans rallonge pendant 2h et enfin, un outil Dotco droit avec rallonge pendant 45 mn. (Temps total d'utilisation : 3h45mn)

Tool or process name Select HSE recommended initial values or enter your own information	Vibration magnitude m/s ²	Exposure points per hour	Time to reach EAV 2.5 m/s ² A (8)		Time to reach ELV 5 m/s ² A (8)		Exposure duration		Partial exposure m/s ² A (8)	Partial exposure points
			hours	minutes	hours	minutes	hours	minutes		
Dyna 90	2,72	15	6	45	>24		1		1,0	15
Dotco droit	2,58	13	7	31	>24		2		1,3	27
Dotco rallonge - main rallonge	8,16	133		45	3	0		45	2,5	100

Zoom to fit
Help

Reset
Print (preview)

Reset Options:
☐ Lock tool or process information
☐ Lock company and calc. by names

Instructions for use:
Enter vibration magnitudes and exposure durations (for an individual worker or a task carried out by several workers) in the **white areas**. Results are displayed in the **yellow areas**.
Information on tool types may be entered directly into the tools/process names columns, or selected from a drop-down list of HSE recommended initial data values.
To clear all cells, click on the 'Reset' button
Tick the 'Lock tool or process information' check box to prevent 'Reset' clearing these cells
Additional information such as company name, worker name may be added if printing or saving the calculation.
For more information, click the 'Help' button

Daily exposure
m/s² A (8)
3,0

Total exposure points
142

WARNING: Exposure at or above 2.5m/s²A(8) EAV (100 points)

Figure 4.13: Exemple de combinaison dépassant le seuil d'exposition

Exemple 3 – Limite d'exposition dépassée (Figure 4.14) : Utilisation de l'outil Atlas 90 pendant 30mn, puis d'un outil Atlas Copco droit sans rallonge pendant 30mn et enfin, un outil Dynabrade droit avec rallonge pendant 1h30 mn. (Temps total d'utilisation : 2h30mn)

Tool or process name Select HSE recommended initial values or enter your own information	Vibration magnitude m/s ²	Exposure points per hour	Time to reach EAV 2.5 m/s ² A (8)		Time to reach ELV 5 m/s ² A (8)		Exposure duration		Partial exposure m/s ² A (8)	Partial exposure points
			hours	minutes	hours	minutes	hours	minutes		
Atlas 90	4,11	34	2	58	11	50		30	1,0	17
Atlas droit	4,09	33	2	59	11	57		30	1,0	17
Dyna rallonge - main rallonge	12,13	294		20	1	22	1	30	5,3	442

Zoom to fit
Help

Reset
Print (preview)

Reset Options:
☐ Lock tool or process information
☐ Lock company and calc. by names

Instructions for use:
Enter vibration magnitudes and exposure durations (for an individual worker or a task carried out by several workers) in the **white areas**. Results are displayed in the **yellow areas**.
Information on tool types may be entered directly into the tools/process names columns, or selected from a drop-down list of HSE recommended initial data values.
To clear all cells, click on the 'Reset' button
Tick the 'Lock tool or process information' check box to prevent 'Reset' clearing these cells
Additional information such as company name, worker name may be added if printing or saving the calculation.
For more information, click the 'Help' button

Daily exposure
m/s² A (8)
5,5

Total exposure points
476

WARNING: Exposure above 5m/s²A(8) ELV (400 points)

Figure 4.14: Exemple de combinaison dépassant la limite d'exposition

CHAPITRE 5 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Cette recherche avait pour objectif d'identifier, développer, puis tester différentes solutions permettant de réduire les facteurs de risques de TMS incluant ceux liés aux vibrations mains-bras à différents postes d'ébavurage en aéronautique, suite aux observations faites pendant une intervention de prévention en 2018. Après la phase d'observation, trois sous-objectifs ont été identifiés afin de répondre à la problématique générale de réduction des risques liés aux Troubles Musculo-Squelettiques (TMS) et aux Vibrations Mains-Bras (VMB) lors des activités d'ébavurage en aéronautique. Ces sous-objectifs sont, aménager un poste ergonomiquement adéquat pour les tâches à effectuer, développer des dispositifs permettant de réduire les VMB, et, créer un premier jeu de mesures de vibrations en situation idéales (valeur de base) et en situations réelles (valeur typiques) d'ébavurage.

Dans le but d'atteindre ces objectifs, des discussions avec les opérateurs et toute l'équipe santé sécurité d'Héroux Devtek Inc. ont permis de dresser une liste de spécifications que le nouveau poste de travail devrait remplir, pour ensuite le faire concevoir, fabriquer, puis installer. En parallèle de cette étape, avec l'aide des outilleurs, 4 prototypes de dispositifs de réduction de VMB ont été conçus puis testés sur le terrain avec les opérateurs d'ébavurage. Dans un second temps, des mesures tests de vibrations ainsi que des mesures sur le terrain ont été réalisées grâce à la coopération des opérateurs. Pendant ces tests 9 outils ont été testés, provenant de 3 manufacturiers différents et couplés aux 5 abrasifs les plus utilisés. Au total plus de 280 combinaisons ont été mesurées. Les résultats des essais avec les prototypes ont permis de montrer que des améliorations sont possibles et que des dispositifs peuvent effectivement réduire les VMB. Les résultats des mesures ont, quant à eux, montré que le choix des outils et des abrasifs est important dans le but de réduire l'exposition des travailleurs aux vibrations. En effet, certains abrasifs génèrent plus de vibration que d'autres (parfois à cause de défauts d'équilibrage). On voit aussi que l'utilisation de rallonge génèrent des niveaux de vibration extrêmement élevés ce qui contraint les temps de travail pour ne pas dépasser le seuil d'exposition.

Un futur projet pourrait, grâce à une méthode d'évaluation ergonomique de type REBA par exemple, évaluer les performances du nouveau poste de travail fraîchement installé.

Ce projet contribue à faire avancer et à documenter la recherche sur la réduction des risques liés aux Troubles Musculo-Squelettiques (TMS) et aux vibrations mains-bras (VMB) afin d'améliorer les performances en matière de santé, de sécurité au travail dans les industries aéronautiques.

RÉFÉRENCES

- ACGIH. (2018). *TLVs and BEIs Based on the Documentation of the Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents and Biological Exposure Indices*. Retrieved from American Conference of Governmental Industrial Hygienists. Cincinnati, OH:
- Agences de la santé et des services sociaux (Producer). (2015). Qu'est-ce qu'un trouble musculosquelettique (TMS) ?
- Bernard, B. P., & Putz-Anderson, V. (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.
- Bleau, J. (2005). Trop haut, trop bas ? La bonne hauteur d'un plan de travail. *Dossier pharmacie*.
- Boileau, P. É., & Turcot, A. (2004). Vibrations – Chapitre 12. Dans *Manuel d'hygiène du travail – Du diagnostic à la maîtrise des facteurs de risque*, Modulo-Griffon, Montréal, Qc, 738 pages.
- Burdorf. (2010). The role of assessment of biomechanical exposure at the workplace in the prevention of musculoskeletal disorders. *J Scandinavian journal of work, environment and health*, 36(1), 1.
- Burdorf, Van Der Beek, A. J. S. j. o. w., environment, & health. (1999). Exposure assessment strategies for work-related risk factors for musculoskeletal disorders. 25-30.
- Carra, S., Monica, L., & Vignali, G. J. S. S. (2019). Reduction of workers' hand-arm vibration exposure through optimal machine design: AHP methodology applied to a case study. *120*, 706-727.
- Cole, D. C., Wells, R. P., Frazer, M. B., Kerr, M. S., Neumann, W. P., Laing, A. C., . . . health. (2003). Methodological issues in evaluating workplace interventions to reduce work-related musculoskeletal disorders through mechanical exposure reduction. 396-405.
- Commission des normes, d. l. é., de la santé et de la sécurité du travail (CNESST). (2019). *Statistiques sur les lésions attribuables aux troubles musculosquelettiques (TMS) en milieu de travail (2015-2018)*. Retrieved from Commission des normes, de l'équité, de la santé et de la sécurité du travail (CNESST)
- <https://www.cnesst.gouv.qc.ca/Publications/300/Documents/DC300-322web.pdf>
- Council, N. R. (2001). *Musculoskeletal disorders and the workplace: low back and upper extremities*: National Academies Press.
- Daveluy, C., Pica, L., Audet, N., Courtemanche, R., & Lapointe, F. (2000). *Enquête sociale et de santé 1998, 2e édition*. Retrieved from Institut de la statistique du Québec: <https://www.stat.gouv.qc.ca/statistiques/sante/etat-sante/sante-globale/enquete-sociale-sante.pdf>
- David, G. C. J. O. m. (2005). Ergonomic methods for assessing exposure to risk factors for work-related musculoskeletal disorders. 55(3), 190-199.

- Dong, R. G., Welcome, D. E., Xu, X. S., & McDowell, T. W. J. I. J. o. I. E. (2020). Identification of effective engineering methods for controlling handheld workpiece vibration in grinding processes. 77, 102946.
- Greenslade, E., & Larsson, T. J. (1997). Reducing vibration exposure from hand-held grinding, sanding and polishing powertools by improvement in equipment and industrial processes. *Safety Science*, 25(1), 143-152. doi:[https://doi.org/10.1016/S0925-7535\(97\)00040-4](https://doi.org/10.1016/S0925-7535(97)00040-4)
- HSE. (2020). Hand-arm vibration exposure calculator. *Health and Safety Executive (HSE)*. Retrieved from <https://www.hse.gov.uk/vibration/hav/vibrationcalc.htm>
- INRS, I. N. d. I. R. S. (2011). Bruit et vibrations au travail. 4. La prévention technique des risques liés au bruit ou aux vibrations. *Hygiène et Sécurité du Travail*.
- INRS, I. N. d. I. R. S. (2019). *Vibrations mains-bras Guides de bonnes pratiques*. Retrieved from INRS:
- ISO5349-1. (2001). *Vibrations mécaniques - Mesurage et évaluation de l'exposition des individus aux vibrations transmises par la main - Partie 1 : Exigences générales*. Retrieved from ISO, Genève Suisse: <https://www.iso.org/fr/standard/32355.html>
- ISO5349-2. (2001). *Vibrations mécaniques - Mesurage et évaluation de l'exposition des individus aux vibrations transmises par la main - Partie 2 : Guide pratique pour le mesurage sur le lieu de travail*. Retrieved from ISO, Genève Suisse <https://www.iso.org/fr/standard/27511.html>
- Lemay, C., Turcot, A., & Cloutier, C. (2018). *Surveillance des troubles musculo-squelettiques - Intervention en prévention des risques liés aux vibrations mains-bras*. Retrieved from Centre Intégré de santé et de services sociaux de la Montérégie-Centre, Hérault-Devtek Inc., 21 pages:
- Marcotte, P., Boileau, P.-É., Rakheja, S., Aldien, Y., & Boutin, J. (2006). *Contrôle des vibrations main-bras engendrées par l'opération d'outils portatifs vibrants – Considérations de l'interface humaine et comportement biodynamique (R-467)*. Retrieved from IRRST: <https://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRRSST/R-467.pdf>
- Nilsson, T., Burström, L., & Hagberg, M. (1989). Risk assessment of vibration exposure and white fingers among platers. *International archives of occupational environmental health*, 61(7), 473-481.
- Pelmear, P. L., Taylor, W., Wasserman, D., & Fletcher, D. (1993). Hand-Arm Vibration: A Comprehensive Guide for Occupational Health Professionals. *Journal of Occupational Environmental Medicine*, 35(5), 533.
- Putz-Anderson, V. (1988). *Cumulative trauma disorders*: CRC Press.
- Reinvee, M., Aia, S., & Pääsuke, M. J. H. f. (2019). Ergonomic Benefits of an Angle Grinder With Rotatable Main Handle in a Cutting Task. 61(7), 1112-1124.
- Rimell, A. N., Notini, L., Mansfield, N. J., & Edwards, D. J. J. I. J. o. I. E. (2008). Variation between manufacturers' declared vibration emission values and those measured under simulated workplace conditions for a range of hand-held power tools typically found in the construction industry. 38(9-10), 661-675.

- RSPSAT. (2013). La prévention des troubles musculosquelettiques reliés au travail, on s'en occupe!
Retrieved from <http://www.santeautravail.qc.ca/web/cpre/dossier/definition>
- Silverstein, B., & Clark, R. (2004). Interventions to reduce work-related musculoskeletal disorders. *14*(1), 135-152.
- St-Jacques, Y., & Ross, M.-J. (2018). *TMS - Idées de prévention pour les meuleurs et les polisseurs*.
Retrieved from Bibliothèque Nationale du Québec, Bibliothèque Nationale du Canada:
- Taylor, J. S. J. A. j. o. i. m. (1985). Vibration syndrome in industry: Dermatological viewpoint. *8*(4-5), 415-432.
- Turcot, A., Vézina-nadon, L., Pelletier, P., & Tremblay, M. (2016). *Risque relié aux vibrations et outils de repérage élaborés pour le réseau de santé publique en santé au travail (RSPSAT)*.
Retrieved from Le Grand Rendez-Vous, Montréal, 2 Novembre:
- van der Molen, H. F., Foresti, C., Daams, J. G., Frings-Dresen, M. H., Kuijer, P. P. F. J. O., & medicine, e. (2017). Work-related risk factors for specific shoulder disorders: a systematic review and meta-analysis. *74*(10), 745-755.
- Vergara, D. (2012). *Les Troubles Musculosquelettiques liés au travail : Portrait montréalais de surveillance des TMS indemnisés, 1998-2007* Retrieved from Agence de la santé des services sociaux de Montréal, Québec:
<http://www.santecom.qc.ca/bibliothequevirtuelle/Montreal/9782896732456.pdf>
- Vézina, M., Cloutier, E., Stock, S., Lippel, K., Fortin, É., Delisle, A., . . . Prud'homme, P. (2011). *Enquête québécoise sur des conditions de travail, d'emploi et de santé et de sécurité du travail (EQCOTESST)*. Retrieved from Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et sécurité du travail - Institut national de santé publique du Québec et Institut de la statistique du Québec: <https://www.irsst.qc.ca/media/documents/PubIRSST/R-691.pdf>
- Vihlborg, P., Bryngelsson, I.-L., Lindgren, B., Gunnarsson, L. G., & Graff, P. (2017). Association between vibration exposure and hand-arm vibration symptoms in a Swedish mechanical industry. *International Journal of Industrial Ergonomics*, *62*, 77-81. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ergon.2017.02.010>

ANNEXES

ANNEXE A SPECIFICATIONS DETAILLEES DES OUTILS



Collet Size	1/4"
HP (W)	0,7 (522)
Motor Free Speed (RPM)	20 000
Exhaust Type	Front
Max. Air Flow @ 90 PSIG (6.2 Bar): SCFM (L/Min.)	34 (963)
Air Inlet Thread	1/4" NPT
Hose I.D. Size Inches (mm)	1/4" (6)
Length Inches (mm)	6" (152)
Height Inches (mm)	1-7/8" (48)
Sound Level dB(A)	80
Vibration Information	<2,5 m/s ²
Item Weight	0,95 kg
Packaged Weight	1,29 kg

Figure A.1: Spécifications DYN52258



Collet Size	1/4"
HP (W)	1 (744)
Motor Free Speed (RPM)	18 000
Exhaust Type	Rear
Max. Air Flow @ 90 PSIG (6.2 Bar): SCFM (L/Min.)	40 (1,133)
Air Inlet Thread	3/8" NPT
Hose I.D. Size Inches (mm)	3/8" (10)
Length Inches (mm)	10" (254)
Height Inches (mm)	1-7/8" (48)
Sound Level dB(A)	79
Vibration Information	3 m/s ²
Item Weight	1,09 kg
Packaged Weight	1,43 kg

Figure A.2: Spécifications DYN52668



Collet Size	1/4" & 6 mm
HP (W)	0,7 (522)
Motor Free Speed (RPM)	18 000
Exhaust Type	Rear
Max. Air Flow @ 90 PSIG (6.2 Bar): SCFM (L/Min.)	41 (1,161)
Air Inlet Thread	1/4" NPT
Hose I.D. Size Inches (mm)	3/8" (10)
Length Inches (mm)	7-7/8" (200)
Height Inches (mm)	2,9" (77)
Sound Level dB(A)	80
Vibration Information	5,5 m/s ²
Item Weight	0,98 kg
Packaged Weight	1,5 kg

Figure A.3: Spécifications DYN54359



Collet Size	1/4"
Exhaust	Front
Throttle Type	Lock Off Lever
Motor Free Speed (RPM)	20 000
Abrasive Capacity	1.5" Mounted Wheel, 3/4" Carbide Burr
Type Housing	Composite
Weight	1.4lbs/0.64kg
Overall Length	6.9"/175mm
Air Inlet NPT	1/4"

Figure A.4: Spécifications DOT12L2001-01



Collet Size	1/4"
Collet Guard	200 Series
Exhaust	Front
Motor Free Speed (RPM)	18 000
Abrasive Capacity	1.5" Mounted Wheel, 1" Carbide Burr
Type Housing	Composite
Weight	1.8lbs/0.82kg
Overall Length	7.3"/185mm
Air Inlet NPT	1/4"

Figure A.5: Spécifications DOT12L2502-01



Collet Size	1/4"
Motor Free Speed (RPM)	20 000
Abrasive Capacity	1.25" Mounted Wheel, 3/4" Carbide Burr
Type Housing	Composite
Weight	2.0lbs/0.91kg
Overall Length	7.5"/191mm
Head Height	5.5"
Air Inlet NPT	1/4"

Figure A.6: Specifications DOT12L2384-01



Appareils non lubrifiés	Yes
Consommation d'air à la puissance maxi.	20 cfm
Consommation d'air à la puissance maxi.	9.6 l/s
Consommation d'air à la vitesse à vide	7 cfm
Consommation d'air à la vitesse à vide	3.5 l/s
DEEE	0
Dimension de flexible recommandée	3/8 inch
Dimension de flexible recommandée	10 mm
Directives UE	2006/42/EC
Dispersion amortie	Yes
Filetage d'entrée d'air NPT	1/4 inch
Homologué CEA	Yes
Incertitude des vibrations	0.8 m/s ²
Longueur	7.6 inch
Longueur	193 mm
Norme CE	ISO11148-9
Norme acoustique	ISO15744
Norme de vibrations	ISO28927-12
Poids	0.5 kg
Poids	1.2 lb
Pression acoustique	<70 dB(A)
Pression de service maxi.	6.3 bar
Pression de service maxi.	90 psig
Puissance maxi.	0.67 HP
Puissance maxi.	0.5 kW
Taille de pince	1/4 inch
Type de modèle	Straight
Type de moteur	Vane
Valeur des vibrations	3.3 m/s ²
Vitesse à vide maxi	20000 r/min

Figure A.7: Spécifications ATCLSF19 S200-2



Consommation d'air à la vitesse à vide	13 cfm
Consommation d'air à la vitesse à vide	6 l/s
Consommation d'air à la puissance maxi.	42 cfm
Consommation d'air à la puissance maxi.	20 l/s
Filetage d'entrée d'air NPT	3/8 inch
Filetage d'entrée d'air NPT	3/8 inch
Collet size	1/4 inch
Collet size	6 mm
Homologué CEA	Yes
Norme CE	ISO 11148-9
Directives UE	2006/42/EC
Longueur	8.4 inch
Longueur	213 mm
Appareils non lubrifiés	Yes
Vitesse à vide maxi	18000 r/min
Puissance maxi.	1.2 HP
Puissance maxi.	0.9 kW
Pression de service maxi.	6.3 bar
Pression de service maxi.	90 psig
Type de modèle	Straight
Type de moteur	Vane
Rec hose size	1/2 inch
Rec hose size	13 mm
Dispersion amortie	Yes
Puissance acoustique	93 dB(A)
Pression acoustique	82 dB(A)
Norme acoustique	ISO15744
Incertitude acoustique	3 dB(A)
Norme de vibrations	ISO28927-12
Incertitude des vibrations	1.1 m/s ²
Valeur des vibrations	2.8 m/s ²
DEEE	0
Poids	0.8 kg
Poids	1.7 lb

Figure A.8: Spécifications ATCLSF29 S180