Institut de Recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail

PhareSST

Rapports de recherche scientifique | Rapports

2008

Industrie de la réparation automobile : caractérisation du bruit et des vibrations émis par les outils portatifs

Pierre Marcotte
IRSST, pierre.marcotte@irsst.qc.ca

Rémy Oddo
Université de Sherbrooke

Jérôme Boutin
IRSST

Rémi Boilley
Université de Sherbrooke

Hugues Nélisse
IRSST, hugues.nelisse@irsst.qc.ca

See next page for additional authors

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

Citation recommandée

Marcotte, P., Oddo, R., Boutin, J., Boiley, R., Nélisse, H., Boileau, P.-É., . . . Daigle, R. (2008). *Industrie de la réparation automobile : caractérisation du bruit et des vibrations émis par les outils portatifs* (Rapport n° R-554). IRSST.

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

Auteurs

Pierre Marcotte, Rémy Oddo, Jérôme Boutin, Rémi Boilley, Hugues Nélisse, Paul-Émile Boileau, Pierre Drouin, Christian Sirard, and Renaud Daigle

This rapports de recherche scientifique is available at PhareSST: https://pharesst.irsst.qc.ca/rapports-scientifique/498

Bruit et vibrations

Études et recherches

RAPPORT **R-554**

Industrie de la réparation automobile
Caractérisation du bruit et des vibrations émis par les outils portatifs

Pierre Marcotte
Rémy Oddo
Jérôme Boutin
Rémi Boilley
Hugues Nélisse
Paul-Émile Boileau
Pierre Drouin
Christian Sirard
Renaud Daigle

irsst

Solidement implanté au Québec depuis l980,
l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé
et en sécurité du travail (IRSST) est un organisme
de recherche scientifique reconnu internationalement
pour la qualité de ses travaux.

NOS RECHERCHES *travaillent* pour vous !

Mission

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

Offrir les services de laboratoires et l'expertise
nécessaires à l'action du réseau public
de prévention en santé et en sécurité du travail.

Assurer la diffusion des connaissances, jouer un rôle
de référence scientifique et d'expert.

Doté d'un conseil d'administration paritaire où siègent
en nombre égal des représentants des employeurs
et des travailleurs, l'IRSST est financé par la
Commission de la santé et de la sécurité du travail.

Pour en savoir plus

Visitez notre site Web ! Vous y trouverez
une information complète et à jour.
De plus, toutes les publications éditées
par l'IRSST peuvent être téléchargées gratuitement.
www.irsst.qc.ca

Pour connaître l'actualité de la recherche menée
ou financée par l'IRSST, abonnez-vous gratuitement
au magazine Prévention au travail,
publié conjointement par l'Institut et la CSST.
Abonnement : 1-877-221-7046

Dépôt légal
Bibliothèque et Archives nationales
2008
ISBN : 978-2-89631-247-4 (version imprimée)
ISBN : 978-2-89631-248-1 (PDF)
ISSN : 0820-8395

IRSST - Direction des communications
505, boul. De Maisonneuve Ouest
Montréal (Québec)
H3A 3C2
Téléphone : 514 288-1551
Télécopieur : 514 288-7636
publications@irsst.qc.ca
www.irsst.qc.ca
Institut de recherche Robert-Sauvé
en santé et en sécurité du travail,
avril 2008

Bruit et vibrations

Études et recherches

RAPPORT **R-554**

Industrie de la réparation automobile
Caractérisation du bruit et des vibrations émis par les outils portatifs

Pierre Marcotte[1], Rémy Oddo[2], Jérôme Boutin[3], Rémi Boilley[2], Hugues Nélisse[1], Paul-Émile Boileau[4], Pierre Drouin[3], Christian Sirard[3] et Renaud Daigle[3]

[1]Service de la recherche, IRSST
[2]Département de génie mécanique, Université de Sherbrooke
[3]Service soutien à la recherche et à l'expertise, IRSST
[4]Direction scientifique, IRSST

Avis de non-responsabilité

L'IRSST ne donne aucune garantie relative à l'exactitude, la fiabilité ou le caractère exhaustif de l'information contenue dans ce document. En aucun cas l'IRSST ne saurait être tenu responsable pour tout dommage corporel, moral ou matériel résultant de l'utilisation de cette information.

Notez que les contenus des documents sont protégés par les législations canadiennes applicables en matière de propriété intellectuelle.

Cliquez recherche
www.irsst.qc.ca

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

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

CONFORMÉMENT AUX POLITIQUES DE L'IRSST

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

SOMMAIRE

L'objectif de ce projet de recherche était de caractériser, en laboratoire, le bruit et les vibrations émis par cinq classes d'outils portatifs (clés pneumatiques, clés pneumatiques à impact, meuleuses et meuleuses d'outillage, ponceuses, marteaux pneumatiques), utilisées dans les ateliers de réparation automobile du Québec. Pour chaque classe d'outil, 4 à 5 modèles d'outil ont été sélectionnés pour évaluer l'émission vibratoire et sonore de ces outils sur des bancs d'essai. Ces bancs d'essai de première génération sont basés sur la série de normes ISO 8662 pour l'évaluation des vibrations main-bras, ainsi que sur la norme ISO 15744 pour l'évaluation de la puissance acoustique rayonnée par l'outil. Cependant, la plupart de ces normes ne tiennent pas compte de l'interaction entre l'outil et la pièce travaillée. Des tâches représentatives pour chacune de ces classes d'outils ont été identifiées à partir d'observations faites en milieu de travail. Par la suite, des bancs d'essai de deuxième génération, qui tiennent compte de l'interaction entre l'outil et la pièce travaillée et qui sont représentatifs de tâches que l'on retrouve dans les ateliers de réparations automobiles, ont été mis au point et les outils sélectionnés ont été à nouveau testés.

Pour les clés pneumatiques et les clés pneumatiques à impact, le banc d'essai de deuxième génération, qui consiste à visser des écrous sur des tiges filetées, offre une meilleure représentativité de l'utilisation de ces outils en milieu de travail, en plus de simplifier les procédures de mesurage par rapport au banc d'essai de première génération. En ce qui concerne les meuleuses d'outillage, le banc d'essai de deuxième génération consiste à effectuer trois tâches (poncer, meuler et nettoyer) qui sont représentatives de l'utilisation de ces outils dans les garages. Ce nouveau banc d'essai offre une meilleure représentativité de l'utilisation de ces outils dans les garages par rapport au banc d'essai de première génération, qui consiste à opérer les outils à vide avec une fraise artificielle excentrée. Pour les meuleuses, le banc d'essai de deuxième génération consiste à meuler une plaque encastrée en acier doux, ce qui est plus représentatif de l'utilisation de ces outils dans les garages que le banc d'essai de première génération, qui consiste à opérer la meuleuse à vide en utilisant une meule artificielle avec un balourd. Il semble que pour cette classe d'outils, l'interaction entre l'outil et la pièce travaillée soit une source dominante de bruit, puisque le banc de deuxième génération génère des niveaux de bruit de 9 à 10 dB(A) plus élevés par rapport au banc de première génération. Pour les ponceuses, il n'a pas été jugé nécessaire de mettre au point un banc d'essai de deuxième génération, puisque le banc d'essai de première génération, qui consiste à poncer une plaque encastrée en acier doux, inclut déjà la pièce travaillée. Finalement, pour le marteau pneumatique, un banc d'essai de deuxième génération a été mis au point, qui consiste à opérer l'outil avec un burin de type ciseau sur une plaque en acier doux. Par rapport au banc d'essai de première génération, qui consiste à opérer l'outil avec un burin artificiel dans un dissipateur d'énergie, le banc d'essai de deuxième génération, incluant l'interaction entre l'outil et la pièce travaillée, produit des niveaux de puissance acoustique qui sont de 5 à 8 dB(A) plus élevés. De façon générale, on note que l'exclusion de la pièce travaillée dans certains bancs de tests donne des résultats qui ne sont pas nécessairement représentatifs de la réalité, tant au niveau vibratoire que acoustique.

Au niveau de l'exposition aux vibrations des travailleurs, il semble que les ponceuses soient potentiellement problématiques, car elles sont très utilisées dans le secteur de la carrosserie, et présentent des valeurs d'émission vibratoire passablement élevées. Il en est de même pour les meuleuses, qui peuvent présenter des valeurs d'émission vibratoire assez élevées, tout en étant passablement utilisées. Pour les clés pneumatiques, les valeurs d'émission vibratoire peuvent être élevées, et ces outils sont passablement utilisés. Par ailleurs, la clé pneumatique à impact est peu utilisée, et ses valeurs d'émission vibratoire sont relativement peu élevées, ce qui semble ne pas en faire un outil problématique du point de vue des vibrations. Finalement, les niveaux vibratoires peuvent être assez élevés pour les marteaux pneumatiques, cependant ces outils sont peu utilisés. Pour l'exposition au bruit, il semble que les ponceuses soient parmi les outils les moins bruyants (du moins pour les modèles testés munis d'un silencieux). Étant donné que ces outils sont très utilisés dans le secteur de la carrosserie, ils peuvent cependant être problématiques en exposant les mécaniciens à des doses élevées de bruit. Il en est de même pour les meuleuses et meuleuses d'outillage, ainsi que les clés pneumatiques, qui peuvent présenter des niveaux acoustiques moyennement élevés, tout en étant passablement utilisés. Par ailleurs, les clés pneumatiques à impact sont peu utilisées, cependant leurs niveaux acoustiques peuvent être très élevés, ce qui peut en faire un outil problématique du point de vue acoustique. Finalement, les niveaux acoustiques sont très élevés pour les marteaux pneumatiques, donc cette classe d'outil peut être problématique, même si ces outils sont peu utilisés.

En se basant sur les résultats obtenus et sur les observations effectuées lors des visites dans les ateliers de réparation automobile, plusieurs recommandations visant à minimiser l'exposition au bruit et aux vibrations main-bras des travailleurs du secteur automobile peuvent être formulées. De façon générale, les outils rotatifs (clés pneumatiques, clés pneumatiques à impact, meuleuses, meuleuses d'outillage, ponceuses) bénéficient de l'ajout d'un silencieux à l'échappement. Pour minimiser l'exposition au bruit des travailleurs, il est recommandé d'utiliser des outils moins bruyants, en choisissant des clés pneumatiques, clés pneumatiques à impacts, ponceuses et meuleuses d'outillages munies d'un silencieux à l'échappement. Par ailleurs, il est préférable de minimiser l'utilisation du marteau pneumatique et d'utiliser un modèle muni d'un système antivibratile. Il est également suggéré d'isoler les mains du froid lors de l'utilisation d'outils portatifs vibrants ainsi que de porter des protecteurs auditifs lors de l'utilisation d'outils bruyants. Finalement, l'opération et l'entretien des outils selon les recommandations du fabricant peuvent contribuer à diminuer l'exposition des travailleurs aux vibrations main-bras en limitant l'usure prématurée des outils.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier l'Association sectorielle paritaire services automobiles (Auto Prévention) pour sa collaboration, Denis Paquet de chez *Chicago Pneumatic* pour le prêt d'outils ainsi que les entreprises de réparation automobile qui ont participé à cette étude.

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION 1
1.1 Problématique de bruit/vibrations chez les mécaniciens automobiles 1
1.2 Problématique relié au choix d'outils moins bruyant et/ou moins vibrant 2
1.3 Limitations des normes actuelles pour les mesures de bruit/vibration sur les outils portatifs 3

2. OBJECTIFS DE L'ÉTUDE 5

3. MÉTHODE 7
3.1 Choix des outils 7
3.2 Mesure de la puissance acoustique en laboratoire 7
3.2.1 Description de la méthode de mesure de la puissance acoustique 8
3.2.2 Caractérisation du système de mesure 9
3.3 Mesure de l'émission vibratoire des outils portatifs 9

4. RÉSULTATS 13
4.1 Résultats du sondage 13
4.2 Clé pneumatique (« air ratchet ») 14
4.2.1 Sélection des outils 15
4.2.2 Mesures dans les garages 16
4.2.3 Banc d'essai de première génération 18
4.2.3.1 Mesures vibratoires 19
4.2.3.2 Mesures acoustiques 20
4.2.4 Banc d'essai de deuxième génération 20
4.2.4.1 Mesures vibratoires 21
4.2.4.2 Mesures acoustiques 22
4.2.5 Identification des sources de bruit 24
4.2.6 Sommaire des résultats 25
4.3 Clé pneumatique à impact (« impact wrench ») 26
4.3.1 Sélection des outils 27
4.3.2 Mesures dans les garages 28
4.3.3 Banc d'essai de première génération 30
4.3.3.1 Mesures vibratoires 30
4.3.3.2 Mesures acoustiques 31
4.3.4 Banc d'essai de deuxième génération 32
4.3.4.1 Mesures vibratoires 33
4.3.4.2 Mesures acoustiques 34
4.3.5 Identification des sources de bruit 38
4.3.6 Sommaire des résultats 40
4.4 Meuleuse et meuleuse d'outillage (« die grinder ») 40
4.4.1 Sélection des outils 41
4.4.2 Mesures dans les garages 42
4.4.3 Meuleuse d'outillage 44
4.4.3.1 Banc d'essai de première génération 44
4.4.3.1.1 Mesures vibratoires 44

4.4.3.1.2 Mesures acoustiques 45
4.4.3.2 Banc d'essai de deuxième génération 45
4.4.3.2.1 Mesures vibratoires 46
4.4.3.2.2 Mesures acoustiques 47
4.4.3.3 Identification des sources de bruit 49
4.4.3.4 Sommaire des résultats 50
4.4.4 Meuleuse 50
4.4.4.1 Banc d'essai de première génération 50
4.4.4.1.1 Mesures vibratoires 51
4.4.4.1.2 Mesures acoustiques 52
4.4.4.2 Banc d'essai de deuxième génération 52
4.4.4.2.1 Mesures vibratoires 53
4.4.4.2.2 Mesures acoustiques 53
4.4.4.3 Sommaire des résultats 53
4.5 Ponceuse 54
4.5.1 Sélection des outils 54
4.5.2 Mesures dans les garages 55
4.5.3 Banc d'essai de première génération 56
4.5.3.1 Mesures vibratoires 57
4.5.3.2 Mesures acoustiques 58
4.5.4 Sommaires des résultats 59
4.6 Marteau pneumatique (« zip gun ») 59
4.6.1 Sélection des outils 59
4.6.2 Mesures dans les garages 60
4.6.3 Banc d'essai de première génération 61
4.6.3.1 Mesures vibratoires 61
4.6.3.2 Mesures acoustiques 62
4.6.4 Banc d'essai de deuxième génération 62
4.6.4.1 Mesures vibratoires 63
4.6.4.2 Mesures acoustiques 63
4.6.5 Sommaires des résultats 65

5. SOMMAIRE DES RÉSULTATS ET RECOMMENDATIONS 67
5.1 Sommaire des résultats vibratoires 67
5.2 Sommaire des résultats acoustiques 68
5.3 Recommandations 69

6. CONCLUSION 71

BIBLIOGRAPHIE 73

ANNEXE A : QUESTIONNAIRE DISTRIBUÉ AUX MÉCANICIENS 75

ANNEXE B : CARACTÉRISATION DU SYSTÈME DE MESURE 85

ANNEXE C : EXEMPLE DE CALCUL DE L'ÉMISSION VIBRATOIRE D'UN OUTIL PORTATIF 95

ANNEXE D : LISTE DES OUTILS TESTÉS EN LABORATOIRE 97

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1. Répartition des répondants par secteur d'activité 7
Tableau 2. Répartition des outils portatifs selon les cinq classes d'outils 13
Tableau 3. Durée d'utilisation des différentes classes d'outil (pour les mécaniciens qui utilisent ces outils) 13
Tableau 4. Tâches les plus courantes pour chaque classe d'outil 14
Tableau 5. Répartition des clés pneumatiques selon le carré d'entraînement 15
Tableau 6. Répartition des clés pneumatiques selon le fabricant 15
Tableau 7. Résultats des mesures dans les garages pour les clés pneumatiques 17
Tableau 8. Vibration des clés pneumatiques, banc de première génération 19
Tableau 9. Puissance acoustique des clés pneumatiques, banc de première génération....20
Tableau 10. Vibration des clés pneumatiques, banc de deuxième génération 21
Tableau 11. Puissance acoustique des clés pneumatiques, banc de deuxième génération 22
Tableau 12. Sources de bruit pour la clé pneumatique *A1* 25
Tableau 13. Sommaire des résultats en laboratoire pour les clés pneumatiques 26
Tableau 14. Répartition des clés pneumatiques à impact selon le carré d'entraînement....27
Tableau 15. Répartition des clés pneumatiques à impact selon le fabricant....27
Tableau 16. Résultats des mesures dans les garages pour les clés pneumatiques à impact....29
Tableau 17. Vibration des clés pneumatiques à impact, banc de première génération 31
Tableau 18. Puissance acoustique des clés pneumatiques à impact, banc de première génération 32
Tableau 19. Vibration des clés pneumatiques à impact, banc de deuxième génération 33
Tableau 20. Vibration des clés pneumatiques à impact, effet de la posture (roue horizontale) ...34
Tableau 21. Puissance acoustique des clés pneumatiques à impact, banc de deuxième génération....35
Tableau 22. Sources de bruit pour les clés pneumatiques à impacts *A1* et *A2* 39
Tableau 23. Sommaire des résultats en laboratoire pour les clés pneumatiques à impact....40
Tableau 24. Répartition des meuleuses et des meuleuses d'outillage selon le fabricant....42
Tableau 25. Résultats des mesures dans les garages pour les meuleuses d'outillage....43
Tableau 26. Vibration des meuleuses d'outillage, banc de première génération....45
Tableau 27. Puissance acoustique des meuleuses d'outillage, banc de première génération....45
Tableau 28. Vibration des meuleuses d'outillage, banc de deuxième génération 47
Tableau 29. Puissance acoustique des meuleuses d'outillage, banc de deuxième génération....47
Tableau 30. Sources de bruit pour la meuleuse d'outillage *A6*....50
Tableau 31. Sommaire des résultats en laboratoire pour les meuleuses d'outillage....50
Tableau 32. Vibration des meuleuses, banc de première génération 52
Tableau 33. Puissance acoustique des meuleuses, banc de première génération 52
Tableau 34. Vibration des meuleuses, banc de deuxième génération....53
Tableau 35. Puissance acoustique des meuleuses, banc de deuxième génération 53
Tableau 36. Sommaire des résultats en laboratoire pour les meuleuses 54
Tableau 37. Répartition des ponceuses selon le fabricant 55
Tableau 38. Résultats des mesures dans les garages pour les ponceuses 56
Tableau 39. Vibration des ponceuses, banc de première génération 58
Tableau 40. Puissance acoustique des ponceuses, banc de première génération....58

Tableau 41. Sommaire des résultats en laboratoire pour les ponceuses 59
Tableau 42. Répartition des marteaux pneumatiques selon le fabricant.....59
Tableau 43. Résultats des mesures dans les garages pour les marteaux pneumatiques.....60
Tableau 44. Vibration des marteaux pneumatiques, banc de première génération 62
Tableau 45. Puissance acoustique des marteaux pneumatiques, banc de première génération....62
Tableau 46. Vibration des marteaux pneumatiques, banc de deuxième génération 63
Tableau 47. Puissance acoustique des marteaux pneumatiques, banc de deuxième génération...64
Tableau 48. Sommaire des résultats en laboratoire pour les marteaux pneumatiques.....65
Tableau 49. Sommaire des niveaux vibratoires selon les classes d'outils.....67
Tableau 50. Sommaire des niveaux acoustiques selon les classes d'outils 69
Tableau 51. Calcul de l'émission vibratoire pour une clé pneumatique à impact 95

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Surface de mesure de la pression pour le calcul de la puissance acoustique 8
Figure 2. Schéma et photo du montage expérimental de mesure de la puissance acoustique 9
Figure 3. Systèmes de coordonnées biodynamique et basicentrique pour l'évaluation de l'exposition aux vibrations main-bras 10
Figure 4. Fixation d'un accéléromètre triaxial avec collier de serrage 10
Figure 5. Facteur de pondération W_h en fonction de la fréquence 11
Figure 6. Utilisation de la clé pneumatique dans les garages 16
Figure 7. Dispositif de freinage 18
Figure 8. Banc d'essai de première génération pour la clé pneumatique 18
Figure 9. Banc d'essai de deuxième génération pour la clé pneumatique 21
Figure 10. Spectres de puissance acoustique, clés pneumatiques, deuxième génération 23
Figure 11. Spectres de puissance acoustique, clé *B2* 23
Figure 12. Spectre du niveau de pression moyen dans les garages, clé *B3* 24
Figure 13. Identification des sources de bruit d'une clé pneumatique 25
Figure 14. Utilisation de la clé pneumatique à impact dans les garages 28
Figure 15. Banc d'essai de première génération pour la clé pneumatique à impact 30
Figure 16. Banc d'essai de deuxième génération pour la clé pneumatique à impact 32
Figure 17. Posture de l'opérateur, roue horizontale 34
Figure 18. Spectres de puissance acoustique, deuxième génération, outils *A1* et *A2* 36
Figure 19. Spectres de puissance acoustique, outil *A1* 36
Figure 20. Spectres de puissance acoustique, outil *A2* 37
Figure 21. Spectre du niveau de pression moyen dans les garages, outil *A2* 37
Figure 22. Vue éclatée de la clé à impact *A1* 38
Figure 23. Identification des sources de bruit d'une clé pneumatique à impact 39
Figure 24. Meuleuse avec disque à couper (a), meuleuse d'outillage avec pointe au carbure (b) 41
Figure 25. Utilisation de la meuleuse d'outillage dans les garages 43
Figure 26. Banc d'essai de première génération pour la meuleuse d'outillage 44
Figure 27. Banc d'essai de deuxième génération pour la meuleuse d'outillage 46
Figure 28. Spectres de puissance acoustique, outil *C5*, deuxième génération 48
Figure 29. Spectres de puissance acoustique, outil *C5* 48
Figure 30. Spectre du niveau de pression moyen dans les garages, outil *C5* 49
Figure 31. Banc d'essai de première génération pour la meuleuse 51
Figure 32. Utilisation de la ponceuse dans les garages 55
Figure 33. Trajectoire en huit du déplacement de l'outil sur la plaque 56
Figure 34. Banc d'essai de première génération pour la ponceuse 57
Figure 35. Utilisation du marteau pneumatique dans les garages 60
Figure 36. Banc d'essai de première génération pour le marteau pneumatique 61
Figure 37. Banc d'essai de deuxième génération pour le marteau pneumatique 63
Figure 38. Spectres de puissance acoustique, outil *B2* 64
Figure 39. Spectre du niveau de pression moyen dans les garages, outil *B2* 65
Figure 40 : Source de référence Campagna 85
Figure 41 : Directivité de la source Campagna 86

Figure 42 : Source de référence BK....86
Figure 43 : Directivité de la source BK....87
Figure 44 : Répétabilité de la mesure de puissance acoustique sur la source Campagna....88
Figure 45 : Répétabilité de la mesure de puissance sur la source BK....88
Figure 46 : Validation de la fiabilité de la source de référence BK....89
Figure 47 : Comparaison entre la mesure et la référence de puissance acoustique pour la source BK....90
Figure 48 : Écart entre mesure et référence de puissance pour les deux sources (Campagna et BK)....91
Figure 49 : Comparaison entre les mesures avec et sans opérateur....92
Figure 50 : Écart entre mesures avec et sans opérateur....93
Figure 51 : Directivité sans opérateur sur la source Campagna....93
Figure 52 : Directivité avec opérateur sur la source Campagna....94

1. INTRODUCTION

1.1 Problématique de bruit/vibrations chez les mécaniciens automobiles

Selon les statistiques de la CSST, environ 4 % des 1600 nouveaux cas de surdité professionnelle déclarés chaque année au Québec proviennent du secteur de la mécanique automobile et des véhicules lourds (autobus, camions, etc.) [1]. Le secteur des services automobiles regroupe plus de 10 000 petites et moyennes entreprises qui emploient environ 60 000 personnes. Cependant, ce chiffre sous-estime probablement le nombre de cas de surdité professionnelle dans ce secteur. En effet, le secteur des services automobiles compte un grand nombre de petites entreprises ayant moins de 3 employés, pour lesquelles les travailleurs sont généralement moins bien sensibilisés aux problèmes reliés à l'exposition au bruit ainsi qu'aux vibrations.

Bien que l'exposition des mécaniciens aux contaminants chimiques est relativement bien documentée, relativement peu d'études ont été effectuées sur l'exposition des mécaniciens au bruit ainsi qu'aux vibrations main-bras. Jayjock et coll. [2] ont évalué les risques professionnels que l'on retrouve dans un petit atelier de carrosserie employant deux travailleurs. En plus d'un échantillonnage des différents contaminants que l'on retrouve dans ce type d'entreprise (solvants organiques, isocyanates, poussières, etc.), une étude dosimétrique de bruit étalée sur 10 jours a été effectuée. Les résultats de cette étude suggèrent que ces travailleurs peuvent être exposés à des doses de bruit aussi élevées que 160 % de la limite permise (critère OSHA : 90 dB(A)/8h, facteur de bissection de 5 dB(A), correspond au critère utilisé au Québec selon le *Règlement sur la santé et la sécurité du travail*). Par ailleurs, les deux travailleurs de cette entreprise présentaient des symptômes du syndrome des vibrations (blanchiment et engourdissement intermittent des doigts), et ces symptômes étaient plus prononcés lors de la saison froide. Une autre étude [3], réalisée dans deux garages, a révélé des niveaux de bruit de fond variant de 70 à 115 dB(A). Des examens audiologiques des 57 mécaniciens travaillant dans ces deux garages ont démontré que 35 % de ceux-ci avaient une perte auditive significative.

Plus récemment, une étude a été effectuée sur la prévalence du syndrome des vibrations chez les mécaniciens automobiles [4, 5]. Dans un premier temps, un questionnaire portant sur les symptômes neurologique et vasculaire du syndrome des vibrations a été administré à 806 mécaniciens. Parmi les répondants, 24 % ont rapporté des attaques de blanchiment des doigts, 25 % ont rapporté des engourdissements des doigts persistant, tandis que 13 % ont rapporté une diminution de la force de préhension. Par la suite, un examen clinique des mécaniciens ayant rapporté des symptômes du syndrome des vibrations a permis d'estimer une prévalence de 15 % du syndrome de Raynaud (atteinte vasculaire) sur l'ensemble des mécaniciens (toutes périodes d'expositions confondues), principalement en phase 2 de la maladie selon la classification de Stockholm [6], ainsi qu'une prévalence de 25 % après une exposition de 20 ans. De plus, l'examen clinique a révélé, sur l'ensemble des mécaniciens (toutes périodes d'expositions confondues), une prévalence de 25 % d'atteinte neurologique, principalement en phase 2, ainsi qu'une prévalence de 40 % après une exposition de 20 ans. Par ailleurs, une étude effectuée sur 42 travailleurs du secteur de la carrosserie [7] a révélé que ceux-ci sont exposés aux vibrations main-bras, en moyenne, de 22 à 72 minutes par jour. Selon cette étude, les types d'outils

pneumatiques les plus utilisés par ces travailleurs sont les meuleuses, les ponceuses ainsi que les clés à impacts.

Une large étude effectuée en Suède auprès de 26 garages [8] a montré que les mécaniciens sont exposés, en moyenne, à une accélération pondérée, selon la norme ISO 5349-1 [9], de 3,5 m/s^2, et ce sur une période d'exposition quotidienne moyenne de 14 minutes. Pour une telle exposition, la norme ISO 5349-1 prédit une prévalence du syndrome de Raynaud de seulement 3 % après 20 ans. Les auteurs en ont donc conclu que la relation dose-effet de la norme ISO 5349-1 sous estime de façon importante la prévalence du syndrome de Raynaud chez les mécaniciens automobiles.

Les travailleurs du secteur des services automobiles sont principalement exposés au bruit des outils portatifs pneumatiques, et plus particulièrement au bruit des clés pneumatiques, des clés pneumatiques à impacts, des marteaux pneumatiques, ainsi que des meuleuses pneumatiques et électriques [10]. De plus, les ponceuses électriques et pneumatiques sont très utilisées dans le sous-secteur de la carrosserie, et ce type d'outil est reconnu pour produire des amplitudes vibratoires élevées [11].

Le contrôle du bruit émis par les outils portatifs constitue une problématique complexe, étant donné que les travailleurs sont exposés à la composante directe du bruit rayonné par l'outil. Ceci rend difficile l'utilisation des techniques classiques de contrôle du bruit, telles que les enceintes acoustiques pour isoler le travailleur de l'outil bruyant ou encore le traitement des locaux avec des matériaux acoustiques absorbants pour atténuer la composante diffuse du bruit. La proximité de la source de bruit des oreilles du travailleur représente un important défi. En effet, la distance maximale entre les oreilles du travailleur et l'outil portatif est de l'ordre de 1 mètre. Souvent, les outils peuvent se trouver à quelques centimètres seulement des oreilles du travailleur, soumettant celui-ci à des niveaux de bruit très élevés.

1.2 Problématique relié au choix d'outils moins bruyant et/ou moins vibrant

Par ailleurs, les données concernant les niveaux de bruit et de vibration émis par les différents outils portatifs sont difficilement disponibles, rendant très difficile la prise en compte des critères bruit et vibrations lors de l'achat d'un outil. Même lorsque ces données sont disponibles, elles sont difficilement utilisables puisqu'en Amérique du Nord, les méthodes de mesure peuvent différer d'un manufacturier à l'autre. Dans le cas des vibrations main-bras, des normes [12] (série ISO 8662) définissent des procédures à appliquer en laboratoire pour déterminer des valeurs d'émission vibratoire d'outils portatifs. En ce qui concerne le bruit, la norme ISO 15744 [13] permet de caractériser le bruit émis par les outils seuls, mais sans tenir compte du bruit généré par le contact entre la pièce et l'outil.

1.3 Limitations des normes actuelles pour les mesures de bruit/vibration sur les outils portatifs

Les conditions d'opération des outils portatifs pneumatiques (pression pneumatique, forces appliquées sur l'outil, type de pièce à travailler, etc.) ont une influence importante sur les caractéristiques du bruit rayonné par l'outil et des vibrations transmises aux mains [14]. Les différentes normes sont destinées à déterminer des valeurs d'émission vibratoire et sonore des outils afin d'identifier les modèles susceptibles de présenter des niveaux d'exposition les moins élevés. Toutefois, elles ne tiennent que partiellement compte des composantes du bruit et des vibrations liées à l'interaction des outils avec la pièce à travailler. Dans un contexte où les conditions d'opération sont un critère important qui permettrait de réduire les niveaux d'exposition au bruit et aux vibrations, il existe un besoin de connaître les différents facteurs qui influencent les niveaux de bruit et de vibrations. Parmi ceux-ci, on peut citer les interactions pièce-outil, la pression d'alimentation pneumatique, la force de poussée appliquée sur l'outil, la distribution spatiale du bruit rayonné par les outils (directivité) et le contenu fréquentiel du bruit émis. Il est donc important de développer de nouveaux bancs de test permettant de reproduire de façon représentative les principales conditions d'opération des outils, en y intégrant à la fois les diverses interactions entre l'outil et la pièce travaillée ainsi que la position du travailleur vis-à-vis de l'outil.

2. OBJECTIFS DE L'ÉTUDE

L'objectif de cette étude est de caractériser, dans des conditions de laboratoire s'approchant des conditions d'opération réelles dans les ateliers de réparation automobile du Québec, le bruit et les vibrations émis par différentes catégories d'outils portatifs couramment utilisées.

L'atteinte de cet objectif dépend de la réalisation de cinq sous objectifs spécifiques :

1) Pour chaque catégorie d'outil, choisir les modèles d'outils les plus courants, incluant au moins un outil étant reconnu comme étant moins bruyant ou moins vibrant, et déterminer leurs caractéristiques vibratoires et sonores en milieu de travail;
2) Élaborer et mettre en œuvre des bancs d'essai acoustiques et vibratoires tels que définis par les différentes normes ISO;
3) Élaborer et mettre en œuvre des bancs d'essai pour inclure l'interaction des outils avec les pièces à travailler;
4) Caractériser les vibrations et le bruit des outils sur les bancs d'essai modifiés (sources, contenu fréquentiel);
5) Rechercher les outils ou configurations de travail les moins bruyants ou minimisant l'exposition aux vibrations main-bras et identifier des pistes de solutions en vue de la réduction de l'exposition au bruit et aux vibrations.

3. METHODE

3.1 Choix des outils

Cinq classes d'outils ont été identifiées, en collaboration avec l'Association sectorielle paritaire Services automobiles, comme étant problématique. Il s'agit des clés pneumatiques, des clés pneumatiques à impact, des marteaux pneumatiques, des ponceuses et des meuleuses. Un questionnaire a été soumis à 40 mécaniciens (voir le questionnaire à l'annexe A), proportionnellement au nombre de travailleurs dans les principaux secteurs d'activité, selon une estimation de la répartition des travailleurs fournie par l'Association sectorielle Services Automobiles. Le questionnaire avait été préalablement validé auprès de 3 mécaniciens. La répartition des répondants selon le secteur d'activité est présentée au tableau 1.

Tableau 1. Répartition des répondants par secteur d'activité

Secteur d'activité	Nombre de répondants	Répartition
Mécanique générale (automobile)	15	38 %
Ateliers de carrosserie	10	25 %
Mécanique générale (camion)	3	7 %
Autres (suspension, électricité, pneus, transmission, moteur)	12	30 %
Total	**40**	**100 %**

Chaque mécanicien a été rencontré individuellement par un responsable du projet pour compléter le questionnaire. Les résultats de ce sondage ont servi à déterminer les modèles d'outils les plus utilisés ainsi qu'à identifier les tâches perçues comme étant les plus problématiques par les travailleurs. L'identification de ces tâches a permis d'orienter la prise des mesures en milieu de travail ainsi que d'aider à la conception des bancs d'essai incluant l'interaction entre l'outil et la pièce à travailler.

3.2 Mesure de la puissance acoustique en laboratoire

Une salle semi-anéchoïque a été utilisée pour les mesures de la puissance acoustique en laboratoire. Cette salle ayant des parois très absorbantes, permet d'assumer une propagation en champ libre des ondes acoustiques produites par la source. Le sol, quant à lui, réfléchit ces ondes sans les absorber. Pour une salle anéchoïque ou semi-anéchoïque, il suffit de connaître le niveau de pression sur une surface fermée entourant la source pour en déduire la puissance acoustique. Dans le cas d'une salle semi-anéchoïque, étant donné que le sol est réfléchissant, la surface fermée est limitée à une surface se trouvant au dessus du sol (voir figure 1). Pour ce cas particulier, toute la puissance acoustique émise par la source vers le bas est réfléchie puis traverse la surface considérée.

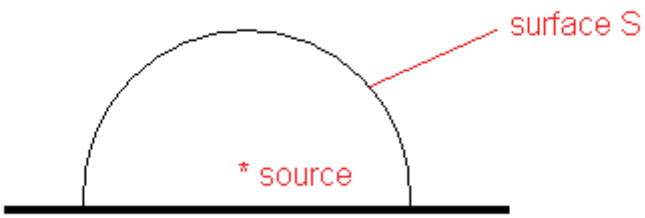
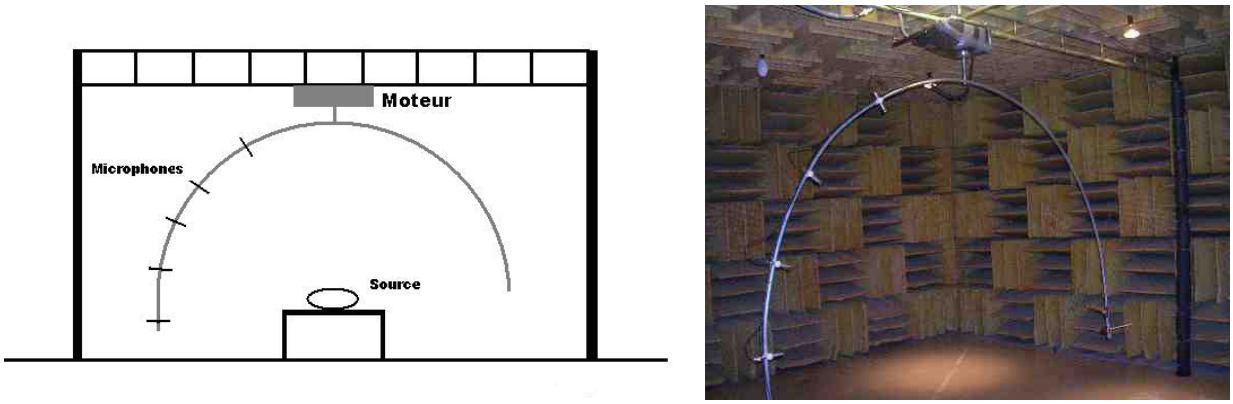


Figure 1. Surface de mesure de la pression pour le calcul de la puissance acoustique

3.2.1 Description de la méthode de mesure de la puissance acoustique

La norme international ISO 3745 « *Acoustique – Détermination des niveaux de puissance acoustique émis par les sources de bruit – Méthodes de laboratoire pour les salles anéchoïque et semi-anéchoïque* » [15] précise différentes méthodes pour mesurer la pression acoustique sur la surface fermée. La configuration qui a été retenue pour les mesures de puissance acoustique consiste en 5 microphones déplacés sur une trajectoire circulaire autour de la source. Les microphones sont placés sur une antenne semi-circulaire qui balaie pendant la mesure un hémisphère (voir figure 2). Le système de mesure s'appuie sur une structure formée de deux poteaux métallique recouverts de mousse mélanine et d'un rail qui sert de support au moteur. Ce moteur entraîne en rotation selon l'axe vertical l'antenne semi-circulaire en aluminium sur laquelle sont fixés les cinq microphones. Pour la mesure de la puissance acoustique, chaque microphone balaie une aire équivalente égale aux autres microphones. La source est placée au centre du volume balayé par l'antenne. L'antenne a un rayon de 1,3 m (distance entre les microphones et la source). En fonction des types d'outils portatifs testés, les mesures de la puissance acoustiques ont été effectuées en se basant sur les dispositions de la norme ISO 15744 [13]. La mesure de la puissance acoustique est réalisée sur une période de 35 secondes, le temps que l'antenne avec les cinq microphones fasse un tour complet. Pour que les essais soient valides, il faut que l'écart-type entre trois mesures successives soit inférieur à 1,5 dB(A).



(a) **(b)**

Figure 2. Schéma et photo du montage expérimental de mesure de la puissance acoustique

3.2.2 Caractérisation du système de mesure

La caractérisation du système de mesure de la puissance acoustique est présentée à l'annexe B du présent rapport. La calibration du système à l'aide de deux différentes sources de référence montre que le système de mesure se qualifie pour les fréquences supérieures à 200 Hz (ce qui correspond à la fréquence de coupure de la salle semi-anéchoïque). Par ailleurs, l'élévation de la source sur un socle de béton de 0,75 m de hauteur ainsi que la présence d'un opérateur entre la source et les microphones de mesure n'affectent pas la mesure de la puissance acoustique de façon significative. Cependant, la présence d'un opérateur près de la source ne permet pas de mesurer la directivité de celle-ci à cause du masquage de la source par l'opérateur.

3.3 Mesure de l'émission vibratoire des outils portatifs

Les mesures vibratoires sont effectuées en concordance avec la norme internationale ISO 5349-1 « Vibrations mécaniques – Mesurage et évaluation de l'exposition des individus aux vibrations transmises par les mains – Partie 1 : Exigences générales » [9]. Les mesures vibratoires présentées dans ce document ont été effectuées à l'aide d'un accéléromètre triaxial de haute capacité *PCB 356B20* ayant une gamme dynamique de ± 49 000 m/s^2. Les mesures sont effectuées pour les trois axes orthogonaux (x_h, y_h et z_h) du système de coordonnés basicentriques, tel que défini à la figure 3. L'accéléromètre est fixé de façon rigide sur la poignée de l'outil à l'aide d'un collier de serrage, tel qu'illustré à la figure 4. Pour les mesures effectuées sur des outils percutants, il faut s'assurer qu'il n'y a pas de saturation des signaux ni de dérive DC. Par ailleurs, dans le cas des outils ayant deux poignées, les mesures vibratoires doivent être effectuées sur chacune des poignées.

Les mesures vibratoires sont effectuées selon les trois axes dans la gamme de fréquences de 4 à 2000 Hz. Un facteur de pondération W_h qui dépend de la fréquence (voir figure 5), est appliqué

sur chacun des trois axes. Par la suite, le niveau de vibration global a_{hw} est calculé en effectuant la somme vectorielle selon chacun des trois axes :

$$a_{hw} = \sqrt{a_{hwx}^{\ 2} + a_{hwy}^{\ 2} + a_{hwz}^{\ 2}}$$

où a_{hwx}, a_{hwy} et a_{hwz} sont respectivement les accélérations pondérées dans les axes x_h, y_h et z_h.

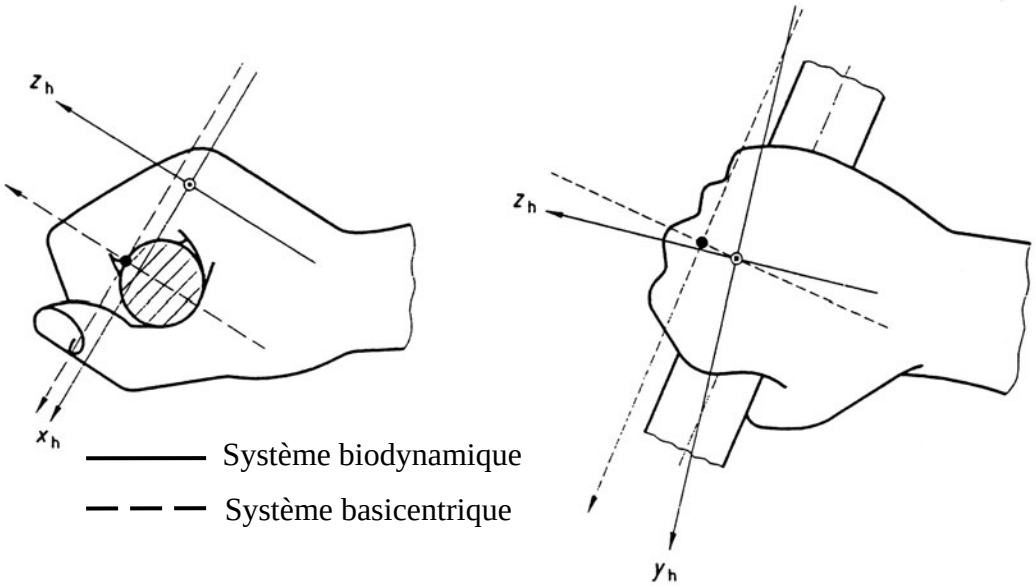


Figure 3. Systèmes de coordonnées biodynamique et basicentrique pour l'évaluation de l'exposition aux vibrations main-bras
Source : Norme ISO 5349-1 [9]

Figure 4. Fixation d'un accéléromètre triaxial avec collier de serrage

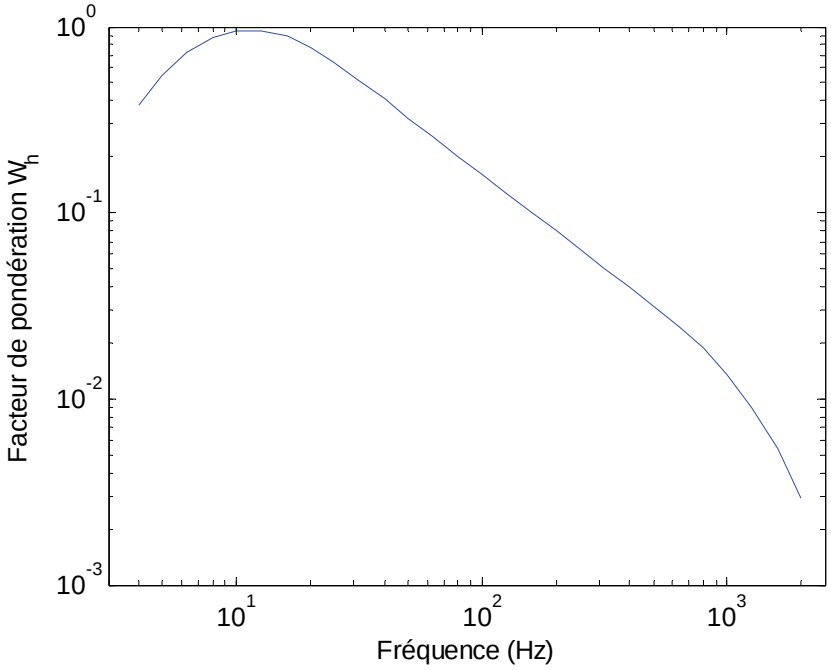


Figure 5. Facteur de pondération W_h en fonction de la fréquence

4. RÉSULTATS

4.1 Résultats du sondage

Un total de 292 outils portatifs, faisant partie des cinq classes d'outils identifiés comme étant problématiques, ont été répertoriés auprès des 40 mécaniciens sondés. La répartition de ces outils portatifs selon les différentes classes d'outils est présentée au tableau 2. Par ailleurs, pour chacune des cinq classes d'outils, les durées d'utilisation hebdomadaire minimale, maximale et moyenne (par mécanicien) sont présentées au tableau 3. On constate que les outils les plus utilisés sont les ponceuses, les meuleuses ainsi que les clés pneumatiques à impact. Les principales tâches effectuées par les mécaniciens pour chacune des classes d'outil, selon les résultats du sondage, sont rapportées au tableau 4.

Tableau 2. Répartition des outils portatifs selon les cinq classes d'outils

Classe d'outil	Nombre d'outils répertoriés	Répartition
Clé pneumatique	79	27 %
Clé pneumatique à impact	74	25 %
Marteau pneumatique	39	13 %
Meuleuse	78	27 %
Ponceuse	22	8 %
Total	**292**	**100 %**

Tableau 3. Durée d'utilisation des différentes classes d'outil (pour les mécaniciens qui utilisent ces outils)

	Durée d'utilisation par semaine (heures)		
Classe d'outil	**Minimale**	**Maximale**	**Moyenne**
Clé pneumatique	0,2	20	5,4
Clé pneumatique à impact	0,1	40	9,2
Marteau pneumatique	0	15	1,5
Meuleuse	0,1	25	10,7
Ponceuse	1,0	20	16,0

Tableau 4. Tâches les plus courantes pour chaque classe d'outil

Classe d'outil	Tâches les plus courantes
Clé pneumatique	Visser dévisser
	Démontage de pièces
Clé pneumatique à impact	Changer une roue
	Visser dévisser (gros boulons)
Marteau pneumatique	Couper des boulons, des rivets, de la tôle
	Séparer des pièces (soudées ou rouillées)
Meuleuse	Couper (« cutting wheel »)
	Meuler (meuleuse d'outillage)
	Poncer
	Nettoyer (brosse)
Ponceuse	Poncer (finition)

Note :

Pour chaque classe d'outil, seulement 4 à 5 modèles ont été sélectionnés, le choix des outils n'étant pas exhaustif. Il représente plutôt un échantillon limité des modèles d'outil disponibles sur le marché. Donc, les résultats présentés dans ce rapport ne visent pas en la recommandation de modèles d'outils particuliers, mais plutôt en la recommandation de critères de sélection pour ces outils.

4.2 Clé pneumatique (« air ratchet »)

La clé pneumatique à cliquet est un outil portatif qui est très utilisé par les mécaniciens pour visser et dévisser des petits boulons requérant un couple peu élevé. Lorsque le boulon est serré, les mécaniciens utilisent d'abord le bras de levier de la clé pour débloquer le boulon, puis font fonctionner l'outil pour dévisser complètement le boulon. Lors du serrage, ils font fonctionner l'outil jusqu'au blocage du boulon. Si la force de serrage leur semble insuffisante, ils complètent le serrage manuellement en utilisant le bras de levier fournit par l'outil. Pour les outils les plus puissants, certains mécaniciens déplorent l'absence d'un mécanisme d'arrêt en fin de course de serrage du boulon. Dans ce cas, le manche de l'outil tourne autour de la douille bloquée par le boulon, ce qui peut entraîner des risques de blessure par coincement des doigts ou encore un choc dans les mains et les bras. Pour atténuer ce contrecoup, certains mécaniciens retiennent le boyau d'alimentation en air comprimé de l'outil avec l'autre main.

La position de l'échappement est un paramètre important pour le confort de l'outil. Les mécaniciens préfèrent lorsque l'échappement d'air de l'outil est orienté vers le côté. L'échappement d'air vers l'arrière ayant tendance à refroidir le poignet et l'avant bras. L'échappement d'air vers l'avant peut renvoyer vers l'opérateur des saletés se trouvant sur la pièce travaillée. Certains outils ont l'échappement d'air orientable, ce qui est apprécié par de nombreux utilisateurs. Par ailleurs, l'outil peut devenir très froid lors d'une l'utilisation prolongée. La présence d'une gaine isolante entre l'outil et la main est appréciée par certains

mécaniciens. Les mécaniciens ayant répondu au sondage ne trouvent pas cet outil particulièrement vibrant, mais la plupart le trouvent bruyant. Certains mécaniciens préfèrent utiliser des tournevis électriques à batterie pour visser et dévisser certains boulons.

4.2.1 Sélection des outils

Un total de 79 clés pneumatiques a été répertorié auprès des 40 mécaniciens participant au sondage. La majorité de ces outils (49 %) ont un carré d'entraînement de 3/8" (voir tableau 5). Par ailleurs, les trois fabricants les plus populaires pour ces outils sont *Snap-on* (incluant *Blue-Point*), *Ingersoll-Rand* et *Chicago Pneumatic* (voir tableau 6). Ces trois fabricants représentent 86 % des clés pneumatiques répertoriées lors du sondage. Trois clés pneumatiques, parmi les plus vendues chez ces trois fabricants, ont été choisies pour les bancs de test. La liste des outils testés en laboratoire se trouve à l'Annexe du présent rapport. Les mesures terrains effectuées dans les garages ont été réalisées avec les clés pneumatiques appartenant aux mécaniciens.

Tableau 5. Répartition des clés pneumatiques selon le carré d'entraînement

Carré d'entraînement	Nombre d'outils répertoriés	Répartition
1/4"	21	27 %
3/8"	39	49 %
1/2"	8	10 %
Inconnu	11	14 %
Total	**79**	**100 %**

Tableau 6. Répartition des clés pneumatiques selon le fabricant

Fabricant	Nombre d'outils répertoriés	Répartition
Blue-Point / Snap-on	32	40 %
Ingersoll-Rand	19	24 %
Chicago Pneumatic	6	8 %
Campbell Hausfeld	4	5 %
Autres	14	18 %
Inconnu	4	5 %
Total	**79**	**100 %**

4.2.2 Mesures dans les garages

Des mesures vibratoires et sonores ont été effectuées pour cinq clés pneumatiques lors de l'exécution de tâches réelles en milieu de travail. Les mesures ont été effectuées dans deux garages différents, et consistaient à visser et à dévisser des petits boulons sous le capot, tel qu'illustré à la figure 6. Les mesures vibratoires ont été effectuées à l'aide d'un accéléromètre triaxial rigidement fixé à la poignée de l'outil (voir section 3.3, page 9). Le bruit a été mesuré au niveau de chaque oreille du travailleur à l'aide des microphones binauraux *Brüel & Kjær 4101*. Les mesures vibratoires et sonores ont été effectuées de façon simultanée à l'aide de l'analyseur multicanaux *Orchestra* de *01dB*. Les mesures ont été effectuées pendant la pause repas du midi afin d'éviter les bruits parasites provenant des autres travailleurs.

(a) **(b)**

Figure 6. Utilisation de la clé pneumatique dans les garages

Les résultats obtenus sont résumés au tableau 7. Un minimum de quatre mesures a été effectué pour chacun des outils. La pression d'alimentation des outils, mesurée à la sortie du compresseur, variait de 120 à 150 PSI, dépendamment du garage testé. La durée des mesures variait de 1,1 à 13,4 secondes. Pour les deux premiers outils, la mesure a été effectuée sur une séquence de 3 ou 4 boulons (vissage ou dévissage), tandis que pour les trois derniers outils, la mesure a été effectuée sur une séquence de 1 boulon. Le niveau moyen de vibration mesuré sur ces outils est de 7,90 m/s^2 pondéré W_h, avec un écart important entre les valeurs limites (3,75 à 13,36 m/s^2 W_h). Les niveaux de bruit mesurés à l'oreille gauche varient de 93,9 à 101,5 dB(A), avec une valeur moyenne 97,1 dB(A), tandis que pour l'oreille droite, les niveaux de bruit se situent entre 92,1 et 108,5 dB(A), avec une valeur moyenne de 98,5 dB(A). On note un écart 6 à 8 dB(A) du niveau de bruit entre les deux oreilles pour les deux premiers outils. Cet écart est attribuable à la réflexion du bruit de l'outil sur le capot de l'automobile et au fait que les mécaniciens soient droitiers (voir figure 6).

Tableau 7. Résultats des mesures dans les garages pour les clés pneumatiques

Outil	Tâche	Pression (PSI)	Durée (s)	Niveau Vibratoire (m/s^2, W_h)	L_{eq} oreille gauche (dB(A))	L_{eq} oreille droite (dB(A))
1	Visser / dévisser 3-4 boulons	120	13,0	5,92	94,6	100,7
			12,1	6,93	99,9	108,5
			10,8	4,77	98,1	105,0
			13,4	7,17	95,2	103,2
2	Visser / dévisser 3-4 boulons	120	11,9	5,43	99,4	106,0
			12,0	5,99	98,6	105,6
			7,8	6,69	99,7	105,4
			11,0	6,39	99,3	105,2
3	Visser / dévisser 1 boulon	150	1,1	3,75	93,9	94,3
			2,8	8,33	95,9	92,1
			2,0	6,83	96,6	93,2
			2,4	8,95	95,9	92,9
			1,5	6,03	94,4	92,7
			2,5	7,00	95,7	92,3
			2,2	6,36	95,4	92,6
4	Visser / dévisser 1 boulon	150	3,1	9,44	94,7	96,1
			3,4	10,78	95,1	97,0
			2,9	5,07	94,5	96,4
			2,9	5,20	94,0	96,9
			2,9	5,82	94,7	96,6
			3,1	9,72	95,6	97,4
			2,9	6,72	94,3	97,2
			3,1	10,03	95,6	97,3
5	Visser / dévisser 1 boulon	150	3,2	12,50	101,4	99,4
			2,8	13,36	100,1	99,0
			1,9	12,66	101,5	99,8
			3,5	11,22	100,1	98,0
			4,5	7,08	97,8	96,0
			2,9	10,48	100,3	98,8
			2,7	10,42	101,2	98,6
Moyenne				**7,90**	**97,1**	**98,5**
Écart-type				**2,58**	**2,57**	**4,64**
Minimum				**3,75**	**93,9**	**92,1**
Maximum				**13,36**	**101,5**	**108,5**

4.2.3 Banc d'essai de première génération

Le banc d'essai de première génération pour la clé pneumatique est basé sur la norme ISO 8662-7 : « *Machines à moteur portatives – Mesurage des vibrations au niveau des poignées – Partie 7 : Clés, tournevis et serreuses à percussion, à impulsion ou à cliquet* ». Un dispositif de freinage est utilisé pour ces mesurages. Le dispositif de petite taille décrit à l'annexe B de la norme ISO 8662-7 a été retenu. Celui est conçu pour les carrés d'entraînement de 1/4", 3/8", 1/2" et 5/8". Ce dispositif est illustré à la figure 7. Il consiste en un socle en acier (01), une paire de patin en phénolique stratifié qui freine la douille (02-03), une plaque en acier sur laquelle est monté le patin de frein externe (04), un couvercle en acier (05-06), une douille que la machine fait tourner (07), ainsi que des boulons, écrous et rondelles Belleville pour appliquer et ajuster la pression de contact entre la douille et le patin de frein (09-10). Par ailleurs, tel que recommandé par la norme, une fine couche de graisse de cuivre est utilisée comme lubrifiant entre le patin et la douille. Des photos du banc d'essai sont présentées à la figure 8. Pour l'ensemble des essais, la pression d'alimentation des outils pneumatiques est très proche de celle recommandée par les fabricants (90 PSI).

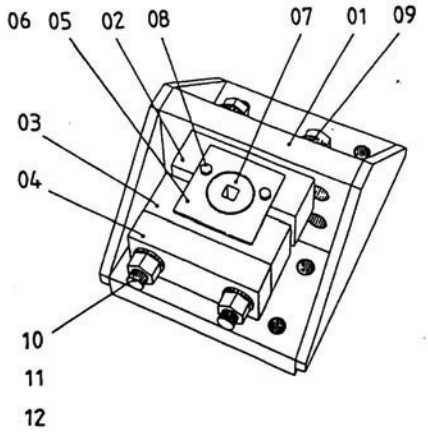
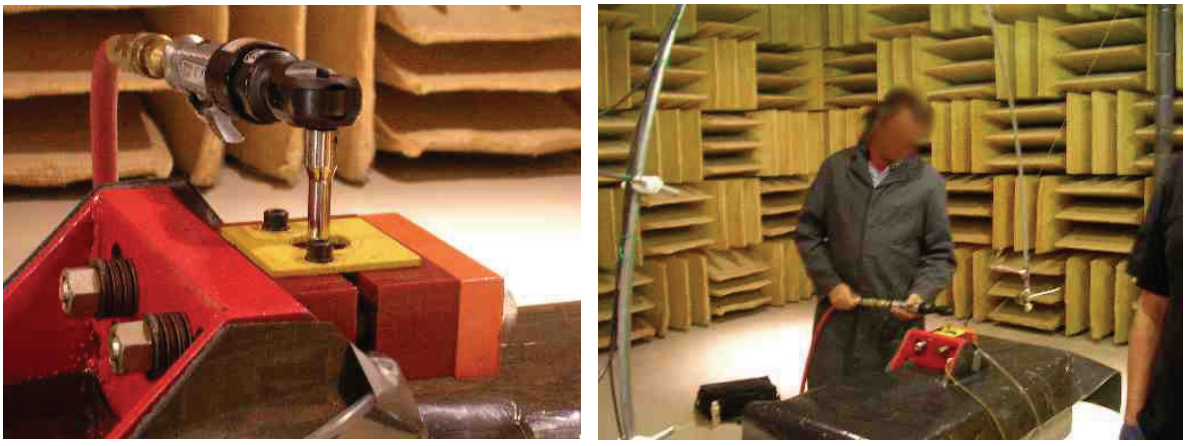


Figure 7. Dispositif de freinage
Source : Norme ISO 8662-7



(a) **(b)**

Figure 8. Banc d'essai de première génération pour la clé pneumatique

4.2.3.1 Mesures vibratoires

Les mesures vibratoires ont été réalisées en suivant les dispositions de la norme ISO 8662-7. Pour chacun des outils, trois opérateurs entraînés ont effectué cinq mesures vibratoires de dix secondes. Le détail de la procédure utilisée pour évaluer l'émission vibratoire des outils portatifs est disponible à la section 3.3, page 9. Les mesures en laboratoire ont été réalisées en utilisant un analyseur multicanaux *Pulse* de *Brüel & Kjær*. Le coefficient de variation d'une série de cinq mesures avec un même opérateur doit être inférieur à 0,15 (15 %) pour que la série soit valide. Selon la norme ISO 8662-7, la fréquence de rotation de l'outil dans le dispositif de freinage doit être maintenue à 0,15 ± 0,05 révolution/s, ce qui correspond à vitesse de rotation qui se situe entre 6 et 12 rpm. Cependant, pour les clés pneumatiques à rochet de type cliquet (communément appelées « *air ratchet* »), il n'est pas possible d'opérer l'outil à une vitesse de rotation aussi peu élevé. Ce problème est d'ailleurs soulevé dans la norme ISO 15744 [13]. Il a donc été choisi d'opérer les clés pneumatiques dans le dispositif de freinage à une vitesse de rotation de 150 rpm, celle-ci permettant d'opérer l'ensemble des clés pneumatiques testées de façon stable. La vitesse de rotation de l'outil a été mesurée à l'aide d'un tachymètre et ajustée en variant la pression appliquée par les patins.

Les résultats des mesures vibratoires effectuées sur le banc d'essai de première génération sont présentés au tableau 8. On y retrouve la capacité maximale de l'outil, exprimée en Newton-mètre (Nm), la pression d'alimentation de l'outil lors des essais (en PSI), le niveau d'accélération pondéré (W_h) moyen, de même que le coefficient de variation (COV) des cinq essais pour chacun des trois opérateurs accompagné de la valeur d'émission vibratoire de l'outil (global) qui consiste en la moyenne arithmétique des valeurs moyennes obtenues avec les trois opérateurs. Pour l'outil *B2*, les valeurs d'émission vibratoire ont été rapportées indépendamment pour deux outils différents, ce qui permet de donner un aperçu de la dispersion des valeurs d'émission vibratoires pour un même modèle d'outil. On note qu'il existe un écart important de la valeur d'émission vibratoire entre l'outil le moins vibrant (5,24 m/s^2, W_h) et l'outil le plus vibrant (12,54 m/s^2, W_h). Il y a également un écart de 15 % entre les valeurs d'émission vibratoire d'un même modèle d'outil (*B2*). L'écart entre deux opérateurs est encore plus élevé, et peut même être de l'ordre de 30-40 % pour un même outil testé.

Tableau 8. Vibration des clés pneumatiques, banc de première génération

Outil		Capa-cité (Nm)	Pres-sion (PSI)	Opérateur 1		Opérateur 2		Opérateur 3		
Fabri-cant	Modèle			(m/s^2 W_h)	COV	(m/s^2 W_h)	COV	(m/s^2 W_h)	COV	Global (m/s^2 W_h)
A	1	68	88	14,42	10 %	11,09	2 %	12,13	2 %	**12,54**
B	2	68	88	9,76	12 %	8,16	4 %	11,45	6 %	**9,79**
B	2	68	88	8,01	15 %	8,04	6 %	8,99	9 %	**8,35**
C	4	75	88	4,42	5 %	5,46	3 %	5,84	8 %	**5,24**

4.2.3.2 Mesures acoustiques

Pour les clés pneumatiques, la norme ISO 15744 [13] précise que les mesures doivent être faites en charge, dans le dispositif présenté à la section précédente, ainsi qu'à vide. Tout comme pour les mesures vibratoires, une fréquence de rotation de 150 rpm a été utilisée pour les essais en charge. Les résultats ainsi obtenus sont présentés au tableau 9. Pour chacun des outils testés, la moyenne du niveau de puissance acoustique des trois mesures successives, en dB(A), ainsi que l'écart-type sont donnés pour les essais en charge et ceux à vide. On note qu'il n'y a pas de différence significative entre les essais en charge et ceux à vide, ce qui semble indiquer que l'ajout de la charge sur l'outil n'a pas vraiment d'effet sur le bruit émis par celui-ci. On note également un écart de 4 dB(A) entre l'outil le moins bruyant et l'outil le plus bruyant.

Tableau 9. Puissance acoustique des clés pneumatiques, banc de première génération

Outil		Capa-cité (Nm)	Pres-sion (PSI)	Puissance acoustique			
				En charge		A vide	
Fabricant	Modèle			L_w dB(A)	Écart-type dB(A)	L_w dB(A)	Écart-type dB(A)
A	1	68	88	**102,4**	0,06	**102,9**	0,00
B	2	68	88	**100,3**	0,06	**100,2**	0,06
B	2	68	88	**99,6**	0,12	**100,0**	0,45
C	4	75	88	**98,0**	0,12	**98,3**	0,06

4.2.4 Banc d'essai de deuxième génération

Le banc d'essai de première génération simule une charge constante sur l'outil tandis qu'en réalité, il s'agit d'un phénomène transitoire. Un banc d'essai, constitué d'une jante de roue retenue à un moyeu fixe par l'intermédiaire de 10 tiges filetées, a été utilisé pour ces essais. Les tiges sont d'une longueur de 12 cm, avec un filet ½-13 UNC. Elles sont d'une dureté plus élevée que les écrous afin que se soit ces derniers qui s'usent, et non pas les tiges filetées. En effet, il est plus facile de changer les écrous que de changer les tiges filetées. Des photos du banc d'essai sont présentées à la figure 9.

(a)

(b)

Figure 9. Banc d'essai de deuxième génération pour la clé pneumatique

4.2.4.1 Mesures vibratoires

Tout comme pour le banc de première génération, chaque mesure vibratoire est effectuée sur une période de 10 secondes. Lors de cette période, l'opérateur a le temps de visser 3 écrous. Les résultats des mesures vibratoires effectuées sur le banc d'essai de deuxième génération sont présentés au tableau 10. Le niveau d'accélération pondéré (W_h) moyen, de même que le coefficient de variation (COV) des cinq essais pour chacun des trois opérateurs sont rapportés dans ce tableau. La valeur d'émission vibratoire de l'outil (global) consiste en la moyenne arithmétique des valeurs moyennes obtenues avec les trois opérateurs. Un quatrième outil, *B3*, a été testé sur ce banc d'essai. On note qu'avec le banc d'essai de deuxième génération, la valeur d'émission vibratoire entre l'outil le moins vibrant (4,05 m/s^2, W_h) et l'outil le plus vibrant (5,67 m/s^2, W_h) est relativement faible. Cependant, les coefficients de variation obtenus avec le banc d'essai de deuxième génération sont plus élevés par rapport à ceux obtenus avec le banc d'essai de première génération, ce qui indique une moins bonne répétabilité des essais pour chaque opérateur. Par contre, ce mode d'opération semble plus proche de l'utilisation d'une clé pneumatique en milieu de travail que le banc d'essai de première génération.

Tableau 10. Vibration des clés pneumatiques, banc de deuxième génération

Outil		Capa-cité (Nm)	Pres-sion (PSI)	Opérateur 1		Opérateur 2		Opérateur 3		
Fabri-cant	Modèle			(m/s^2 W_h)	COV	(m/s^2 W_h)	COV	(m/s^2 W_h)	COV	Global (m/s^2, W_h)
A	1	68	88	4,66	26 %	4,43	13 %	4,34	18 %	**4,48**
B	3	81	88	5,62	8 %	5,62	10 %	5,77	5 %	**5,67**
B	2	68	88	5,18	10 %	5,48	20 %	5,29	10 %	**5,32**
C	4	75	88	3,53	7 %	4,84	18 %	3,77	14 %	**4,05**

4.2.4.2 Mesures acoustiques

Pour les mesures acoustiques de deuxième génération, le dispositif constitué de tiges filetées et d'écrous, présenté à la section précédente, a été utilisé. La mesure de la puissance acoustique a été réalisée sur une période de 35 secondes, le temps que l'antenne avec les cinq microphones fasse un tour complet. Les résultats ainsi obtenus sont présentés au tableau 11. Pour chacun des outils testés, la moyenne du niveau de puissance acoustique des trois mesures successives, en dB(A), ainsi que l'écart-type sont présentés au même tableau. On note un écart de plus de 7 dB(A) entre l'outil le moins bruyant et l'outil le plus bruyant. Des exemples de spectres de la puissance acoustique en tiers d'octave, pour les bandes de 100 à 20000 Hz, sont présentés pour les outils *B3* et *B2* à la figure 10. Par ailleurs, une comparaison entre le banc d'essai de première génération et celui de deuxième génération est présenté à la figure 11 pour la clé pneumatique *B2*. On note que même si les niveaux globaux obtenus avec les deux bancs d'essai sont similaires, la puissance acoustique est surestimé en basse fréquence (< 250 Hz) et sous estimé pour les fréquences intermédiaires par rapport au banc de deuxième génération. Finalement, la figure 12 présente le spectre du niveau moyen de pression mesuré aux oreilles de l'opérateur lors de l'utilisation en milieu de travail. En comparant le spectre de la puissance acoustique de l'outil *B3*, mesuré sur le banc d'essai de deuxième génération (figure 11), avec le niveau de pression moyen, mesuré en milieu de travail (figure 12), on note que les distributions spectrales suivent la même tendance, confirmant une bonne représentativité de la tâche réelle en milieu de travail par le banc d'essai de deuxième génération.

Tableau 11. Puissance acoustique des clés pneumatiques, banc de deuxième génération

Outil		Capa-cité (Nm)	Pres-sion (PSI)	Puissance acoustique	
Fabricant	Modèle			L_w dB(A)	Écart-type dB(A)
A	1	68	88	**101,8**	0,10
B	3	81	88	**94,5**	0,31
B	2	68	88	**100,3**	0,17
C	4	75	88	**98,7**	0,06

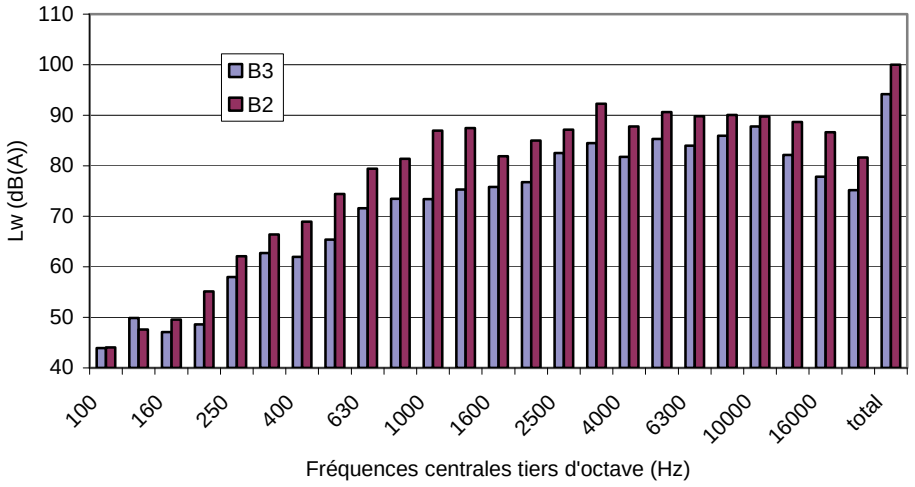


Figure 10. Spectres de puissance acoustique, clés pneumatiques, deuxième génération

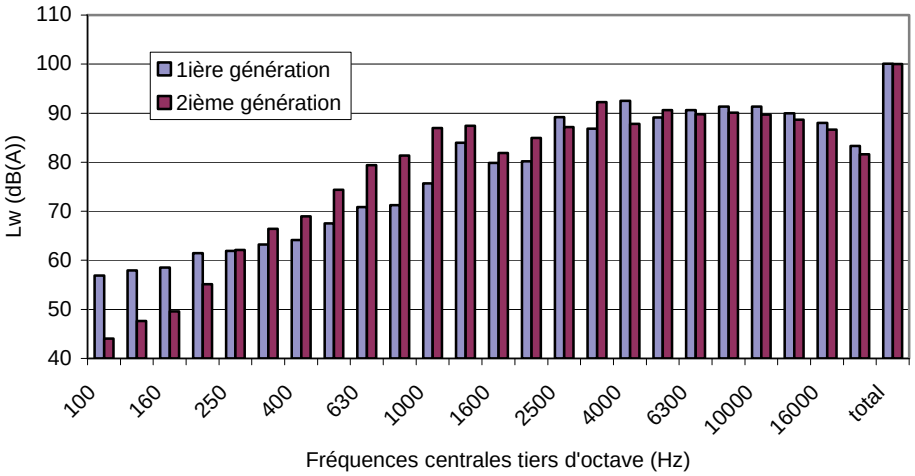


Figure 11. Spectres de puissance acoustique, clé *B2*

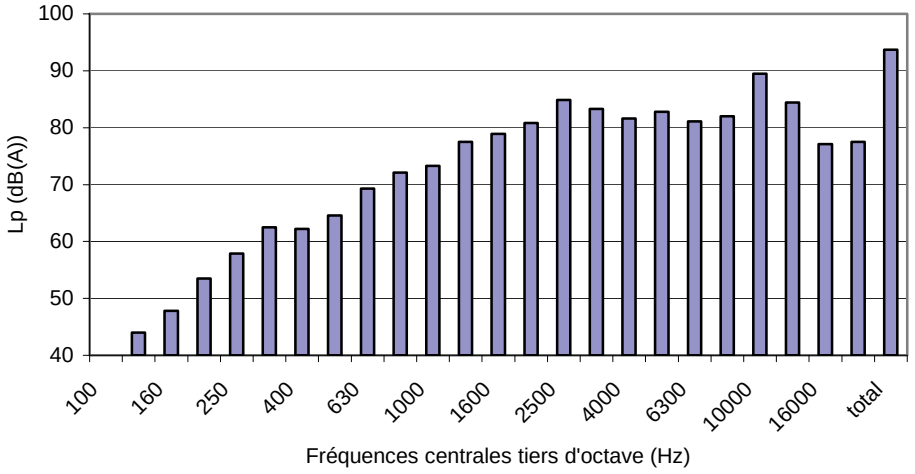


Figure 12. Spectre du niveau de pression moyen dans les garages, clé *B3*

4.2.5 Identification des sources de bruit

L'identification des sources de bruit a été effectuée sur une des clés pneumatiques, soit dans ce cas-ci la clé *A1*. La méthode utilisée pour identifier les sources de bruit consiste à masquer les sources de bruit de l'outil, soit avec de la pâte à modeler ou un matériau coupe son (*barymat*®), et de démasquer ensuite chacune des sources dont on veut estimer sa contribution au bruit rayonné par l'outil. Un exemple de masquage des sources de bruit sur une clé pneumatique est présenté à la figure 13. La contribution de chacune des sources sur la puissance acoustique rayonnée par l'outil est présentée au tableau 12. On note que le bruit de fond associé à la mesure, lorsque toutes les sources sont insonorisées, est de 83,7 dB(A). Il ressort de ce tableau que la source de bruit majeur sur cet outil est l'échappement de l'air comprimé, avec une puissance acoustique de 101,3 dB(A). Cette source est dominante puisque le bruit rayonné par l'outil lorsque l'échappement est isolé est de 97,6 dB(A). Donc, il y aurait un gain possible d'environ 5 dB(A) de réduction du bruit en ajoutant un silencieux sur l'échappement de l'outil.

Le bruit mécanique rayonné par le dispositif à cliquet situé dans le nez de l'outil est relativement faible. Par contre, le bruit rayonné par le corps de l'outil est plus important. L'ajout d'une gaine protectrice sur le corps de l'outil permettrait de limiter ce bruit tout en évitant la sensation de froid lors d'une utilisation prolongée. La combinaison des 2 solutions, telle qu'appliquée sur le modèle le moins bruyant testé (*B3*), permettrait d'atteindre un gain de près de 7 dB(A) par rapport au modèle testé le plus bruyant.

Figure 13. Identification des sources de bruit d'une clé pneumatique

Tableau 12. Sources de bruit pour la clé pneumatique *A1*

Source	Puissance acoustique (dB(A))
Outil insonorisé (bruit de fond)	83,7
Nez seulement	85,8
Échappement seulement	101,3
Outil complet sauf échappement	97,6
Outil complet	102,8

4.2.6 Sommaire des résultats

Un sommaire des résultats vibratoires et acoustiques obtenus avec les clés pneumatiques pour les bancs de première et de deuxième génération est présenté au tableau 13. Selon les dispositions de la norme ISO 15744, c'est le niveau de puissance acoustique le plus élevé, entre les essais en charge et les essais à vide, qui est rapporté pour les bancs d'essai de première génération. On note que les niveaux de puissance acoustique obtenus avec les deux méthodes (dispositif de freinage et vissage de boulons) sont très similaires, avec une différence maximale de l'ordre de 1 dB(A). Cependant, pour les mesures vibratoires, le banc d'essai de deuxième génération procure des valeurs d'émission vibratoire relativement moins élevées que le banc d'essai de première génération. Cette différence est attribuable à la plus grande résistance à la rotation du dispositif de freinage par rapport au vissage et au dévissage du banc d'essai de deuxième génération. Les écarts de bruit mesurés entre l'outil le plus bruyant et le plus silencieux sont de plus de 7 dB(A). On note que l'outil *B3* n'a pas été testé sur le banc d'essai de première génération, car il n'était pas disponible lors de ces tests.

Tableau 13. Sommaire des résultats en laboratoire pour les clés pneumatiques

Fabricant	Modèle	Capacité (Nm)	Vibration (m/s^2, W_h)		L_w (dB(A))	
			1ière génération	2ième génération	1ière génération	2ième génération
A	1	68	**12,54**	**4,48**	**102,9**	**101,8**
B	3	81	**N/A**	**5,67**	**N/A**	**94,5**
B	2	68	**8,35**	**5,32**	**100,3**	**100,2**
C	4	75	**5,24**	**4,05**	**98,3**	**98,7**

4.3 Clé pneumatique à impact (« impact wrench »)

La clé pneumatique à impact est un outil portatif qui est très utilisé par les mécaniciens pour visser et dévisser des boulons requérant un couple élevé. Le couple maximal que ces outils peuvent appliquer est environ 10 fois plus élevé que le couple maximal appliqué par les clés pneumatiques. Ces outils sont principalement utilisés pour changer les roues, ainsi que visser et dévisser les gros boulons associés à la suspension, la direction, et l'échappement.

Le principal avantage de ce type d'outil est le couple de serrage très élevé associé à une vitesse de rotation très supérieure à celle des clés pneumatiques (facteur de 30 à 40). De par lors mécanisme de serrage (série d'impacts), les clés à impact ne présentent pas de risque de contrecoup lorsque le boulon arrive en fin de course. Généralement, l'échappement d'air est dirigé vers le bas, à l'extrémité de la poignée. Certains modèles ont un échappement dirigé vers l'avant, ce qui peu apprécié des mécaniciens. Lors d'une utilisation prolongée, l'outil peut devenir très froid. La présence d'une gaine isolante entre l'outil et la main est appréciée par certains mécaniciens.

Le principal désavantage de ce type d'outil est son poids relativement élevé. Les mécaniciens questionnés estiment que cet outil peut être particulièrement vibrant et bruyant, surtout pour dévisser des boulons coincés. Le couple très élevé développé par ce type d'outil rend son utilisation impossible pour des boulons de petite taille.

Les outils de calibre plus élevés (carré d'entraînement de 3/4" et 1", principalement utilisés dans l'industrie du camion) sont beaucoup plus problématiques tant des points de vue du bruit et des vibrations générés, qu'aux forts couples qui doivent être supportés par l'utilisateur. Ces outils sont également très lourds. Certains souhaiteraient, pour ces outils de plus forts calibres, utiliser un support permettant de retenir l'outil.

4.3.1 Sélection des outils

Un total de 74 clés pneumatiques à impact a été répertorié auprès des 40 mécaniciens participant au sondage. La majorité de ces outils (50 %) ont un carré d'entraînement de 1/2" (voir tableau 14). Par ailleurs, les trois fabricants les plus populaires pour ces outils sont *Snap-on* (incluant *Blue-Point*), *Ingersoll-Rand* et *Chicago Pneumatic* (voir tableau 15). Ces trois fabricants représentent 82 % des clés pneumatiques à impact répertoriées lors du sondage. Cinq clés pneumatiques à impact, parmi les plus vendues chez ces trois fabricants, ont été choisies pour les bancs de test. Cependant, les mesures terrains effectuées dans les garages ont été réalisées avec les clés pneumatiques à impact appartenant aux mécaniciens.

Tableau 14. Répartition des clés pneumatiques à impact selon le carré d'entraînement

Carré d'entraînement	Nombre d'outils répertoriés	Répartition
1/4"	3	4 %
3/8"	18	24 %
1/2"	37	50 %
3/4"	5	7 %
1"	3	4 %
Inconnu	8	11 %
Total	**74**	**100 %**

Tableau 15. Répartition des clés pneumatiques à impact selon le fabricant

Fabricant	Nombre d'outils répertoriés	Répartition
Blue-Point / Snap-on	25	34 %
Ingersoll-Rand	21	28 %
Chicago Pneumatic	15	20 %
Campbell Hausfeld	3	4 %
Autres	6	8 %
Inconnu	4	6 %
Total	**74**	**100 %**

4.3.2 Mesures dans les garages

Les résultats des mesures effectuées dans les garages sont résumés au Tableau 16. Un minimum de quatre mesures a été effectué pour chacun des outils. La pression d'alimentation des outils variant entre 120 et 150 PSI (à la sortie du compresseur), dépendamment du garage visité. La durée des mesures variait de 1,5 à 16,7 secondes. Les mesures ont été effectuées sur une séquence de 4 écrous (vissage ou dévissage), qui retenaient une roue (tâche consistant à changer une roue, voir figure 14). Le niveau moyen de vibration mesuré sur ces outils est de 5,73 m/s^2 pondéré W_h, avec un écart relativement moins important entre les valeurs limites par rapport aux clés pneumatiques (3,63 à 7,85 m/s^2 W_h). Les niveaux de bruit mesurés à l'oreille gauche variaient de 96,6 à 108,1 dB(A), avec une valeur moyenne 102,1 dB(A), tandis que pour l'oreille droite, les niveaux de bruit se situent entre 96,8 et 114,9 dB(A), avec une valeur moyenne de 102,8 dB(A).

Figure 14. Utilisation de la clé pneumatique à impact dans les garages

Tableau 16. Résultats des mesures dans les garages pour les clés pneumatiques à impact

Outil	Tâche	Pression (PSI)	Durée (s)	Niveau Vibratoire (m/s^2, W_h)	L_{eq} oreille gauche (dB(A))	L_{eq} oreille droite (dB(A))
1	Visser / dévisser roue	120	16,7	5,63	97,5	96,8
			12,4	5,63	98,9	98,2
			5,5	6,05	99,2	98,4
			5,4	5,31	99,4	98,0
			6,7	4,75	99,2	99,3
			6,1	6,34	96,6	96,9
			8,5	6,47	101,8	101,0
			4,0	6,01	102,7	101,4
			10,3	5,06	100,2	101,2
		150	10,6	N/A	99,0	100,2
			8,8	N/A	102,7	103,3
2	Visser / dévisser roue	120	8,9	7,85	106,8	106,2
			8,8	6,96	101,9	103,0
			6,1	7,73	101,2	100,6
			6,8	5,62	99,5	99,5
3	Visser / dévisser roue	120	8,7	5,67	101,2	101,7
			5,8	4,39	101,2	101,8
			10,8	7,79	103,6	103,5
			7,7	5,83	99,4	100,1
			8,5	5,16	101,7	104,1
			7,9	3,63	101,3	104,2
4	Visser / dévisser	120	10,7	4,29	98,1	100,9
			10,0	4,19	97,5	99,1
5	Visser / dévisser roue	150	2,1	N/A	106,3	104,7
			1,5	N/A	107,5	106,1
			1,5	N/A	106,3	104,1
			2,2	N/A	107,8	104,5
			1,5	N/A	103,4	105,1
			1,9	N/A	102,7	104,9
			2,6	N/A	105,9	113,7
			1,6	N/A	108,1	114,9
			2,1	N/A	107,0	112,8
Moyenne				**5,73**	**102,1**	**102,8**
Écart-type				**1,18**	**3,37**	**4,45**
Minimum				**3,63**	**96,6**	**96,8**
Maximum				**7,85**	**108,1**	**114,9**

4.3.3 Banc d'essai de première génération

Le banc d'essai de première génération pour les clés pneumatiques à impact est le même que pour celui des clés pneumatique (voir section 4.2.3, page 18). La seule différence est que la vitesse de rotation est maintenue dans la plage suggérée par la norme ISO 8662-7, c'est-à-dire entre 6 et 12 rpm. Tout comme pour les clés pneumatiques, la vitesse de rotation des outils en charge a été ajustée à l'aide d'un tachymètre. Des photos du banc d'essai sont présentées à la figure 15.

(a) **(b)**

Figure 15. Banc d'essai de première génération pour la clé pneumatique à impact

4.3.3.1 Mesures vibratoires

Tout comme pour les clés pneumatiques, les mesures vibratoires ont été réalisées en suivant les dispositions de la norme ISO 8662-7. Pour chacun des outils, trois opérateurs entraînés ont effectué cinq mesures vibratoires de dix secondes. Le détail de la procédure utilisée pour évaluer l'émission vibratoire des outils portatifs est donné à la section 3.3, page 9. Les mesures en laboratoire ont été réalisées en utilisant un analyseur multicanaux *Pulse* de *Brüel & Kjær*. Le coefficient de variation d'une série de cinq mesures avec un même opérateur doit être inférieur à 15 % pour que la série soit valide. Selon la norme ISO 8662-7, la fréquence de rotation de l'outil dans le dispositif de freinage doit être maintenue à 0,15 ± 0,05 révolution/s, ce qui correspond à vitesse de rotation qui se situe entre 6 et 12 rpm.

Les résultats des mesures vibratoires effectuées sur le banc d'essai de première génération sont présentés au tableau 17. La capacité maximale de l'outil, fournie par le fabricant et exprimée en Newton-mètre (Nm), est rapportée dans la troisième colonne du tableau. La pression d'alimentation de l'outil lors des essais (en PSI) est également présentée dans ce tableau. Le niveau d'accélération pondéré (W_h) moyen, de même que le coefficient de variation (COV) des cinq essais pour chacun des trois opérateurs sont rapportés dans ce tableau, avec la valeur d'émission vibratoire de l'outil (global) qui consiste en la moyenne arithmétique des valeurs moyennes obtenues avec les trois opérateurs. Pour l'outil *B3*, les valeurs d'émission vibratoire

ont été rapportées indépendamment pour deux outils différents, ce qui permet d'apprécier la dispersion des valeurs d'émission vibratoires pour un même modèle d'outil. On note qu'il existe un écart important de la valeur d'émission vibratoire entre l'outil le moins vibrant (4,01 m/s^2, W_h) et l'outil le plus vibrant (6,93 m/s^2, W_h). Cependant, cet écart est moins prononcé que dans le cas des clés pneumatiques. On note également un écart de 13 % entre les valeurs d'émission vibratoire d'un même modèle d'outil (*B3*). L'écart entre deux opérateurs est encore plus élevé, et peut même être de l'ordre de 30 % pour un même outil testé.

Tableau 17. Vibration des clés pneumatiques à impact, banc de première génération

Outil		Capa-cité (Nm)	Pres-sion (PSI)	Opérateur 1		Opérateur 2		Opérateur 3		
Fabri-cant	Modèle			(m/s^2 W_h)	COV	(m/s^2 W_h)	COV	(m/s^2 W_h)	COV	Global (m/s^2, W_h)
A	1	949	88	5,96	4 %	6,86	7 %	7,85	8 %	**6,89**
A	2	949	88	6,96	11 %	7,31	5 %	6,51	11 %	**6,93**
B	3	847	88	5,23	9 %	6,63	5 %	5,67	6 %	**5,84**
B	3	847	88	7,03	4 %	5,97	5 %	6,76	5 %	**6,59**
B	4	576	88	4,49	10 %	3,64	7 %	3,91	7 %	**4,01**
C	5	576	88	5,42	7 %	5,39	4 %	5,65	8 %	**5,49**

4.3.3.2 Mesures acoustiques

Pour les clés pneumatiques à impact, la norme ISO 15744 précise que les mesures doivent être fait en charge, dans le dispositif présenté à la section 4.2.3, page 18, ainsi qu'à vide. Une fréquence de rotation de 6 à 12 rpm a été utilisée pour les essais en charge. Les résultats ainsi obtenus sont présentés au Tableau 18. Puissance acoustique des clés pneumatiques à impact, banc de première génération Pour chacun des outils testés, la moyenne du niveau de puissance acoustique des trois mesures successives, en dB(A), ainsi que l'écart-type sont donnés pour les essais en charge et ceux à vide. On note que la plupart des outils sont significativement plus silencieux en charge qu'à vide (*A1*, *B3*, *B4*, *C5*), sauf pour l'outil *A2* qui est significativement plus silencieux à vide qu'en charge. Cela est attribué au fait que l'outil *A2* a un silencieux à l'échappement, ce qui atténue largement le bruit d'échappement, qui est dominant lorsque l'outil tourne à vide. Cependant, lorsque l'outil est en charge, c'est le bruit des impacts qui domine, ce que le silencieux à l'échappement ne peut atténuer. On note qu'en charge, il y a une différence d'environ 6 dB(A) entre l'outil le moins bruyant et l'outil le plus bruyant tandis qu'à vide, la même différence est d'environ 15 dB(A). Cet écart important pour les mesures à vide est également attribué à la présence d'un silencieux sur l'échappement de l'outil *A2*.

Tableau 18. Puissance acoustique des clés pneumatiques à impact, banc de première génération

Outil		Capa-cité (Nm)	Pres-sion (PSI)	Puissance acoustique			
				En charge		A vide	
Fabri-cant	Modèle			L_w dB(A)	Écart-type dB(A)	L_w dB(A)	Écart-type dB(A)
A	1	949	88	**103,0**	N/A	**107,2**	N/A
A	2	949	88	**101,0**	0,28	**92,0**	1,23
B	3	847	88	**101,6**	0,00	**102,9**	0,76
B	3	847	88	**100,6**	0,12	**103,1**	0,35
B	4	576	88	**97,2**	0,06	**103,9**	0,32
C	5	576	88	**102,3**	0,06	**106,1**	0,65

4.3.4 Banc d'essai de deuxième génération

Tout comme pour les clés pneumatiques**,** le banc d'essai de première génération simule une charge constante sur l'outil tandis qu'en réalité, il s'agit d'un phénomène transitoire. Pour les essais de deuxième génération, le banc d'essai de deuxième génération utilisé pour les clés pneumatiques a également été utilisé pour les clés à impact.

Au début de la mesure, les écrous sont installés en position dévissée sur chacune des 10 tiges filetées du banc de test. Lorsque la mesure débute, l'opérateur serre successivement chacun des écrous, en s'assurant d'un minimum de 4 à 5 impacts à la fin de chaque serrage. Dès qu'un écrou est serré, l'opérateur passe immédiatement à l'écrou suivant. Si le temps de passage d'un écrou à l'autre est trop élevé, la mesure est reprise. Des photos du banc d'essai de deuxième génération pour les clés à impact sont données à la figure 16.

(a) **(b)**

Figure 16. Banc d'essai de deuxième génération pour la clé pneumatique à impact

4.3.4.1 Mesures vibratoires

Tout comme pour le banc de première génération, chaque mesure vibratoire est effectuée sur une période de 10 secondes. Durant cette période, l'opérateur devait être en mesure de serrer 3 écrous, sinon la mesure était reprise. Les résultats des mesures vibratoires effectuées sur le banc d'essai de deuxième génération sont présentés au tableau 19. Le niveau d'accélération pondéré (W_h) moyen, de même que le coefficient de variation (COV) des cinq essais pour un opérateur sont rapportés dans ce tableau. On note que les valeurs d'émission vibratoire obtenues avec le banc d'essai de deuxième génération sont relativement similaires à celles obtenues avec le banc d'essai de première génération. Par ailleurs, les coefficients de variation obtenus avec le banc d'essai de deuxième génération sont plus élevés par rapport à ceux obtenus avec le banc d'essai de première génération, ce qui indique une moins bonne répétabilité des essais pour chaque opérateur. Cependant, ce mode d'opération semble plus proche de l'utilisation d'une clé pneumatique à impact en milieu de travail que le banc d'essai de première génération.

Tableau 19. Vibration des clés pneumatiques à impact, banc de deuxième génération

Outil		Capacité (Nm)	Pression (PSI)	Global	
Fabricant	Modèle			(m/s^2, W_h)	COV
A	1	949	88	**6,46**	15 %
A	2	949	88	**5,08**	12 %
B	3	847	88	**5,39**	10 %
B	4	576	88	**3,83**	16 %
C	5	576	88	**5,05**	12 %

Afin d'évaluer l'influence de la posture de l'opérateur sur la valeur d'émission vibratoire de l'outil, des mesures vibratoires avec la roue en position horizontale ont été effectuées. La posture de l'opérateur pour la roue horizontale est illustrée à la figure 17. Le niveau d'accélération pondéré (W_h) moyen, de même que le coefficient de variation (COV) des cinq essais pour trois opérateurs sont rapportés au tableau 20, avec la valeur d'émission vibratoire de l'outil (global) qui consiste en la moyenne arithmétique des valeurs moyennes obtenues avec les trois opérateurs. On constate que cette posture génère des valeurs d'émission vibratoire plus élevées par rapport à la posture illustrée à la figure 16. Cette différence est attribuable à l'impédance mécanique du système main-bras, qui dépend fortement de la posture pour les basses fréquences (en dessous de 40 Hz) [14].

Figure 17. Posture de l'opérateur, roue horizontale

Tableau 20. Vibration des clés pneumatiques à impact, effet de la posture (roue horizontale)

Outil		Capa-cité (Nm)	Pres-sion (PSI)	Opérateur 1		Opérateur 2		Opérateur 3		
Fabricant	Modèle			(m/s^2 W_h)	COV	(m/s^2 W_h)	COV	(m/s^2 W_h)	COV	Global (m/s^2, W_h)
A	1	949	88	10,54	8 %	10,95	7 %	11,06	14 %	**10,85**
A	2	949	88	9,23	13 %	7,92	17 %	8,60	10 %	**8,59**
B	3	847	88	7,89	7 %	10,37	4 %	9,95	6 %	**9,40**
B	4	576	88	6,02	14 %	8,51	4 %	6,11	5 %	**6,88**
C	5	576	88	5,97	15 %	5,54	15 %	8,02	10 %	**6,51**

4.3.4.2 Mesures acoustiques

La mesure de la puissance acoustique a été réalisée sur une période de 35 secondes, le temps que l'antenne avec les cinq microphones fasse un tour complet. Ce temps correspond au vissage de 10 écrous. Pour les mesures acoustiques de deuxième génération, le banc d'essai constitué de tiges filetées et d'écrous, présenté à la section précédente, a été utilisé. Les résultats ainsi obtenus sont présentés au tableau 21. Pour chacun des outils testés, la moyenne du niveau de puissance acoustique des trois mesures successives, en dB(A), ainsi que l'écart-type sont présentés au même tableau. On note un écart de plus de 4 dB(A) entre l'outil le moins bruyant et l'outil le plus bruyant.

Tableau 21. Puissance acoustique des clés pneumatiques à impact, banc de deuxième génération

Outil		Capa-cité (Nm)	Pres-sion (PSI)	Puissance acoustique	
Fabri-cant	Modèle			L_w dB(A)	Écart-type dB(A)
A	1	949	88	**100,0**	0,31
A	2	949	88	**95,6**	0,42
B	3	847	88	**98,5**	0,32
B	4	576	88	**96,7**	0,32
C	5	576	88	**99,0**	0,50

Des exemples de spectres de la puissance acoustique en tiers d'octave, pour les bandes de 100 à 20000 Hz, sont présentés pour les outils *A1* et *A2* à la figure 18. On note que l'outil *A2*, qui est la version insonorisé du *A1*, offre une réduction significative du bruit dans les bandes de tiers d'octave de 100 à 1600 Hz. Des comparaisons entre le banc d'essai de première génération et celui de deuxième génération sont présenté à la figure 19 pour l'outil *A1* et à la figure 20 pour l'outil *A2*. Pour l'outil *A1* (figure 19), on note que le bruit d'échappement du moteur à palette est dominant dans les bandes de tiers d'octave de 1000 et 1250 Hz lorsque l'outil tourne à vide sur le banc d'essai de première génération. Par ailleurs, les essais en charge surestiment, par rapport au banc d'essai de deuxième génération, les niveaux de puissance acoustique en basse fréquence (< 400 Hz) pour l'outil *A1* et sur l'ensemble du spectre pour l'outil *A2*. De plus, pour l'outil *A1*, les essais en charge sous estiment de façon importante les niveaux de puissance acoustique, par rapport au banc d'essai de deuxième génération, dans les bandes de tiers d'octave de 100 à 630 Hz. Finalement, la figure 21 présente le spectre du niveau moyen de pression mesuré aux oreilles de l'opérateur lors de l'utilisation en milieu de travail. En comparant le spectre de la puissance acoustique de l'outil *A2*, mesuré sur le banc d'essai de deuxième génération (figure 19), avec le niveau de pression moyen mesuré en milieu de travail (figure 21), on note que les distributions spectrales suivent la même tendance, confirmant une bonne représentativité de la tâche réelle en milieu de travail par le banc d'essai de deuxième génération. De plus, par rapport au banc d'essai de première génération, le banc d'essai de deuxième génération présente l'avantage de ne pas nécessiter de réaliser et d'interpréter deux séries de mesure (en charge et à vide).

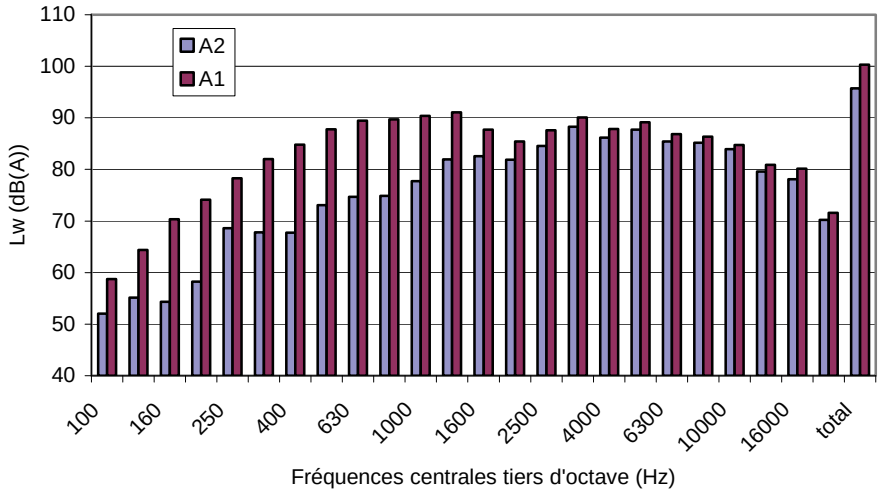


Figure 18. Spectres de puissance acoustique, deuxième génération, outils *A1* et *A2*

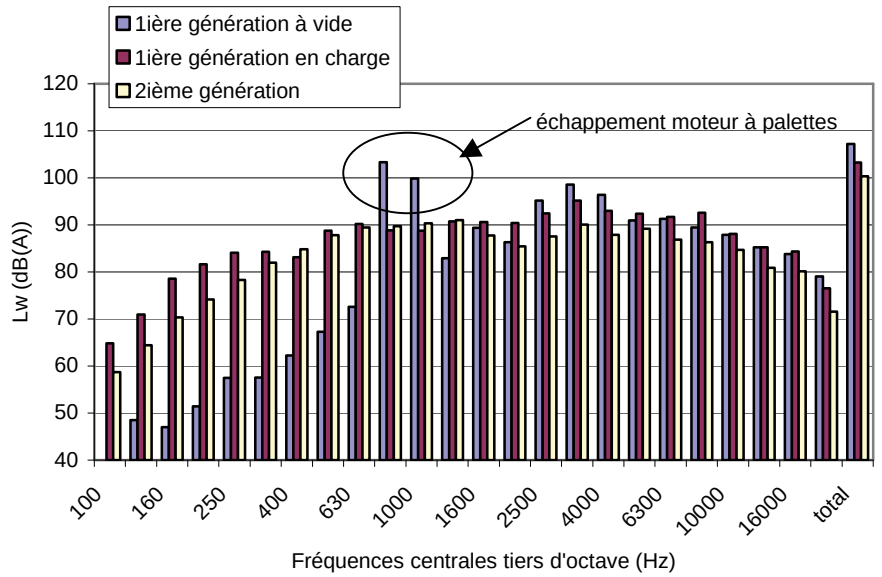


Figure 19. Spectres de puissance acoustique, outil *A1*

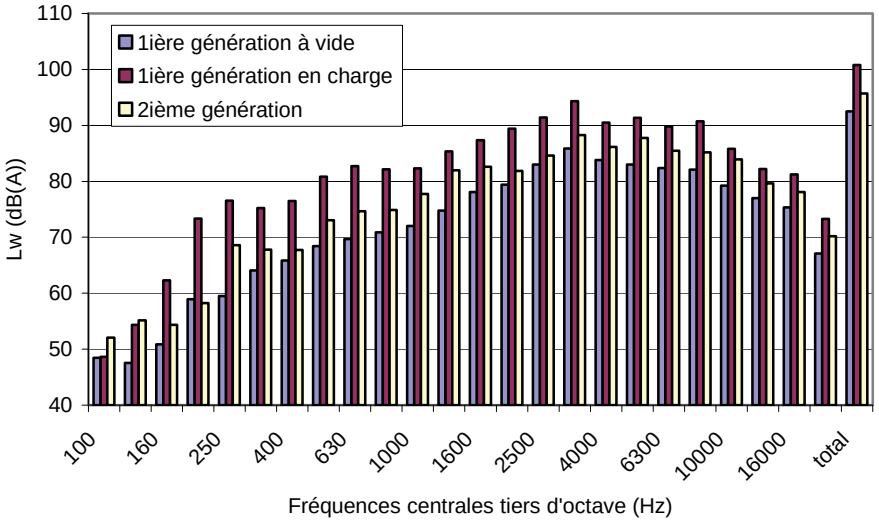


Figure 20. Spectres de puissance acoustique, outil *A2*

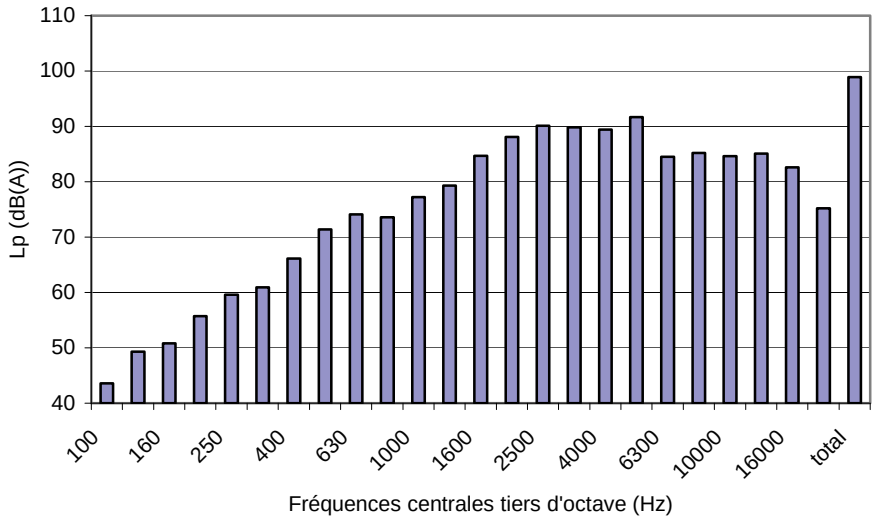


Figure 21. Spectre du niveau de pression moyen dans les garages, outil *A2*

4.3.5 Identification des sources de bruit

Le bruit des clés pneumatiques à impact diffère énormément selon que le dispositif d'impact soit enclenché ou non. La photo présentée à la figure 22 montre les différentes pièces composant la clé à impact. On y voit, de gauche à droite, la poignée et le capot du moteur à palettes, le moteur à palettes et ses deux trous d'échappement, le roulement d'entraînement du dispositif d'impact, le dispositif d'impact et finalement le carré et le capot protecteur du dispositif d'impact.

Le principe de fonctionnement est le suivant : lorsque le couple de retenue du boulon est faible, le moteur entraîne en même temps le dispositif d'impact et le carré. Lorsque le couple résistif augmente, seul le dispositif d'impact est entraîné par le moteur. L'impact est fourni par les masselottes du dispositif qui viennent frapper des encoches créées sur les pourtours de l'axe du carré d'entraînement. Le couple de serrage ou de desserrage est fourni par ces impacts sur le pourtour de l'axe du carré.

Figure 22. Vue éclatée de la clé à impact *A1*

À vide, la principale source de bruit provient de l'échappement d'air du moteur à palettes. En charge, le bruit d'impact des masselottes sur l'axe ainsi que leur répercussion sur le corps de l'outil et la pièce vissée vont se rajouter au bruit d'échappement du moteur à palettes.

L'installation d'un silencieux sur la sortie d'échappement du moteur à palettes permet de réduire le bruit à vide de 15 dB(A). Ce résultat provient de la différence de bruit à vide rayonné entre un outil *A1* et un outil *A2* (version insonorisée). Lors du démontage de ces outils, on constate que les seules différences entre ces deux outils sont l'installation d'un tissu acoustique disposé directement sur les orifices d'échappement du moteur à palettes ainsi qu'un silencieux inséré dans la poignée de l'outil. Cette solution relativement simple à mettre en œuvre semble également robuste, puisque les mesures effectuées sur un outil neuf et un outil ayant 18 mois d'usure donnent des résultats semblables.

L'identification des sources de bruit en charge a été effectuée sur une clé pneumatique à impact *A1*. La méthode utilisée pour identifier les sources de bruit consiste à masquer les sources de bruit de l'outil, soit avec de la pâte à modeler ou du matériau coupe son *barymat*®, et de

démasquer ensuite chacune des sources dont on veut estimer sa contribution au bruit rayonné par l'outil. Un exemple de masquage des sources de bruit sur une clé pneumatique à impact est présenté à la figure 23. La contribution de chacune des sources sur la puissance acoustique rayonnée par l'outil est présentée au tableau 22. L'outil *A2* a été utilisé pour représenter l'ensemble des sources de bruit sans l'échappement. On note que le bruit de fond associé à la mesure, lorsque toutes les sources sont insonorisées, est de 96,9 dB(A). Il ressort de ce tableau que la source de bruit majeur sur cet outil provient des impacts (ensemble de l'outil sans l'échappement), pour une puissance acoustique de 105,4 dB(A). La deuxième source en importance provient de l'échappement d'air, avec une puissance acoustique de 103,0 dB(A). Le bruit rayonné par la roue est également important, soit 102 dB(A). On peut donc s'attendre à une puissance acoustique minimale en charge de 103 à 104 dB(A) une fois toutes les sources de bruit de l'outil convenablement traitées.

Figure 23. Identification des sources de bruit d'une clé pneumatique à impact

Tableau 22. Sources de bruit pour les clés pneumatiques à impacts *A1* et *A2*

Source	Puissance acoustique (dB(A))
Outil insonorisé (bruit de fond)	96,9
Nez seulement	99,1
Douille	Négligeable, eq. Bruit de fond
Roue seulement	101,9
Échappement seulement	103,0
Outil complet sauf échappement	105,4
Outil complet	107,4

4.3.6 Sommaire des résultats

Un sommaire des résultats vibratoires et acoustiques obtenus avec les clés pneumatiques à impact pour les bancs de première et de deuxième génération est présenté au tableau 23. Selon les dispositions de la norme ISO 15744, c'est le niveau de puissance acoustique le plus élevé, entre les essais en charge et les essais à vide, qui est rapporté pour les bancs d'essai de première génération. On note que les niveaux de puissance acoustique obtenus avec les deux méthodes (dispositif de freinage et vissage d'écrous) sont sensiblement différents. Les niveaux obtenus avec le banc d'essai de deuxième génération sont de 4,6 à 7,2 dB(A) moins élevés que ceux obtenus avec le banc d'essai de première génération. Les niveaux de bruit obtenus avec le banc d'essai de première génération sont largement dominés par le fonctionnement à vide des outils, ce qui a comme effet de favoriser le bruit provenant de l'échappement. Cependant, les niveaux de bruit obtenus avec le banc d'essai de deuxième génération sont produits par une combinaison de différents modes d'opération, où le bruit d'échappement est moins dominant. Par exemple, dans le cas du vissage, l'entraînement de la douille a lieu à une vitesse relativement élevée (mais moins élevée qu'à vide), suivi d'un serrage sous impacts. Pour la majorité des outils testés, le banc d'essai de deuxième génération procure des valeurs d'émission vibratoire similaires au banc d'essai de première génération. Cependant, on note que la posture de l'opérateur a une influence significative sur les valeurs d'émission vibratoire. En effet, les valeurs d'émission vibratoire obtenues avec la posture de l'opérateur associée à la roue horizontale sont de 29 à 80 % plus élevées, dépendamment de l'outil, à celles obtenues avec la posture de l'opérateur associée à la roue verticale. Cette différence est attribuable à l'influence de la posture sur l'impédance mécanique du système main-bras.

Tableau 23. Sommaire des résultats en laboratoire pour les clés pneumatiques à impact

Fabri-cant	Modèle	Capacité (Nm)	Vibration (m/s^2, W_h)			L_w (dB(A))	
			1ière génération	2ième génération	Roue horizontale	1ière génération	2ième génération
A	1	949	**6,89**	**6,46**	**10,85**	**107,2**	**100,0**
A	2	949	**6,93**	**5,08**	**8,59**	**101,0**	**95,6**
B	3	847	**6,59**	**5,39**	**9,40**	**103,1**	**98,5**
B	4	576	**4,01**	**3,83**	**6,88**	**103,9**	**96,7**
C	5	576	**5,49**	**5,05**	**6,51**	**106,1**	**99,0**

4.4 Meuleuse et meuleuse d'outillage (« die grinder »)

Les meuleuses et meuleuses d'outillages sont des outils utilisés par les mécaniciens pour un nombre varié de tâches : couper des pièces, découper de la tôle, meuler du métal, poncer des surfaces, nettoyer des pièces ainsi que polir des surfaces. On distingue les meuleuses des meuleuses d'outillages par leurs dimensions, les meuleuses étant généralement plus volumineuses que les meuleuses d'outillage. Les meuleuses ont également un garde au niveau de la meule que les meuleuses d'outillage n'ont pas. C'est pour cette raison que les meuleuses d'outillages ne devraient jamais être utilisées avec un disque de tronçonnage (« cutting wheel »), étant donné qu'elles ne sont pas munies d'un garde. Par ailleurs, les meuleuses d'outillage ont

généralement une fréquence de rotation plus élevée que les meuleuses. La figure 24 permet de discriminer les deux types de meuleuse. Également, il faut distinguer les meuleuses d'angle des meuleuses droites. Les deux exemples présentés à la figure 24 sont des meuleuses d'angle (la grande majorité des meuleuses utilisées par les mécaniciens), mais il existe également des meuleuses droites, dont l'axe de rotation est dans le même axe que le corps de l'outil. Par ailleurs, la majorité des meuleuses utilisées par les mécaniciens sont des meuleuses d'outillage, excepté dans le secteur de la carrosserie, où les meuleuses sont généralement utilisées pour poncer des surfaces. De plus, la majorité des meuleuses utilisées par les mécanicien sont de type électrique. De façon générale, les mécaniciens sondés trouvent ces outils bruyants (même à vide), froids à l'usage (ils apprécient ces outils avec une couche d'isolation en caoutchouc), et poussiéreux. Par ailleurs, certains ont trouvé ces outils peu vibrants, tandis que d'autres mécaniciens ont trouvé ces mêmes outils très vibrants (par exemple pour le ponçage).

(a) **(b)**

Figure 24. Meuleuse avec disque à couper (a), meuleuse d'outillage avec pointe au carbure (b)

4.4.1 Sélection des outils

Un total de 78 meuleuses et meuleuses d'outillage ont été répertoriées auprès des 40 mécaniciens participant au sondage. Par ailleurs, les trois fabricants les plus populaires pour ces outils sont *Snap-on* (incluant *Blue-Point*), *Ingersoll-Rand* et *Chicago Pneumatic* (voir tableau 24). Ces trois fabricants représentent 54 % des meuleuses et meuleuses d'outillages répertoriées lors du sondage. Parmi les meuleuses répertoriées, cinq modèles avaient une alimentation électrique. Un total de quatre meuleuses d'outillage et de deux meuleuses ont été choisies pour les tests sur les bancs d'essai. Le choix des outils a été effectué afin de refléter le plus possible la répartition de ces types d'outils dans les garages. Pour les meuleuses, un outil pneumatique avec une meule d'un diamètre de 4" a été sélectionné (*B1*), ainsi qu'une meuleuse électrique avec une meule d'un diamètre 4 1/2" (*D2*). Tous les outils sélectionnés sont à angle de 90º, excepté pour la meuleuse d'outillage *B3* qui est à angle de 120º. Par ailleurs, la fréquence de rotation pour l'ensemble des meuleuses d'outillage sélectionnées se situe dans la gamme de 20000 à 24499

rpm. Par opposition aux meuleuses d'outillage, qui ont une seule poignée, les meuleuses ont deux poignées, donc elles nécessitent deux accéléromètres pour mesurer les vibrations sur chacune des poignées.

Tableau 24. Répartition des meuleuses et des meuleuses d'outillage selon le fabricant

Fabricant	Nombre d'outils répertoriés	Répartition
Blue-Point / Snap-on	17	21 %
Ingersoll-Rand	7	9 %
Chicago Pneumatic	19	24 %
Campbell Hausfeld	6	8 %
Dewalt	2	3 %
Mastercraft	2	3 %
Autres	18	23 %
Inconnu	7	9 %
Total	**78**	**100 %**

4.4.2 Mesures dans les garages

Les résultats des mesures effectuées dans les garages sont résumés au tableau 25. La pression d'alimentation des outils, mesurée à la sortie du compresseur, se situait entre 100 et 150 PSI, dépendamment du garage testé. Les mesures ont toutes été effectuées avec des meuleuses d'outillage (droite, à 90º et à 120º). La durée des mesures variait de 9,9 à 175 secondes. Les mesures ont été effectuées sur plusieurs tâches qui sont représentatives de l'utilisation de ces outils dans les garages. Ces tâches consistaient à nettoyer une pièce rouillée à l'aide d'une brosse métallique (figure 25b), couper des rivets avec un disque à tronçonner, meuler de la tôle à l'aide d'un disque au carbure, ainsi que poncer une barre de métal avec un disque à poncer (figure 25a). Le niveau moyen de vibration mesuré sur ces outils est de 6,11 m/s^2 pondéré W_h, avec un écart relativement élevé entre les valeurs minimales et maximales (2,53 à 9,38 m/s^2 W_h). Les niveaux de bruit mesurés à l'oreille gauche variaient de 93,9 à 109,2 dB(A), avec une valeur moyenne 103,3 dB(A), tandis que pour l'oreille droite, les niveaux de bruit se situent entre 97,9 et 107,4 dB(A), avec une valeur moyenne de 104,1 dB(A).

(a) (b)

Figure 25. Utilisation de la meuleuse d'outillage dans les garages

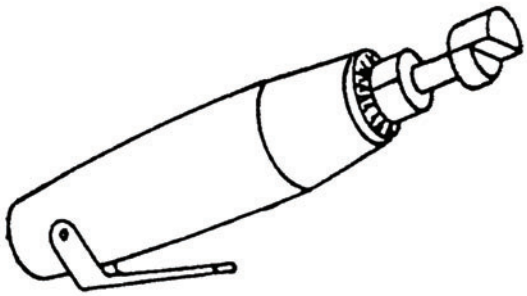
Tableau 25. Résultats des mesures dans les garages pour les meuleuses d'outillage

Outil	Tâche	Pression (PSI)	Durée (s)	Niveau Vibratoire (m/s^2, W_h)	L_{eq} oreille gauche (dB(A))	L_{eq} oreille droite (dB(A))
1 (droite)	Nettoyer avec brosse	120	9,9	6,16	95,6	101,7
			13,0	8,17	96,5	104,9
			7,5	9,38	97,0	106,9
2 (droite), disque de 4 pouces	Couper des rivets	125-130	175	2,53	93,9	101,1
3 (90º)	Meuler du métal	100	30,9	5,42	109,2	107,1
			30,9	5,18	108,1	107,4
4 (90º)	Poncer barre d'acier	150	15,7	6,29	106,2	106,1
			15,7	6,46	106,5	106,9
			15,9	6,57	105,4	105,9
5 (120º)	Poncer barre d'acier	150	15,7	5,71	100,4	97,9
			15,6	5,92	102,7	100,2
			16,2	6,25	104,7	99,6
6 (90º)	Poncer barre d'acier	150	15,7	4,72	109,2	105,7
			15,7	5,74	106,5	104,6
			15,8	7,12	107,2	105,5
Moyenne				**6,11**	**103,3**	**104,1**
Écart-type				**1,53**	**5,25**	**3,13**
Minimum				**2,53**	**93,9**	**97,9**
Maximum				**9,38**	**109,2**	**107,4**

4.4.3 Meuleuse d'outillage

4.4.3.1 Banc d'essai de première génération

Le banc d'essai de première génération pour la meuleuse d'outillage est basé sur la norme ISO 8662-13. Le banc d'essai consiste à faire tourner à vide la meuleuse d'outillage avec une fraise artificielle excentrée (voir figure 26a). Les dimensions de la fraise artificielle sont intégrées dans la norme ISO 8662-13, en fonction de la fréquence de rotation de la meuleuse. Celles utilisées pour le banc d'essai correspondent à la plage de fréquences de rotation de 20000 à 24499 rpm. Une photo illustrant la posture de l'opérateur lors des tests est présentée à la figure 26b. Pour l'ensemble des essais, la pression d'alimentation des outils pneumatiques est très proche de celle recommandée par les fabricants (90 PSI).



(a)

(b)

Figure 26. Banc d'essai de première génération pour la meuleuse d'outillage

4.4.3.1.1 Mesures vibratoires

Les mesures vibratoires ont été réalisées en suivant les disposition de la norme ISO 8662-13 (fraise artificielle excentrée), sauf qu'au lieu d'effectuer deux essais avec la fraise orientée à 0º (par rapport à une référence quelconque) en alternance avec deux essais avec la fraise orientée à 180º, trois mesures consécutives de 10 secondes pour une même orientation de la fraise ont été effectuées. Entre chaque mesure, la fraise a été desserrée et resserrée. Les résultats des mesures vibratoires effectuées sur le banc d'essai de première génération sont présentés au tableau 26. La pression d'alimentation de l'outil lors des essais (en PSI) est rapportée dans la troisième colonne du tableau. Le niveau d'accélération pondéré (W_h) moyen, de même que le coefficient de variation (COV) des cinq essais pour chacun des trois opérateurs sont rapportés dans ce tableau, avec la valeur d'émission vibratoire de l'outil (global) qui consiste en la moyenne arithmétique des valeurs moyennes obtenues avec les trois opérateurs. On note qu'il existe un écart important de la valeur d'émission vibratoire entre l'outil le moins vibrant (3,55 m/s^2, W_h) et l'outil le plus vibrant (7,59 m/s^2, W_h) pour les meuleuses d'outillage testées. Par ailleurs, pour l'ensemble des outils testés, l'écart maximal entre deux opérateurs ne dépasse pas 15 % pour un même outil.

Tableau 26. Vibration des meuleuses d'outillage, banc de première génération

Outil		Pression (PSI)	Opérateur 1		Opérateur 2		Opérateur 3		
Fabricant	Modèle		(m/s^2 W_h)	COV	(m/s^2 W_h)	COV	(m/s^2 W_h)	COV	Global (m/s^2, W_h)
B	3	88	5,68	9 %	6,51	1 %	6,26	1 %	**6,15**
B	4	88	5,86	1 %	5,43	6 %	5,76	4 %	**5,68**
C	5	88	3,70	4 %	3,47	4 %	3,48	3 %	**3,55**
A	6	88	7,51	6 %	7,78	2 %	7,48	1 %	**7,59**

4.4.3.1.2 Mesures acoustiques

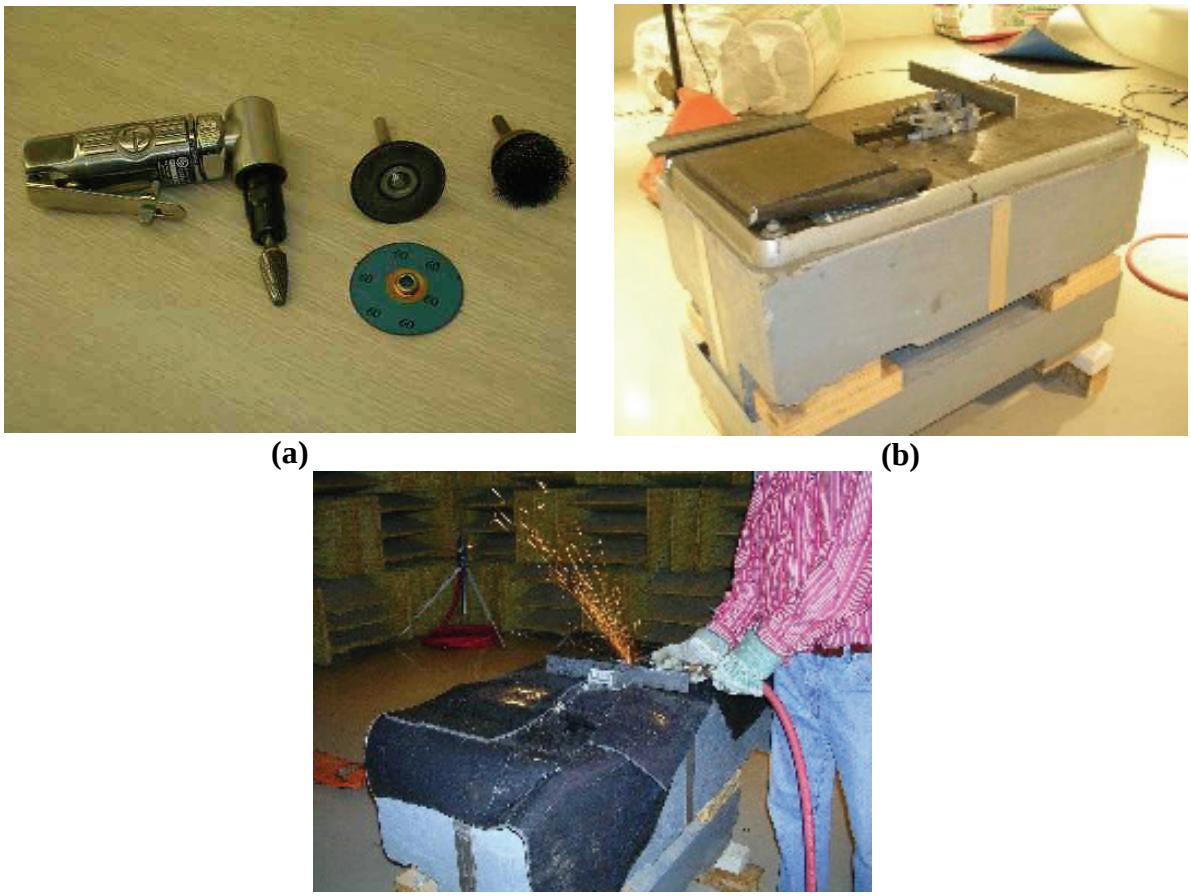
La norme ISO 15744 ne donne pas beaucoup de d'informations sur la façon d'opérer les meuleuses d'outillage, excepté que le bruit doit être mesuré à vide. Les outils ont donc été opéré avec la fraise artificielle (voir la section précédente). Les résultats ainsi obtenus sont présentés au tableau 27. Pour chacun des outils testés, la moyenne du niveau de puissance acoustique des trois mesures successives, en dB(A), ainsi que l'écart-type sont rapportées au même tableau. On note qu'il y a un écart de 8,6 dB(A) entre l'outil le moins bruyant et l'outil le plus bruyant. Cet écart est attribuable à la présence d'un silencieux sur l'échappement de l'outil moins bruyant.

Tableau 27. Puissance acoustique des meuleuses d'outillage, banc de première génération

Outil		Pression (PSI)	Puissance acoustique	
Fabricant	Modèle		L_w dB(A)	Écart-type dB(A)
B	3	88	**95,6**	0,25
B	4	88	**104,2**	0,15
C	5	88	**104,2**	0,26

4.4.3.2 Banc d'essai de deuxième génération

Pour les meuleuses d'outillage, le banc d'essai de deuxième génération est constitué de trois tâches qui sont représentatives de l'utilisation de ces outils par les mécaniciens. Il s'agit du meulage avec une pointe au carbure, de poncer avec un papier sablé monté sur un disque ainsi que de nettoyer avec une brosse en acier. Une photo d'une meuleuse d'outillage avec les accessoires utilisés pour les tests est présentée à la figure 27a. Ces trois opérations ont été effectuées sur une barre d'acier doux de 15" × 2", et d'épaisseur 3/8" maintenue dans un étau (voir figure 27b). Pour les trois tâches, l'opérateur applique une force de poussée verticale de 30 N sur la pièce travaillée. Le meulage de la barre d'acier est illustré à la figure 27c.



(a) **(b)**

(c)

Figure 27. Banc d'essai de deuxième génération pour la meuleuse d'outillage

4.4.3.2.1 Mesures vibratoires

Tout comme pour le banc de première génération, chaque mesure vibratoire est effectuée sur une période de 10 secondes. Les résultats des mesures vibratoires effectuées sur le banc d'essai de deuxième génération sont présentés au Tableau 28. Vibration des meuleuses d'outillage, banc de deuxième génération Le niveau d'accélération pondéré (W_h) moyen, de même que le coefficient de variation (COV) de cinq essais consécutifs, effectués avec un même opérateur, sont rapportés dans ce tableau. On note que les tâches de ponçage et de nettoyage simulées produisent des niveaux vibratoires comparables, tandis que la tâche de meulage produit un niveau vibratoire pondéré significativement moins élevé que les deux autres tâches simulées.

Tableau 28. Vibration des meuleuses d'outillage, banc de deuxième génération

Outil		Pression (PSI)	Tâche					
			Poncer		Nettoyer		Meuler	
Fabricant	Modèle		(m/s^2 W_h)	COV	(m/s^2 W_h)	COV	(m/s^2 W_h)	COV
B	3	88	**13,01**	11 %	**14,59**	14 %	**8,30**	5 %
B	4	88	**9,61**	6 %	**8,81**	4 %	**3,22**	10 %
C	5	88	**10,19**	4 %	**9,46**	5 %	**4,47**	9 %
A	6	88	**10,02**	2 %	**8,38**	3 %	**8,30**	5 %

4.4.3.2.2 Mesures acoustiques

La mesure de la puissance acoustique a été réalisée sur une période de 35 secondes, le temps que l'antenne avec les cinq microphones fasse un tour complet. Pour les mesures acoustiques de deuxième génération, le banc d'essai est constitué des trois tâches simulées (ponçage, nettoyage, meulage) présentées à la section précédente. Les résultats ainsi obtenus sont présentés au tableau 29. Pour chacun des outils testés, la moyenne du niveau de puissance acoustique des trois mesures successives, en dB(A), ainsi que l'écart-type sont présentés au même tableau. On note un écart d'environ 5 à 7 dB(A) entre l'outil le moins bruyant et l'outil le plus bruyant, selon la tâche simulée. Par ailleurs, les niveaux de puissance acoustique sont similaires d'une tâche à l'autre pour un même outil, les écarts variant de 0,1 à 2,5 dB(A) entre la tâche la moins bruyante et la tâche la plus bruyante. Cela indique que la source dominante du bruit de ces outils ne provient pas de l'interaction entre l'outil et la pièce travaillée.

Tableau 29. Puissance acoustique des meuleuses d'outillage, banc de deuxième génération

Outil		Pression (PSI)	Tâche					
			Poncer		Nettoyer		Meuler	
Fabricant	Modèle		L_w dB(A)	Écart-type dB(A)	L_w dB(A)	Écart-type dB(A)	L_w dB(A)	Écart-type dB(A)
B	3	88	**97,2**	1,13	**95,3**	1,40	**97,8**	0,14
B	4	88	**103,8**	0,06	**103,7**	0,23	**103,8**	0,35
C	5	88	**103,4**	0,00	**103,2**	0,44	**104,5**	1,00
A	6	88	**99,6**	0,15	**100,3**	0,36	**100,1**	0,07

Une comparaison des spectres de la puissance acoustique en bandes de tiers d'octave, pour les trois tâches du banc d'essai de deuxième génération, est présenté à la figure 28 pour l'outil *C5* On note qu'il n'y a pas de différences significatives au niveau des spectres de bruit pour les trois différentes tâches, ce qui semble indiquer que la source principale du bruit ne provient pas de l'interaction entre l'outil et la pièce travaillée. Par ailleurs, une comparaison entre le banc d'essai de première génération et celui de deuxième génération (moyenne des trois tâches) est présentée

à la figure 29 pour l'outil *C5*. On note des différences non négligeables de la puissance acoustique entre les deux générations pour les bandes de tiers d'octave situées entre 100 et 400 Hz. Finalement, la figure 30 présente le spectre du niveau moyen de pression mesuré aux oreilles de l'opérateur lors de l'utilisation de l'outil en milieu de travail. En comparant le spectre de la puissance acoustique de l'outil *C5*, mesuré sur le banc d'essai de deuxième génération (figure 28), avec le niveau de pression moyen, mesuré en milieu de travail (figure 30), on note que les distributions spectrales suivent la même tendance, confirmant une bonne représentativité de la tâche réelle en milieu de travail par le banc d'essai de deuxième génération.

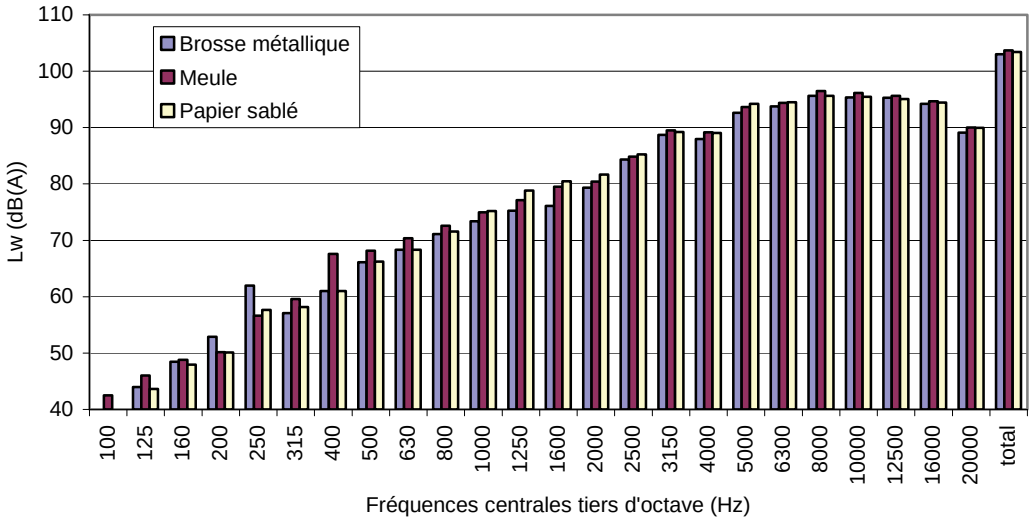


Figure 28. Spectres de puissance acoustique, outil *C5*, deuxième génération

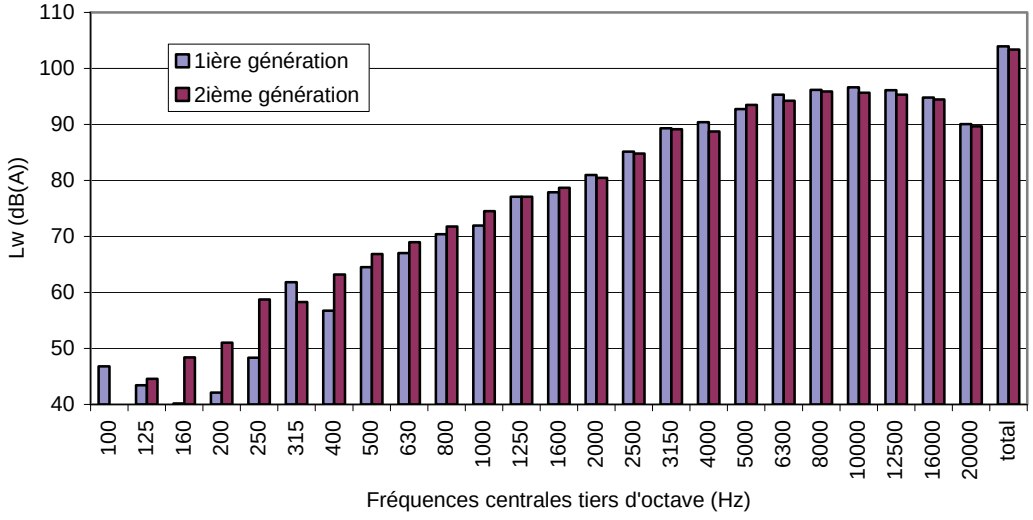


Figure 29. Spectres de puissance acoustique, outil *C5*

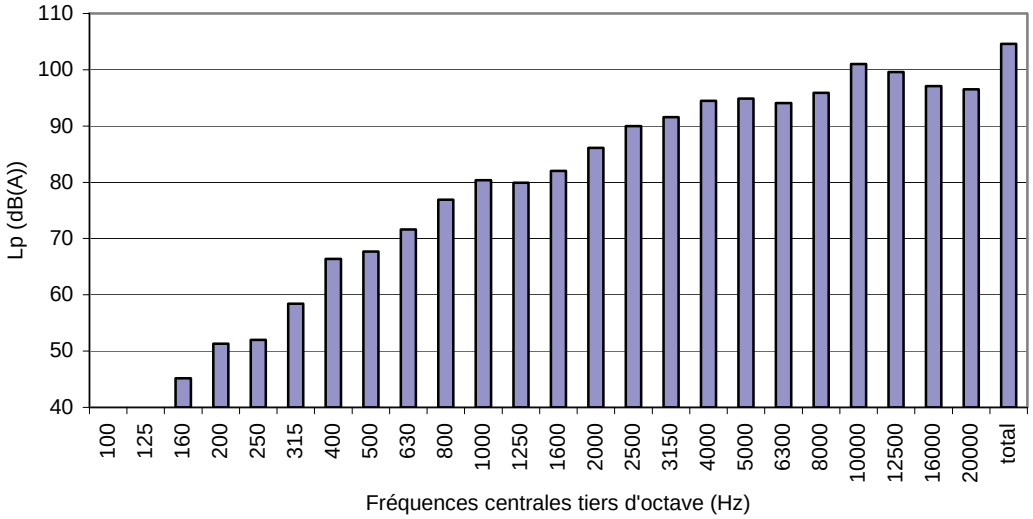


Figure 30. Spectre du niveau de pression moyen dans les garages, outil *C5*

4.4.3.3 Identification des sources de bruit

Les tests d'identification des sources de bruit ont été réalisés en masquant séparément chacune des sources. Comme pour les autres outils, des feuilles de matériau coupe son *barymat*® ont été utilisées pour masquer les différentes sources. Pour masquer le bruit de l'échappement, le jet d'air a été dirigé dans un silencieux constitué d'une coquille de *barymat*®. Vu les faibles différences de bruit observés entre les différentes tâches effectuées avec l'outil, il a été décidé d'identifier les sources de bruit sur l'outil à vide. Le Tableau 30. Sources de bruit pour la meuleuse d'outillage *A6* détaille les résultats obtenus pour la contribution de chacune des sources. L'ensemble des dispositifs de masquage des sources utilisés permet de diminuer le bruit de l'outil de 14 dB(A).

La première remarque importante provient du fait que le niveau de bruit à vide est légèrement supérieur à celui en charge. Ceci s'explique par le fait que la vitesse de rotation à vide est supérieure à la vitesse de rotation en charge. De même, l'interaction entre l'outil et la pièce travaillée est une source de bruit relativement peu importante. La mesure effectuée avec l'échappement seul montre que cette source domine largement toutes les autres, avec une contribution à elle seule de plus de 100 dB(A) pour un outil rayonnant au total une puissance acoustique d'environ 101 dB(A). Les deux autres sources, soit le corps de l'outil à l'intérieur duquel se trouve le moteur ainsi que le nez avec les dispositifs d'engrenage, ont chacun une contribution d'environ 90 dB(A), soit 10 dB(A) plus faible que le bruit d'échappement. Les principaux efforts de réduction du bruit doivent donc porter sur l'installation de silencieux à la fois efficaces et permettant un bon fonctionnement de l'outil.

Tableau 30. Sources de bruit pour la meuleuse d'outillage *A6*

Source	Puissance acoustique (dB(A))
Outil insonorisé (bruit de fond)	87,1
Nez seulement	90,2
Corps seulement	89,9
Échappement seulement	100,7
Outil complet sauf échappement	92,3
Outil complet	101,3

4.4.3.4 Sommaire des résultats

Un sommaire des résultats vibratoires et acoustiques obtenus avec les meuleuses d'outillage pour les bancs de première et de deuxième génération est présenté au tableau 31. Pour les bancs de deuxième génération, c'est le niveau le plus élevé parmi les trois tâches qui est rapporté, tant pour les mesures vibratoires que pour les mesures acoustiques. On note que les niveaux de puissance acoustique obtenus avec les deux méthodes sont sensiblement les mêmes, la différence entre les deux méthodes étant située entre 0,3 à 2,2 dB(A). Par ailleurs, le bruit émis par les meuleuses d'outillage est dominé par le bruit de l'échappement. Pour les niveaux vibratoires, le banc d'essai de deuxième génération procure des valeurs significativement plus élevée, de 1,3 à 2,9 fois plus élevées que le banc d'essai de première génération. Donc, pour le cas de la meuleuse d'outillage, l'interaction entre l'outil et la pièce travaillée contribue de façon significative sur l'émission vibratoire de l'outil.

Tableau 31. Sommaire des résultats en laboratoire pour les meuleuses d'outillage

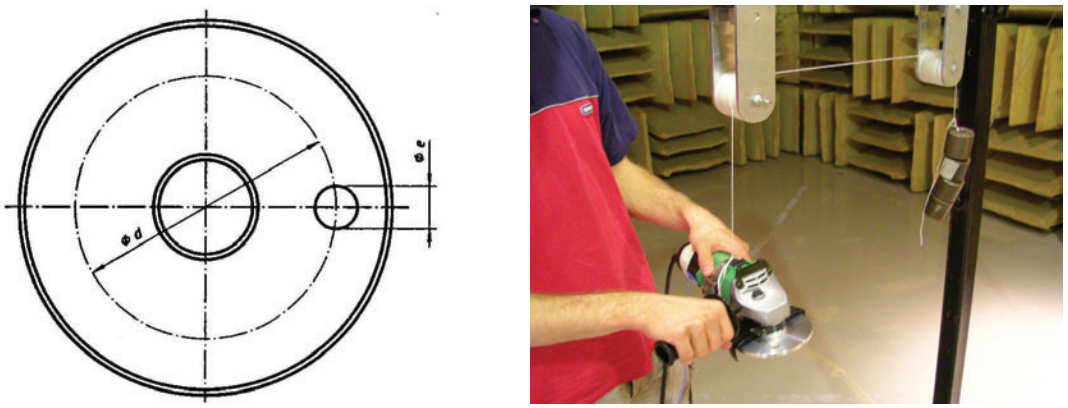
Fabricant	Modèle	Vibration (m/s^2, W_h)		L_w (dB(A))	
		1ière génération	2ième génération	1ière génération	2ième génération
B	3	**6,15**	**14,59**	**95,6**	**97,8**
B	4	**5,68**	**9,61**	**104,2**	**103,8**
C	5	**3,55**	**10,19**	**104,2**	**104,5**
A	6	**7,59**	**10,02**	**N/A**	**100,3**

4.4.4 Meuleuse

4.4.4.1 Banc d'essai de première génération

Le banc d'essai de première génération pour la meuleuse est basé sur la norme ISO 8662-4. Le banc d'essai consiste à faire tourner à vide la meuleuse avec une meule artificielle ayant un balourd. Le balourd est réalisé en perçant un trou excentré dans un disque d'aluminium (voir figure 31a). Les dimensions de la meule artificielle sont intégrées dans la norme ISO 8662-4, en fonction du diamètre de la meule. Pour tester les meuleuses retenues pour les essais, une meule artificielle de 4" de diamètre ainsi qu'une meule artificielle de 4 1/2" de diamètre ont été

fabriquées. Un contrepoids est suspendu à l'outil à l'aide d'un système de poulies. Ce contrepoids correspond au poids de la meuleuse additionné de la force d'avance désirée. Pour les meuleuses testées, une force d'avance de 40 ± 5 N a été utilisée. Une photo illustrant le montage expérimental ainsi que la posture de l'opérateur lors des tests est présentée à la figure 31b. Pour l'ensemble des essais, la pression d'alimentation des outils pneumatiques est semblable à celle recommandée par les fabricants (90 PSI).



(a) **(b)**

Figure 31. Banc d'essai de première génération pour la meuleuse

4.4.4.1.1 Mesures vibratoires

Les mesures vibratoires ont été réalisées en suivant les disposition de la norme ISO 8662-4 (meules artificielles avec un balourd), sauf qu'au lieu d'effectuer deux essais avec le balourd orienté à 0º (par rapport à une référence quelconque) en alternance avec deux essais avec le balourd orienté à 180º, trois mesures consécutives de 10 secondes pour une même orientation de balourd ont été effectuées. Entre chaque mesure, la meule artificielle a été desserrée et resserrée. Les résultats des mesures vibratoires effectuées sur le banc d'essai de première génération sont présentés au tableau 32. La pression d'alimentation de l'outil lors des essais (en PSI) est rapportée dans la quatrième colonne du tableau. Le niveau d'accélération pondéré (W_h) moyen, de même que le coefficient de variation (COV) des cinq essais pour chacun des trois opérateurs sont rapportés dans ce tableau, avec la valeur d'émission vibratoire de l'outil (global) qui consiste en la moyenne arithmétique des valeurs moyennes obtenues avec les trois opérateurs. Pour les deux meuleuses considérées, les mesures ont été rapportées indépendamment pour les deux positions de mesurage, correspondants au corps de l'outil (« outil ») et à la poignée latérale (« latéral »). Les niveaux vibratoires sont similaires pour les deux outils, excepté pour la poignée latérale de l'outil *D2* qui amplifie largement les vibrations. Par ailleurs, les résultats montrent une bonne répétabilité, avec des coefficients de variation en dessous de 5 %.

Tableau 32. Vibration des meuleuses, banc de première génération

Outil		Poignée	Pression (PSI)	Opérateur 1		Opérateur 2		Opérateur 3		
Fabricant	Modèle			(m/s^2 W_h)	COV	(m/s^2 W_h)	COV	(m/s^2 W_h)	COV	Global (m/s^2, W_h)
B	1	Outil	88	7,71	3 %	7,56	2 %	8,26	1 %	**7,84**
		Latéral	88	8,58	2 %	8,71	1 %	8,30	0,4 %	**8,53**
D	2	Outil	Élec.	7,75	4 %	7,34	4 %	8,38	0,5 %	**7,82**
		Latéral	Élec.	14,48	1 %	14,46	2 %	14,73	1 %	**14,56**

4.4.4.1.2 Mesures acoustiques

La norme ISO 15744 ne fournit pas beaucoup de d'informations sur la façon d'opérer les meuleuses, excepté que le bruit doit être mesuré à vide. Les outils ont donc été opérés avec la meule artificielle (voir la section précédente). Les résultats ainsi obtenus sont présentés au tableau 33. Pour les deux outils testés, la moyenne du niveau de puissance acoustique des trois mesures successives, en dB(A), ainsi que l'écart-type sont rapportées au même tableau. On note qu'il y a un écart de seulement 1,5 dB(A) entre les deux outils.

Tableau 33. Puissance acoustique des meuleuses, banc de première génération

Outil		Pression (PSI)	Puissance acoustique	
Fabricant	Modèle		L_w dB(A)	Écart-type dB(A)
B	1	88	**92,8**	0,70
D	2	Élec.	**94,3**	0,10

4.4.4.2 Banc d'essai de deuxième génération

Pour les meuleuses, le banc d'essai de deuxième génération consiste à meuler une plaque en acier doux encastrée de dimensions 300 mm × 300 mm × 30 mm. Le dispositif utilisé est le même que celui utilisé pour déterminer les valeurs d'émission vibratoire et sonore des ponceuses (voir figure 34, page 57). Pour la meuleuse *B1*, une meule plate *RONA* pour métal de 4" × ¼" × 5/8" (diamètre, épaisseur, trou centrale) a été utilisée, tandis que pour la meuleuse *D2*, une meule plate *Hitachi BF* type 27 de 4 ½" x ¼" x 7/8" a été employée. Pour l'ensemble des mesures, l'opérateur applique une force de poussée verticale de 30 N sur la pièce travaillée.

4.4.4.2.1 Mesures vibratoires

Tout comme pour le banc de première génération, chaque mesure vibratoire est effectuée sur une période de 10 secondes. Les résultats des mesures vibratoires effectuées sur le banc d'essai de deuxième génération sont présentés au tableau 34. Le niveau d'accélération pondéré (W_h) moyen, de même que le coefficient de variation (COV) de cinq essais consécutifs, effectués avec un même opérateur, sont rapportés au même tableau. On note que pour la meuleuse *B1*, les niveaux vibratoires sont moins élevés sur la poignée latérale que sur le corps de l'outil, tandis que pour la *D2*, on dénote le contraire, le niveau vibratoire étant beaucoup plus élevé sur la poignée que sur le corps de l'outil, tout comme pour le banc d'essai de première génération.

Tableau 34. Vibration des meuleuses, banc de deuxième génération

Outil		Poignée	Pression (PSI)	Global	
Fabricant	Modèle			(m/s^2, W_h)	COV
B	1	Outil	88	**5,29**	2 %
		Latéral	88	**1,51**	13 %
D	2	Outil	Élec.	**5,03**	5 %
		Latéral	Élec.	**17,82**	2 %

4.4.4.2.2 Mesures acoustiques

Pour les mesures acoustiques de deuxième génération, le banc d'essai consiste à meuler une plaque d'acier doux (voir la section précédente). Les résultats ainsi obtenus sont présentés au tableau 35. Pour les deux outils testés, la moyenne du niveau de puissance acoustique des trois mesures successives, en dB(A), ainsi que l'écart-type sont présentés au même tableau. On note un écart de seulement 0,4 dB(A) entre les deux outils.

Tableau 35. Puissance acoustique des meuleuses, banc de deuxième génération

Outil		Pression (PSI)	Puissance acoustique	
Fabricant	Modèle		L_w dB(A)	Écart-type dB(A)
B	1	88	**103,1**	0,50
D	2	Élec.	**103,5**	0,51

4.4.4.3 Sommaire des résultats

Un sommaire des résultats vibratoires et acoustiques obtenus avec les meuleuses, pour les bancs de première et de deuxième génération, est présenté au tableau 36. On note que les niveaux de puissance acoustique obtenus avec le banc de deuxième génération sont d'environ 10 dB(A) plus

élevés que les niveaux obtenus avec le banc d'essai de première génération. Cet écart est attribuable au bruit supplémentaire rayonné par l'interaction entre la meule et la pièce travaillée. Pour les mesures vibratoires sur les bancs de deuxième génération, les niveaux sont environ 33 % moins élevés sur le corps de l'outil que sur la poignée latérale. Cependant, pour la poignée latérale, le niveau vibratoire est beaucoup moins élevé pour le banc de deuxième génération avec la meuleuse *B1*, tandis que pour la meuleuse *D2*, les niveaux sont similaires. Cette différence est attribuable au type d'excitation qui dans un cas (balourd, première génération) est dominée par la fréquence de rotation de la meuleuse, et dans l'autre cas (meulage d'une plaque d'acier) est causée par une excitation ayant un contenu fréquentiel plus étendu, produite par l'interaction entre la meule et la pièce travaillée. Par ailleurs, il semble qu'il se produit un phénomène de résonance sur la poignée latérale de la meuleuse *D2*, étant donné les niveaux vibratoires relativement élevés par rapport au corps de l'outil.

Tableau 36. Sommaire des résultats en laboratoire pour les meuleuses

Fabricant	Modèle	Poignée	Vibration (m/s^2, W_h)		L_w (dB(A))	
			1ière génération	2ième génération	1ière génération	2ième génération
B	1	Outil	**7,84**	**5,29**	**92,8**	**103,1**
		Latéral	**8,53**	**1,51**		
D	2	Outil	**7,82**	**5,03**	**94,3**	**103,5**
		Latéral	**14,56**	**17,82**		

4.5 Ponceuse

La ponceuse est un outil portatif principalement utilisé dans le secteur de la carrosserie, pour poncer des surfaces métalliques et plastiques, ainsi que pour poncer le mastic à carrosserie. Les ponceuses sont généralement soit de type grossier (pour enlever rapidement du matériel) ou de type finition. Les ponceuses utilisées pour la finition sont généralement maintenues à l'aide de la paume d'une seule main (« palm sander »). Certains mécaniciens sondés trouvent que ce type d'outil est peu vibrant et peu bruyant, tandis que d'autres le trouvent particulièrement vibrant et bruyant. Le niveau de vibration ressenti dépendrait également de la force de poussée appliquée sur l'outil.

4.5.1 Sélection des outils

Un total de 22 ponceuses a été répertorié auprès des 40 mécaniciens participant au sondage. Les deux fabricants les plus populaires pour ces outils sont *Hutchins* et *Chicago Pneumatic* (voir tableau 37). Ces deux fabricants représentent 68 % des ponceuses répertoriées lors du sondage. Quatre ponceuses, parmi les plus vendues chez ces deux fabricants, ont été choisies pour les bancs de test. Cependant, les mesures terrains effectuées dans les garages ont été réalisées avec les ponceuses appartenant aux mécaniciens.

Tableau 37. Répartition des ponceuses selon le fabricant

Fabricant	Nombre d'outils répertoriés	Répartition
Chicago Pneumatic	6	27 %
Hutchins	9	41 %
Autres	4	18 %
Inconnu	3	14 %
Total	**22**	**100 %**

4.5.2 Mesures dans les garages

Les résultats des mesures effectuées dans les garages sont résumés au tableau 38. La pression d'alimentation des outils, mesurée à la sortie du compresseur, était de 100 PSI. Les mesures ont toutes été effectuées avec une ponceuse de type grossier (outil 2) ainsi qu'avec une ponceuse de type finition (outil 1). La durée des mesures variait de 29 à 31 secondes. Les mesures ont été effectuées sur des tâches de ponçage qui sont représentatives de l'utilisation de ces outils dans les garages. Ces tâches consistaient à poncer un pare-choc en plastique (figure 32a), ainsi qu'à poncer un châssis en acier (figure 32b). Le niveau moyen de vibration mesuré sur ces outils est de 6,21 m/s^2 pondéré W_h, avec un écart relativement élevé entre les valeurs minimales et maximales (4,06 à 8,79 m/s^2 W_h). Les niveaux de bruit mesurés à l'oreille gauche variaient de 83,2 à 104,3 dB(A), avec une valeur moyenne 93,6 dB(A), tandis que pour l'oreille droite, les niveaux de bruit se situent entre 83,3 et 102,0 dB(A), avec une valeur moyenne de 92,7 dB(A).

(a) **(b)**

Figure 32. Utilisation de la ponceuse dans les garages

Tableau 38. Résultats des mesures dans les garages pour les ponceuses

Outil	Tâche	Pression (PSI)	Durée (s)	Niveau Vibratoire (m/s^2, W_h)	L_{eq} oreille gauche (dB(A))	L_{eq} oreille droite (dB(A))
1	Poncer plastique	100	31,2	7,87	83,2	83,3
			31,0	7,62	83,9	84,2
			31,1	8,79	84,6	84,5
2	Poncer métal	100	28,9	4,64	104,3	102,0
			30,5	4,30	103,2	101,5
			30,8	4,06	102,3	100,8
Moyenne				**6,21**	**93,6**	**92,7**
Écart-type				**2,10**	**10,64**	**9,56**
Minimum				**4,06**	**83,2**	**83,3**
Maximum				**8,79**	**104,3**	**102,0**

4.5.3 Banc d'essai de première génération

Le banc d'essai de première génération pour la meuleuse d'outillage est basé sur la norme ISO 8662-8. Le banc d'essai consiste à poncer une plaque d'acier doux en faisant des trajectoires en huit, à vitesse constante (voir figure 33). La plaque en acier doux doit être de dimension 400 mm × 300 mm × (20 à 50 mm). La surface de la plaque doit avoir un fini dans la gamme R_a = 0 à 0,8 µm. La plaque doit être montée horizontalement sur un support stable. Il est important que la pièce travaillée ainsi montée n'engendre aucune résonance significative dans la gamme de fréquences susceptibles d'influencer les résultats. La force de poussée verticale, appliquée sur la ponceuse, doit être de 30±5 N. Le matériau abrasif doit être un papier d'oxyde d'aluminium de grain 180 pour les machines portatives orbitales et de grain 120 pour les machines portatives rotatives.

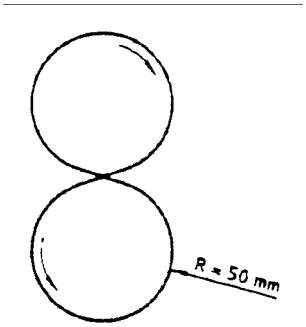
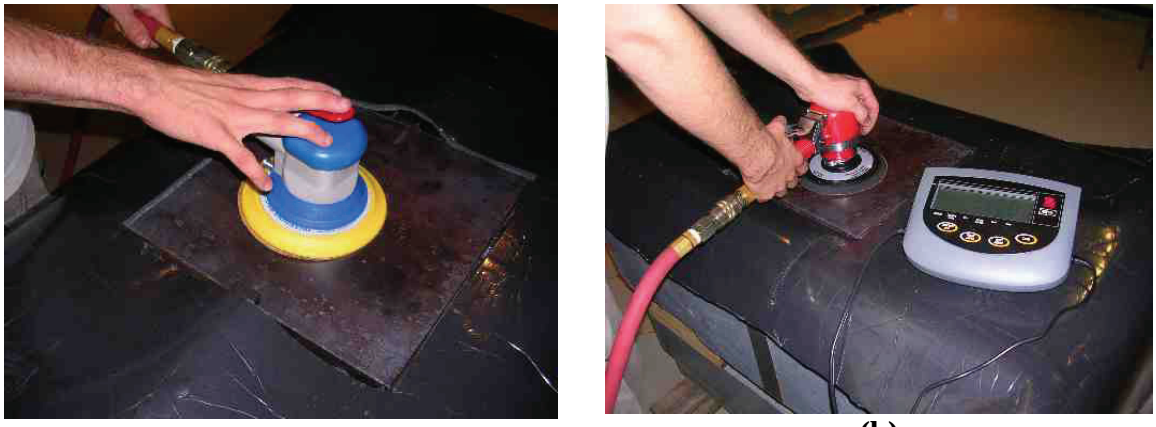


Figure 33. Trajectoire en huit du déplacement de l'outil sur la plaque

Le support stable est assuré par le bloc de béton sur lequel on fixe une plaque d'acier de dimensions 300 mm×300 mm×30 mm par des mords. La force de poussée est mesurée par une balance sur laquelle l'opérateur se tient debout. L'affichage de la force lui permet d'ajuster la force qu'il exerce sur la plaque avec la ponceuse par rétroaction. Cette force se déduit

simplement de la différence entre le poids de l'opérateur et la force lue par la balance. Les ponceuses étant toutes orbitales, le grain du papier est de 180. Des photos du banc d'essai sont données à la figure 34.



(a) **(b)**

Figure 34. Banc d'essai de première génération pour la ponceuse

4.5.3.1 Mesures vibratoires

Les mesures vibratoires ont été réalisées en suivant les disposition de la norme ISO 8662-8. Les résultats des mesures vibratoires effectuées sur le banc d'essai de première génération sont présentés au tableau 39. La pression d'alimentation de l'outil lors des essais (en PSI) est rapportée dans la quatrième colonne du tableau. Le niveau d'accélération pondéré (W_h) moyen, de même que le coefficient de variation (COV) des cinq essais pour chacun des trois opérateurs sont également rapportés, tout comme la valeur d'émission vibratoire de l'outil (global) qui consiste en la moyenne arithmétique des valeurs moyennes obtenues avec les trois opérateurs. Pour l'outil *B2*, les valeurs d'émission vibratoire ont été rapportées indépendamment pour deux outils différents. Cette approche permet de donner un aperçu de la dispersion des valeurs d'émission vibratoires pour un même modèle d'outil. On note, dans le cas présent, qu'il y a un écart de 35 % entre les valeurs d'émission vibratoire d'un même modèle d'outil. Par ailleurs, il existe un écart important de la valeur d'émission vibratoire entre l'outil le moins vibrant (5,08 m/s^2, W_h) et l'outil le plus vibrant (9,84 m/s^2, W_h) pour les ponceuses testées. Pour l'ensemble des outils testés, l'écart maximal entre deux opérateurs ne dépasse pas 21 % pour un même outil.

Tableau 39. Vibration des ponceuses, banc de première génération

Outil		Type	Pression (PSI)	Opérateur 1		Opérateur 2		Opérateur 3		
Fabricant	Modèle			(m/s^2 W_h)	COV	(m/s^2 W_h)	COV	(m/s^2 W_h)	COV	Global (m/s^2, W_h)
B	1	Finition	88	5,97	2 %	5,78	10 %	5,74	5 %	**5,83**
B	2	Grossier	88	10,84	4 %	8,98	5 %	9,69	9 %	**9,84**
B	2	Grossier	88	7,67	8 %	6,73	3 %	7,46	5 %	**7,29**
E	3	Finition	88	5,50	11 %	4,93	10 %	5,45	15 %	**5,29**
E	4	Grossier	88	4,61	17 %	5,45	5 %	5,19	9 %	**5,08**

4.5.3.2 Mesures acoustiques

Les mesures de la puissance acoustique ont été réalisées sur une période de 35 secondes, le temps que l'antenne fasse un tour complet. Les résultats ainsi obtenus sont présentés au tableau 40. Pour chacun des outils testés, la moyenne du niveau de puissance acoustique des trois mesures successives, en dB(A), ainsi que l'écart-type sont présentés au même tableau. Pour les outils *B1* et *B2*, les valeurs d'émission vibratoire ont été rapportées indépendamment pour deux outils différents. Cette approche permet de donner un aperçu de la dispersion des valeurs d'émission vibratoires pour un même modèle d'outil. Il y a un écart de 2,2 dB(A) entre les deux modèles testés pour le modèle *B1* et un écart de 3,3 dB(A) entre les deux outils testés pour le modèle *B2*. On note un écart de 7,2 dB(A) entre l'outil le moins bruyant et l'outil le plus bruyant. Les outils testés avaient tous un silencieux à l'échappement, ce qui limite le bruit rayonné par l'outil.

Tableau 40. Puissance acoustique des ponceuses, banc de première génération

Outil		Type	Pression (PSI)	Puissance acoustique	
Fabricant	Modèle			L_w dB(A)	Écart-type dB(A)
B	1	Finition	88	**83,8**	0,47
B	1	Finition	88	**86,0**	0,31
B	2	Grossier	88	**89,9**	0,12
B	2	Grossier	88	**86,6**	0,49
E	3	Finition	88	**91,0**	0,15
E	4	Grossier	88	**90,9**	0,31

4.5.4 Sommaires des résultats

Un sommaire des résultats vibratoires et acoustiques obtenus avec les ponceuses est donné au tableau 41. Étant donné que le banc d'essai est déjà représentatif d'une situation de travail réelle (ponçage d'une surface), un banc d'essai de deuxième génération n'était pas nécessaire. Dans les cas où plus d'un outil d'un même modèle a été testé, le niveau vibratoire ainsi que le niveau de la puissance acoustique le plus élevé ont été retenus.

Tableau 41. Sommaire des résultats en laboratoire pour les ponceuses

Fabricant	Modèle	Type	Vibration (m/s^2, W_h)	L_w dB(A)
B	1	Finition	**5,83**	**86,0**
B	2	Grossier	**9,84**	**89,9**
E	3	Finition	**5,29**	**91,0**
E	4	Grossier	**5,08**	**90,9**

4.6 Marteau pneumatique (« zip gun »)

Le marteau pneumatique est un outil portatif qui est peu utilisé par les mécaniciens. Il est utilisé principalement pour déloger ou couper des boulons rouillés, couper de la tôle, séparer des pièces collées entre elles ainsi que couper des rivets. Tous les mécaniciens sondés ont trouvé cet outil très vibrant et très bruyant, donc ce type d'outil est souvent utilisé qu'en dernier recours.

4.6.1 Sélection des outils

Un total de 39 marteaux pneumatiques a été répertorié auprès des 40 mécaniciens participant au sondage. Les trois fabricants les plus populaires pour ces outils sont *Chicago Pneumatic*, *Snap-on* (incluant *Blue-Point*) ainsi que *Ingersoll-Rand* (voir tableau 42). Ces trois fabricants représentent 80 % des marteaux pneumatiques répertoriées lors du sondage. Quatre marteaux pneumatiques, parmi les plus vendues chez ces trois fabricants, ont été choisies pour les bancs de test. Cependant, les mesures terrains effectuées dans les garages ont été réalisées avec les marteaux pneumatiques appartenant aux mécaniciens.

Tableau 42. Répartition des marteaux pneumatiques selon le fabricant

Fabricant	Nombre d'outils répertoriés	Répartition
Blue-Point / Snap-on	10	26 %
Ingersoll-Rand	5	13 %
Chicago Pneumatic	16	41 %
Campbell Hausfeld	3	8 %
Autres	4	10 %
Inconnu	1	2 %
Total	**39**	**100 %**

4.6.2 Mesures dans les garages

Les résultats des mesures effectuées dans les garages sont résumés au tableau 43. La pression d'alimentation des outils, mesurée à la sortie du compresseur, était de 100 PSI ou entre 125 et 130 PSI, selon le garage testé. Les mesures ont été effectuées dans deux garages différents, en utilisant trois marteaux pneumatiques différents. Les tâches consistaient à couper des rivets ainsi qu'à couper de la tôle. Des photos d'un marteau pneumatique instrumenté ainsi que d'une tâche de coupage de rivets sont disponibles à la figure 35. La durée des mesures variait de 2,4 à 72 secondes. Le niveau moyen de vibration mesuré sur ces outils est de 14,31 m/s^2 pondéré W_h, avec un écart relativement élevé entre les valeurs minimales et maximales (9,89 à 18,78 m/s^2 W_h). Quelques mesures vibratoires ne sont pas disponibles (« N/A »), car elles étaient entachées de décalage DC (« DC shift »). Les niveaux de bruit mesurés à l'oreille gauche variaient de 101,5 à 116,3 dB(A), avec une valeur moyenne 110,7 dB(A), tandis que pour l'oreille droite, les niveaux de bruit se situent entre 101,1 et 117,4 dB(A), avec une valeur moyenne de 110,9 dB(A).

(a) **(b)**

Figure 35. Utilisation du marteau pneumatique dans les garages

Tableau 43. Résultats des mesures dans les garages pour les marteaux pneumatiques

Outil	Tâche	Pression (PSI)	Durée (s)	Niveau Vibratoire (m/s^2, W_h)	L_{eq} oreille gauche (dB(A))	L_{eq} oreille droite (dB(A))
1	Couper des rivets	125-130	2,4	18,78	115,2	115,2
			2,5	13,82	116,3	117,4
			2,5	14,75	114,8	116,0
			72	N/A	110,2	110,4
2	Couper des rivets	125-130	23,2	9,89	113,6	113,8
3	Couper de la tôle	100	13,9	N/A	103,1	102,3
			15,3	N/A	101,5	101,1
Moyenne				**14,31**	**110,7**	**110,9**
Écart-type				**3,65**	**6,05**	**6,65**
Minimum				**9,89**	**101,5**	**101,1**
Maximum				**18,78**	**116,3**	**117,4**

4.6.3 Banc d'essai de première génération

Le banc d'essai de première génération pour le marteau pneumatique est basé sur la norme ISO 8662-2. Le banc d'essai consiste à opérer l'outil dans un dissipateur d'énergie à billes d'acier (voir figure 36). Pendant les essais, l'opérateur applique une force de poussée de 100 N sur l'outil. La force de poussée est mesurée par une balance sur laquelle l'opérateur se tient debout. L'affichage de la force lui permet d'ajuster la force qu'il exerce sur l'outil par rétroaction. Pour l'ensemble des essais, la pression d'alimentation des outils pneumatiques est très proche de celle recommandée par les fabricants (90 PSI).

Figure 36. Banc d'essai de première génération pour le marteau pneumatique

4.6.3.1 Mesures vibratoires

Les mesures vibratoires ont été réalisées en suivant les dispositions de la norme ISO 8662-2. Les résultats des mesures vibratoires effectuées sur le banc d'essai de première génération sont présentés au tableau 44. La troisième colonne du tableau indique le type d'outil utilisé selon sa capacité. La pression d'alimentation de l'outil lors des essais (en PSI) est rapportée dans la quatrième colonne du tableau. Le niveau d'accélération pondéré (W_h) moyen, de même que le coefficient de variation (COV) des cinq essais pour chacun des trois opérateurs sont rapportés dans ce tableau, avec la valeur d'émission vibratoire de l'outil (global) qui consiste en la moyenne arithmétique des valeurs moyennes obtenues avec les trois opérateurs. On note qu'il existe un écart important de la valeur d'émission vibratoire entre l'outil le moins vibrant (5,31 m/s^2, W_h) et l'outil le plus vibrant (9,98 m/s^2, W_h) pour les marteaux pneumatiques testées. Par ailleurs, l'écart maximal entre deux opérateurs pour un même outil testé est de l'ordre de 50 % pour les deux premier outils testés. Donc l'influence de l'opérateur est très significatif pour ce type d'outil.

Tableau 44. Vibration des marteaux pneumatiques, banc de première génération

Outil		Type	Pression (PSI)	Opérateur 1		Opérateur 2		Opérateur 3		
Fabricant	Modèle			(m/s^2 W_h)	COV	(m/s^2 W_h)	COV	(m/s^2 W_h)	COV	Global (m/s^2, W_h)
B	1	Lourd	88	6,98	11 %	7,83	11 %	10,82	7 %	**8,54**
B	2	Normal	88	4,77	3 %	4,57	9 %	6,59	6 %	**5,31**
C	3	Lourd	88	6,23	8 %	5,31	4 %	5,60	6 %	**5,71**
A	4	Lourd	88	10,03	2 %	9,60	5 %	10,31	3 %	**9,98**

4.6.3.2 Mesures acoustiques

La mesure de la puissance acoustique a été réalisée sur une période de 35 secondes, le temps que l'antenne avec les cinq microphones fasse un tour complet. Les résultats ainsi obtenus sont présentés au tableau 45. Tel que requis par la norme ISO 15744 [13], le dissipateur d'énergie est acoustiquement isolé afin de réduire le bruit provenant de l'excitation du dispositif. Pour chacun des outils testés, la moyenne du niveau de puissance acoustique des trois mesures successives, en dB(A), ainsi que l'écart-type sont présentés au même tableau. On note un écart de 4,3 dB(A) entre l'outil le moins bruyant et l'outil le plus bruyant.

Tableau 45. Puissance acoustique des marteaux pneumatiques, banc de première génération

Outil		Type	Pression (PSI)	Puissance acoustique	
Fabricant	Modèle			L_w dB(A)	Écart-type dB(A)
B	1	Lourd	88	**102,7**	0,68
B	2	Normal	88	**104,1**	0,45
C	3	Lourd	88	**105,2**	0,15
A	4	Lourd	88	**107,0**	0,15

4.6.4 Banc d'essai de deuxième génération

Le banc d'essai de deuxième génération, qui inclut la pièce travaillée, consiste à opérer le marteau pneumatique sur une plaque d'acier avec un burin de type ciseau. La plaque est montée horizontalement sur un support stable. La force de poussée verticale, appliquée sur le marteau pneumatique par l'opérateur, est de 100 N. Le support stable est assuré par le bloc de béton sur lequel on fixe une plaque en acier doux de dimensions 300 mm×300 mm×30 mm par des mords. La force de poussée est mesurée par une balance sur laquelle l'opérateur se tient debout. L'affichage de la force lui permet d'ajuster la force qu'il exerce sur la plaque avec le marteau

pneumatique par rétroaction. Cette force se déduit simplement de la différence entre le poids de l'opérateur et la force lue par la balance. Des photos du banc d'essai sont données à la figure 37.

(a) **(b)**

Figure 37. Banc d'essai de deuxième génération pour le marteau pneumatique

4.6.4.1 Mesures vibratoires

Les mesures vibratoires de deuxième génération ont été effectuées avec un seul opérateur, et le nombre de mesures effectuées varie de 3 à 5. Chaque mesure est d'une durée de 10 secondes. Les mesures vibratoires effectuées avec les trois premiers outils seulement sont présentées au tableau 46, les mesures obtenues pour le quatrième outil étant contaminées par du décalage DC. Les niveaux d'accélérations pondérées varient de 6,49 à 10,03 m/s^2, selon l'outil testé.

Tableau 46. Vibration des marteaux pneumatiques, banc de deuxième génération

Outil		Type	Pres-sion (PSI)	Nombre de mesures	Global	
Fabri-cant	Modè-le				(m/s^2, W_h)	COV
B	1	Lourd	88	5	**10,03**	5 %
B	2	Normal	88	3	**6,49**	6 %
C	3	Lourd	88	4	**7,79**	13 %

4.6.4.2 Mesures acoustiques

Pour les mesures acoustiques de deuxième génération, le banc d'essai consiste à opérer le marteau pneumatique sur une plaque d'acier avec un burin de type ciseau (voir la section précédente). Les résultats ainsi obtenus sont présentés au tableau 47. Pour les quatre outils testés, la moyenne du niveau de puissance acoustique des trois mesures successives, en dB(A), ainsi que l'écart-type sont présentés au même tableau. On note un écart de seulement 2,8 dB(A) entre l'outil le moins bruyant et l'outil le plus bruyant.

Tableau 47. Puissance acoustique des marteaux pneumatiques, banc de deuxième génération

Outil		Type	Pression (PSI)	Puissance acoustique	
Fabricant	Modèle			L_w dB(A)	Écart-type dB(A)
B	1	Lourd	88	**109,9**	0,87
B	2	Normal	88	**112,4**	1,11
C	3	Lourd	88	**112,7**	0,87
A	4	Lourd	88	**112,2**	0,50

Une comparaison entre le banc d'essai de première génération et celui de deuxième génération est présentée à la figure 38 pour l'outil *B2*. On note des différences significatives de la puissance acoustique entre les deux générations seulement pour les bandes de tiers d'octave situées au-dessus de 1600 Hz. Ces différentes sont attribuables aux impacts acier sur acier du banc de deuxième génération qui génèrent plus de hautes fréquences que le banc de première génération. En effet, le dissipateur d'énergie du banc de première génération a été isolé afin de minimiser sont rayonnement acoustique. Finalement, la figure 39 présente le spectre du niveau moyen de pression mesuré aux oreilles de l'opérateur lors de l'utilisation de l'outil en milieu de travail. En comparant le spectre de la puissance acoustique de l'outil *B2*, mesuré sur le banc d'essai de deuxième génération (figure 38), avec le niveau de pression moyen, mesuré en milieu de travail (figure 39), on note que les distributions spectrales suivent la même tendance, confirmant une bonne représentativité de la tâche réelle en milieu de travail par le banc d'essai de deuxième génération.

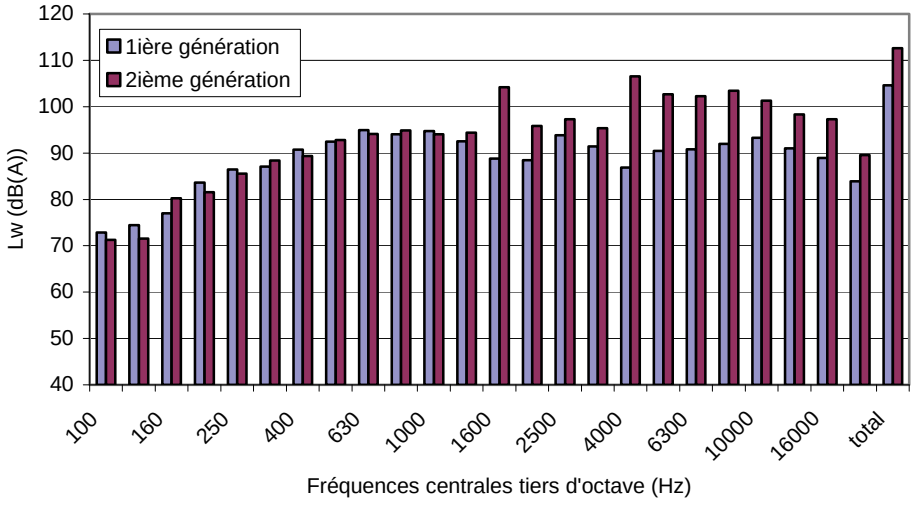


Figure 38. Spectres de puissance acoustique, outil *B2*

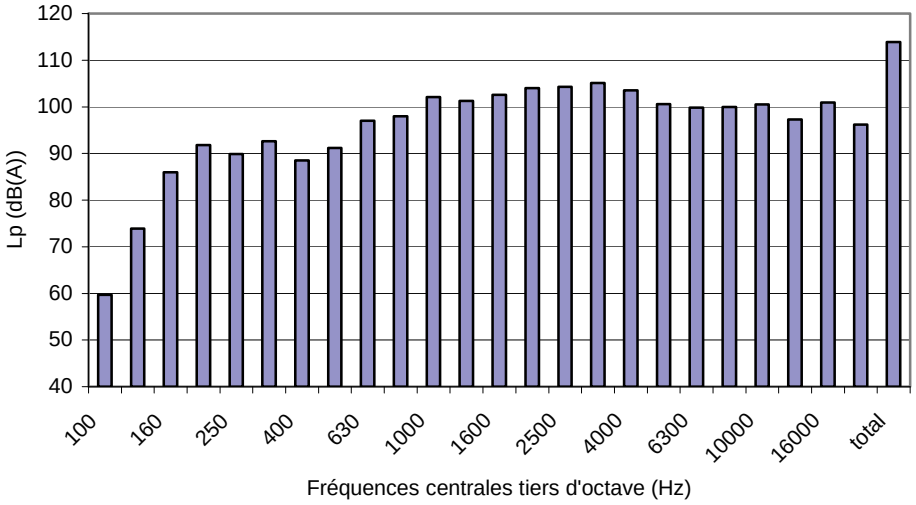


Figure 39. Spectre du niveau de pression moyen dans les garages, outil *B2*

4.6.5 Sommaires des résultats

Un sommaire des résultats vibratoires et acoustiques obtenus avec les marteaux pneumatiques est donné au tableau 48. On note que les valeurs d'émission vibratoire obtenues avec le banc d'essai de deuxième génération sont de 17 à 36 % plus élevées que celles obtenues avec le banc d'essai de première génération. De même, les valeurs de puissance acoustique obtenues avec le banc d'essai de deuxième génération sont de 5,2 à 8,3 dB(A) plus élevées que celles obtenues avec le banc d'essai de première génération. Ces différences significatives sont attribuables à l'interaction entre l'outil et la pièce travaillée.

Tableau 48. Sommaire des résultats en laboratoire pour les marteaux pneumatiques

Fabricant	Modèle	Type	Vibration (m/s^2, W_h)		L_w (dB(A))	
			1ière génération	2ième génération	1ière génération	2ième génération
B	1	Lourd	**8,54**	**10,03**	**102,7**	**109,9**
B	2	Normal	**5,31**	**6,49**	**104,1**	**112,4**
C	3	Lourd	**5,71**	**7,79**	**105,2**	**112,7**
A	4	Lourd	**9,98**	N/A	**107,0**	**112,2**

5. SOMMAIRE DES RESULTATS ET RECOMMENDATIONS

5.1 Sommaire des résultats vibratoires

Pour chacune des classes d'outil testées, les plages des niveaux de vibration mesurés dans les garages ainsi que sur les bancs d'essai de première et de deuxième génération sont résumées au tableau 49. On note que pour les clés pneumatiques et les meuleuses d'outillage, l'écart relatif entre la valeur minimale et la valeur maximale mesurée dans les garages est très élevée. Par ailleurs, le banc d'essai de première génération surestime les valeurs d'émission vibratoire par rapport au banc d'essai de deuxième génération pour les clés pneumatiques. Cette différence est attribuable à la résistance à la rotation moins élevée pour le banc de deuxième génération. Pour les meuleuses d'outillage, le banc d'essai de première génération sous-estime les valeurs d'émission vibratoire par rapport au banc d'essai de deuxième génération. Donc, l'influence de l'interaction entre l'outil et la pièce travaillée sur la valeur d'émission vibratoire de la meuleuse d'outillage semble importante, surtout pour les tâches de ponçage et de nettoyage (voir Tableau 28. Vibration des meuleuses d'outillage, banc de deuxième génération, page 47). Pour la meuleuse, le banc d'essai de deuxième génération fournit un niveau minimum de la valeur d'émission vibratoire très peu élevé par rapport au banc d'essai de première génération (poignée latérale d'une meuleuse, voir tableau 34, page 53). Cependant, pour les clés pneumatiques à impact et les marteaux pneumatiques, les plages de niveau vibratoire obtenues avec les bancs de première et deuxième génération sont similaires.

Tableau 49. Sommaire des niveaux vibratoires selon les classes d'outils

Classe d'outil	Vibration (m/s^2, W_h)					
	Garage		1ière génération		2ième génération	
	Niveau min	Niveau max	Niveau min	Niveau max	Niveau min	Niveau max
Clé pneumatique	**3,75**	**13,36**	**5,24**	**12,54**	**4,05**	**5,67**
Clé pneumatique à impact	**3,63**	**7,85**	**4,01**	**6,93**	**3,83**	**6,46**
Meuleuse d'outillage	**2,53**	**9,38**	**3,55**	**7,59**	**9,61**	**14,59**
Meuleuse	**N/A**	**N/A**	**7,82**	**14,56**	**1,51**	**17,89**
Ponceuse	**4,06**	**8,79**	**5,08**	**9,84**	**N/A**	**N/A**
Marteau pneumatique	**9,89**	**18,78**	**5,31**	**9,98**	**6,49**	**10,03**

En comparant le sommaire des valeurs d'émission vibratoire du tableau 49, avec l'utilisation moyenne de ces outils (tableau 3, page 13), il semble que les ponceuses peuvent être potentiellement problématiques, car elles sont très utilisées dans le secteur de la carrosserie, et présentent des valeurs d'émission vibratoire passablement élevées. Il en est de même pour les

meuleuses, qui peuvent présenter des valeurs d'émission vibratoire relativement élevées, tout en étant moyennement utilisées. Pour les clés pneumatiques, les valeurs d'émission vibratoire peuvent être élevées, cependant ces outils sont moyennement utilisés. Par ailleurs, la clé pneumatique à impact est généralement utilisée sur de courtes périodes, et ses valeurs d'émission vibratoire sont relativement peu élevées, ce qui semble ne pas en faire un outil problématique du point de vue vibratoire. Finalement, les niveaux vibratoires peuvent être assez élevés pour les marteaux pneumatiques, cependant ces outils sont assez peu utilisés.

5.2 Sommaire des résultats acoustiques

Pour chacune des classes d'outil testées, les plages des niveaux de pression acoustique mesurés aux oreilles des opérateurs dans les garages ainsi que les plages des niveaux de puissance acoustique mesurés sur les bancs d'essai de première et de deuxième génération sont résumées au Tableau 50. Sommaire des niveaux acoustiques selon les classes d'outils. On note que pour l'ensemble des classes d'outil, les écarts entre les valeurs minimales et les valeurs maximales mesurées dans les garages sont très élevés (15,3 à 21,1 dB(A)) par rapport aux écarts que l'on obtient sur les bancs de première et de deuxième génération (1,5 à 8,6 dB(A)). Ces différences sont attribuables aux conditions contrôlées de laboratoire pour les bancs d'essai (pression pneumatique d'alimentation, salle semi-anéchoïque, etc.) ainsi qu'à l'utilisation d'une gamme plus restreinte d'outils et à l'utilisation de modèles d'outils plus récents pour les mesures en laboratoire. Par ailleurs, le banc d'essai de première génération surestime les valeurs de puissance acoustique par rapport au banc d'essai de deuxième génération pour les clés pneumatiques à impact. Ces différences sont attribuables à la procédure utilisée pour le banc de première génération, qui consiste à prendre la puissance acoustique maximale entre l'opération de l'outil à vide et l'opération de l'outil en charge avec impacts. Ces modes d'opérations sont des cas extrêmes, et ne reflètent pas nécessairement la puissance acoustique de l'outil lors d'une opération de vissage ou de dévissage normale. Pour les meuleuses et les marteaux pneumatiques, le banc d'essai de première génération sous-estime les valeurs de puissance acoustique par rapport au banc d'essai de deuxième génération. Donc, pour ces outils, l'influence de l'interaction entre l'outil et la pièce travaillée sur la valeur de la puissance acoustique semble importante.

En comparant le sommaire des niveaux acoustique du Tableau 50, avec l'utilisation moyenne de ces outils (tableau 3, page 13), il semble que les ponceuses soient parmi les outils les moins bruyants (à condition qu'elles soient munies d'un silencieux), avec des niveaux de pression acoustique mesurés aux oreilles des opérateurs en milieu de travail qui varient de 83,2 à 104,3 dB(A), et des niveaux de puissance acoustique, mesurés en laboratoire, qui varient de 86,0 à 91,0 dB(A). Étant donné que ces outils sont très utilisés dans le secteur de la carrosserie, ils peuvent cependant être problématiques en exposant les mécaniciens à des doses élevées de bruit. Il en est de même pour les meuleuses et meuleuses d'outillage, ainsi que les clés pneumatiques, qui peuvent présenter des niveaux acoustiques passablement élevés, tout en étant passablement utilisés. Par ailleurs, les clés pneumatiques à impact sont généralement utilisées sur de courtes périodes, cependant leurs niveaux acoustiques peuvent être très élevés, ce qui peut en faire un outil problématique du point de vue acoustique. Finalement, les niveaux acoustiques sont très élevés pour les marteaux pneumatiques, même si ces outils sont peu utilisés.

Tableau 50. Sommaire des niveaux acoustiques selon les classes d'outils

Classe d'outil	Niveau de pression à l'oreille (L_p, dB(A))		Niveau de puissance acoustique de l'outil (L_w, dB(A))			
	Garage		1ière génération		2ième génération	
	Niveau min	Niveau max	Niveau min	Niveau max	Niveau min	Niveau max
Clé pneumatique	**92,1**	**108,5**	**98,3**	**102,9**	**94,5**	**101,8**
Clé pneumatique à impact	**96,6**	**114,9**	**101,0**	**107,2**	**95,6**	**100,0**
Meuleuse d'outillage	**93,9**	**109,2**	**95,6**	**104,2**	**97,8**	**104,5**
Meuleuse	**N/A**	**N/A**	**92,8**	**94,3**	**103,1**	**103,5**
Ponceuse	**83,2**	**104,3**	**86,0**	**91,0**	**N/A**	**N/A**
Marteau pneumatique	**101,1**	**117,4**	**102,7**	**107,0**	**109,9**	**112,7**

5.3 Recommandations

En se basant sur les résultats obtenus et sur les observations effectuées lors des visites dans les ateliers de réparation automobile, plusieurs recommandations visant à minimiser l'exposition au bruit et aux vibrations des travailleurs du secteur automobile peuvent être formulées :

1) Pour les clés pneumatiques, dont le bruit de l'outil provient principalement de l'échappement, il existe des modèles munis d'un silencieux à l'échappement pouvant réduire le bruit d'environ 7 dB(A).

2) Pour les clés pneumatiques à impact, l'utilisation d'un modèle moins bruyant peut réduire l'exposition du travailleur au bruit de 4,5 dB(A) (réduction de 15 dB(A) lorsque l'outil tourne à vide).

3) Pour les clés pneumatiques à impact, il est préférable d'utiliser l'outil avec l'axe de rotation à l'horizontale plutôt qu'à la verticale (réduction de l'exposition aux vibrations), en évitant de travailler avec l'outil à bout de bras.

4) Pour les meuleuses d'outillage, dont le bruit de l'outil provient principalement de l'échappement, il existe des modèles munis d'un silencieux à l'échappement pouvant réduire le bruit d'environ 9 dB(A).

5) Étant donné que le bruit des ponceuses provient principalement de l'échappement, il est recommandé d'utiliser des ponceuses munies d'un silencieux à l'échappement.

6) Il est recommandé d'utiliser un marteau pneumatique avec un dispositif antivibratile afin de réduire l'exposition du travailleur aux vibrations. Si possible, substituer un autre outil à l'utilisation du marteau pneumatique (par exemple une meuleuse).

7) Porter des protecteurs auditifs lors de l'utilisation d'outils portatifs bruyants.

8) Maintenir les doigts et les mains au chaud et à l'abris de l'échappement d'air froid des outils. Porter des gants si nécessaire.

9) Il est recommandé d'opérer les outils pneumatiques à la pression d'alimentation recommandée par le fabricant.

10) Les outils pneumatiques doivent être lubrifiés quotidiennement, ou selon les recommandations du fabricant.

6. CONCLUSION

L'objectif de ce projet de recherche était de caractériser, en laboratoire, le bruit et les vibrations émis par cinq classes d'outils portatifs (clés pneumatiques, clés pneumatiques à impact, meuleuses et meuleuses d'outillage, ponceuses, marteaux pneumatiques), utilisées dans les ateliers de réparation automobile du Québec et identifiées comme étant potentiellement problématiques du point de vue du bruit et des vibrations. Dans un premier temps, un sondage effectué auprès de 40 mécaniciens a permis de déterminer les tâches étant perçues comme étant les plus problématiques, ainsi que d'identifier les modèles d'outils les plus populaires auprès des mécaniciens. À partir des résultats du sondage, 4 à 5 modèles d'outil ont été sélectionnés par classe d'outil, pour l'évaluation de l'émission vibratoire et sonore de ces outils sur des bancs d'essai. Ces bancs d'essai de première génération sont basés sur la série de normes ISO 8662 pour l'évaluation des vibrations main-bras, ainsi que sur la norme ISO 15744 pour l'évaluation de la puissance acoustique rayonnée par l'outil. Cependant, la plupart de ces normes ne tiennent pas compte de l'interaction entre l'outil et la pièce travaillée. Des mesures de bruit et de vibrations ont été effectuées en milieu de travail, afin de guider l'élaboration de bancs d'essai qui tiennent compte de l'interaction entre l'outil et la pièce travaillée. Des tâches représentatives pour chacune de ces classes d'outils ont également été identifiées à partir des observations faites en milieu de travail. Finalement, des bancs d'essai de deuxième génération, qui tiennent compte de l'interaction entre l'outil et la pièce travaillée et qui sont représentatifs de tâches que l'on retrouve dans les ateliers de réparations automobiles, ont été mis au point et les outils sélectionnés ont été à nouveau testé sur ces nouveaux bancs d'essai.

Pour les clés pneumatiques et les clés pneumatiques à impact, le banc d'essai de deuxième génération, qui consiste à simuler le vissage d'écrous sur des tiges filetées, offre une meilleure représentativité de l'utilisation de ces outils en milieu de travail, en plus de simplifier les procédures de mesurage par rapport au banc d'essai de première génération. En effet, les essais réalisés sur le banc d'essai de première génération sont effectués en deux étapes (à vide et en charge), contrairement aux essais sur le banc d'essai de deuxième génération qui sont réalisés en une seule étape. En ce qui concerne les meuleuses d'outillage, le banc d'essai de deuxième génération consiste à effectuer trois tâches (poncer, meuler et nettoyer) qui sont représentatives de l'utilisation de ces outils dans les garages. Ce nouveau banc d'essai offre une meilleure représentativité de l'utilisation de ces outils dans les garages par rapport au banc d'essai de première génération, qui consiste à opérer les outils à vide avec une fraise artificielle excentrée. Pour la mesure de la puissance acoustique rayonnée par l'outil, le banc d'essai de première génération donne des résultats similaires aux trois tâches du banc d'essai de deuxième génération ce qui indique, pour cette classe d'outils, que l'interaction entre l'outil et la pièce travaillée n'est pas la principale source de bruit. Cependant, pour les niveaux de vibration pondérés, les tâches de ponçage et de nettoyage génèrent des niveaux relativement plus élevés pour la majorité des outils testés, par rapport à la tâche de meulage ainsi que par rapport au banc d'essai de première génération. Pour les meuleuses, le banc d'essai de deuxième génération consiste à meuler une plaque encastrée en acier doux, ce qui est plus représentatif de l'utilisation de ces outils dans les garages que le banc d'essai de première génération, qui consiste à opérer la meuleuse à vide en utilisant une meule artificielle avec un balourd. Il semble que pour cette classe d'outils, l'interaction entre l'outil et la pièce travaillée soit une source dominante de bruit, puisque le banc

de deuxième génération génère des niveaux de bruit de 9 à 10 dB(A) plus élevés par rapport au banc de première génération. Par ailleurs, une étude récente de l'INRS [16] a démontré pour le cas des meuleuses électriques, que les mesures à vide n'étaient pas représentatives de l'exposition des travailleurs au bruit de l'outil en milieu de travail. Pour les niveaux vibratoires pondérés, il n'y a pas de tendances générales qui se dégagent de la comparaison des bancs de première et de deuxième génération. Par contre, probablement à cause d'un phénomène de résonance, le niveau vibratoire mesuré sur la poignée latérale d'un des outils était de 5 à 6 fois plus élevé que celui mesuré sur le corps de l'outil. Pour les ponceuses, il n'a pas été jugé nécessaire de mettre au point un banc d'essai de deuxième génération, puisque le banc d'essai de première génération, qui consiste à poncer une plaque encastrée en acier doux, inclut déjà la pièce travaillée. Finalement, pour le marteau pneumatique, un banc d'essai de deuxième génération a été mis au point, qui consiste à opérer l'outil avec un burin de type ciseau sur une plaque en acier doux. Par rapport au banc d'essai de première génération, qui consiste à opérer l'outil avec un burin artificiel dans un dissipateur d'énergie, le banc d'essai de deuxième génération, incluant l'interaction entre l'outil et la pièce travaillée, produit des niveaux de puissance acoustique qui sont de 5 à 8 dB(A) plus élevés. Pour les valeurs d'émission vibratoires, le banc d'essai de deuxième génération génère des niveaux de 17 à 36 % plus élevés par rapport au banc d'essai de première génération. De façon générale, on note que l'exclusion de la pièce travaillée dans certains bancs d'essai donne des résultats qui ne sont pas nécessairement représentatifs de la réalité, tant au niveau vibratoire que acoustique.

Au niveau de l'exposition aux vibrations des travailleurs, il semble que les ponceuses peuvent être potentiellement problématiques, car elles sont très utilisées dans le secteur de la carrosserie, et présentent des valeurs d'émission vibratoire passablement élevées. Il en est de même pour les meuleuses, qui peuvent présenter des valeurs d'émission vibratoire assez élevées, tout en étant moyennement utilisées. Pour les clés pneumatiques, les valeurs d'émission vibratoire peuvent être élevées, et ces outils sont passablement utilisés. Par ailleurs, la clé pneumatique à impact est peu utilisée, et ses valeurs d'émission vibratoire sont relativement peu élevées, ce qui semble ne pas en faire un outil problématique du point de vue vibratoire. Finalement, les niveaux vibratoires peuvent être assez élevés pour les marteaux pneumatiques, cependant ces outils sont relativement peu utilisés. Pour l'exposition au bruit, il semble que les ponceuses soient parmi les outils les moins bruyants (du moins pour les modèles testés). Étant donné que ces outils sont très utilisés dans le secteur de la carrosserie, ils peuvent cependant être problématiques en exposant les mécaniciens à des doses élevées de bruit. Il en est de même pour les meuleuses et meuleuses d'outillage, ainsi que les clés pneumatiques, qui peuvent présenter des niveaux acoustiques passablement élevés, tout en étant moyennement utilisés. Par ailleurs, les clés pneumatiques à impact sont peu utilisées, cependant leurs niveaux acoustiques peuvent être très élevés, ce qui peut en faire un outil problématique du point de vue acoustique. Finalement, les niveaux acoustiques sont très élevés pour les marteaux pneumatiques, donc cette classe d'outil peut être problématique, même si ces outils sont relativement peu utilisés.

BIBLIOGRAPHIE

[1] Répartition des lésions professionnelles acceptées survenues de 1998 à 2003 selon le genre de la lésion et l'année de l'événement pour la nature des lésions 12610 : surdité, perte ou déficience auditive. Rapport D04-137, CSST, DCGI, Service de la statistique, 2004.

[2] M. A. Jayjock et L. Levin. Health hazards in a small automotive body repair shop. Annals of Occupational Hygiene, 28(1):19-29, 1984.

[3] S. Muttamara et K. U. Alwis. Health impacts of garage workers: a preliminary study. Journal of Environmental Health, 56(9):19-24, 1994.

[4] L. Barregard, L. Ehrenström et K. Marcus. Hand-arm vibration syndrome in Swedish car mechanics. Occupational & Environmental Medicine, 60:287-294, 2003.

[5] L. Barregard. Short daily exposure to hand-arm vibrations in Swedish car mechanics. Applied Occupational and Environmental Hygiene, 18(1):35-40, 2003.

[6] G. Gemne, I. Pyykkö, W. Taylor et P. Pelmear. The Stockholm workshop scale for the classification of cold-induced Raynaud's phenomena in the hand-arm vibration syndrome (Revision of the Taylor-Pelmear scale). Scandinavian Journal of Work, Environment & Health, 13:275-278, 1987.

[7] J.-E. Hansson, L. Eklund, S. Kihlberg et C.-E. Östergren. Vibration in car repair work. Applied Ergonomics, 18(1):57-63, 1987.

[8] A.-K. Ekholm, G. Falk. Vibrationskontrol av slaende mutterdragare I bruk pa bilverkstader [Vibration levels in nut-runners in Swedish garages]. Report 92-0260. Malmö, Sweden: Swedish Work Life Research Fund, 1993.

[9] ISO 5349-1 – Vibrations mécaniques – Mesurage et évaluation de l'exposition des individus aux vibrations transmises par la main – Partie 1 : Exigences générales. Organisation internationale de normalisation, 2001.

[10] Niveaux d'exposition au bruit des mécaniciens. Michel Legris, Complexe de Santé et CLSC Paul-Gilbert, 1999.

[11] M. J. Griffin, K. T. Palmer, B. M. Haward et G. S. Paddan. Hand-transmitted vibration: Evaluation of some common sources of exposure in Great Britain. Health and Safety Executive. HSE Books, 79 p., September 1999.

[12] ISO 8662 – Machines à moteur portatives – Mesurage des vibrations au niveau des poignées. Organisation internationale de normalisation.

[13] ISO 15744 – Machines portatives à moteur non électrique – Code pour le mesurage du bruit – Méthode d'expertise (classe de précision 2). Organisation internationale de normalisation, 2002.

[14] P. Marcotte, P.-É. Boileau, S. Rakheja, Y. Aldien et J. Boutin. Contrôle des vibrations main-bras engendrées par l'opération d'outils portatifs vibrants : Considération de l'interface humaine et comportement biodynamique. Rapport R-467, IRSST, 2006.

[15] ISO 3745 – Acoustique – Détermination des niveaux de puissance acoustique émis par les sources de bruit – Méthode de laboratoire pour les salles anéchoïque et semi-anéchoïque. Organisation internationale de normalisation, 1977.

[16] N. Trompette et M. Cafaxe. Analyse de la méthodologie de la déclaration du bruit des machines : application au cas des meuleuses électriques. Rapport ND 2246-203-06, INRS, 2006.

ANNEXE A : QUESTIONNAIRE DISTRIBUÉ AUX MÉCANICIENS

Questionnaire à l'intention des travailleurs de l'industrie automobile pour évaluer les modèles d'outils portatifs les plus utilisés.

Objectifs: Ce questionnaire fait partie d'un projet de recherche visant à évaluer les caractéristiques de bruit et de vibrations émis par les outils portatifs les plus couramment utilisés dans l'industrie de la réparation automobile. Les résultats de ce projet de recherche permettront de formuler des recommandations quant au choix des outils et des méthodes de travail permettant de minimiser l'exposition des travailleurs au bruit ainsi qu'aux vibrations main-bras. Ces informations seront relayées aux travailleurs afin de les sensibiliser à la problématique de l'exposition au bruit et aux vibrations ainsi que de les guider dans l'achat d'outils moins bruyants et présentant des niveaux de vibration moins élevés.

Question 1. Type d'entreprise auquel appartient le travailleur : Concessionnaire automobile, atelier de mécanique générale, atelier de carrosserie, atelier de réparation de camions, atelier spécialisé (indiquez la spécialité : pneu, suspension, silencieux).

_____

Question 2. Sous-secteur d'activité auquel appartient le travailleur ou type de tâche effectuée par le travailleur (transmission, carrosserie (soyez spécifique), électricité, etc.)

_____

Question 3. Utilisation des outils et tâches spécifiques bruyantes ou vibrantes

<table>
<tr><td> </td><td>Outils de serrage sans percussion :
Clé d’angle pneumatique;
Serre-écrou pneumatique,
Boulonneuse,
air ratchet.
?
(souligner le terme couramment utilisé ou indiquer le terme utilisé si pas dans la liste)</td></tr>
<tr><td colspan="2">Marque et modèle utilisé : (exemple : Ingersoll-Rand 1/4" Modèle IR 103)</td></tr>
<tr><td colspan="2">Nombre d’heures d’utilisation par semaine : (exemple 3heures/semaine)</td></tr>
<tr><td colspan="2">Tâche la plus courante : (exemple : changer une roue)</td></tr>
<tr><td colspan="2">Tâche étant perçue comme étant la plus bruyante : (exemple : dévisser un boulon coincé)</td></tr>
<tr><td colspan="2">Tâche étant perçue comme étant la plus vibrante :</td></tr>
<tr><td colspan="2">Commentaires : (exemple : il existe un modèle de marque ‘no-name’ très bruyant, la clé ½’’est très vibrante, etc.)</td></tr>
</table>

Outils de serrage avec percussion :

- Clé à choc pneumatique;
- Clé à percussion pneumatique,
- Air impact wrench,
- ?

(souligner le terme couramment utilisé ou indiquer le terme utilisé si pas dans la liste)

Marque et modèle utilisé : *(exemple : Ingersoll-Rand 1/4" Modèle IR 103)*

Nombre d'heures d'utilisation par semaine : *(exemple 3heures/semaine)*

Tâche la plus courante : *(exemple : changer une roue)*

Tâche étant perçue comme étant la plus bruyante : *(exemple : dévisser un boulon trop serré)*

Tâche étant perçue comme étant la plus vibrante :

Commentaires : *(exemple : il existe un modèle de marque 'no-name' très bruyant, la clé ½''est très vibrante, etc.)*

	Meuleuses droite : • Meuleuse à matrice avec disque à couper • Meuleuse droite avec disque à couper • Cutting wheel, • ? (souligner le terme couramment utilisé ou indiquer le terme utilisé si pas dans la liste)
Marque et modèle utilisé :	
Nombre d'heures d'utilisation par semaine :	
Tâche la plus courante :	
Tâche étant perçue comme étant la plus bruyante :	
Tâche étant perçue comme étant la plus vibrante :	
Commentaires :	

<table>
<tr><td> </td><td>Meuleuses d’angle :
• Meuleuse d’angle,
• Angle grinder
• ?
(souligner le terme couramment utilisé ou indiquer le terme utilisé si pas dans la liste)</td></tr>
<tr><td colspan="2">Marque et modèle utilisé :</td></tr>
<tr><td colspan="2">Nombre d’heures d’utilisation par semaine :</td></tr>
<tr><td colspan="2">Tâche la plus courante :</td></tr>
<tr><td colspan="2">Tâche étant perçue comme étant la plus bruyante :</td></tr>
<tr><td colspan="2">Tâche étant perçue comme étant la plus vibrante :</td></tr>
<tr><td colspan="2">Commentaires :</td></tr>
</table>

	Burins pneumatiques : • Burin pneumatique • Marteau burineur • Zip gun • ? (souligner le terme couramment utilisé ou indiquer le terme utilisé si pas dans la liste)
Marque et modèle utilisé :	
Nombre d'heures d'utilisation par semaine :	
Tâche la plus courante :	
Tâche étant perçue comme étant la plus bruyante :	
Tâche étant perçue comme étant la plus vibrante :	
Commentaires :	

<table>
<tr><td> </td><td>Ponceuse orbitale circulaire :
• Ponceuse orbitale circulaire
• Sander
• ?
(souligner le terme couramment utilisé ou indiquer le terme utilisé si pas dans la liste)</td></tr>
<tr><td colspan="2">Marque et modèle utilisé :</td></tr>
<tr><td colspan="2">Nombre d’heures d’utilisation par semaine :</td></tr>
<tr><td colspan="2">Tâche la plus courante :</td></tr>
<tr><td colspan="2">Tâche étant perçue comme étant la plus bruyante :</td></tr>
<tr><td colspan="2">Tâche étant perçue comme étant la plus vibrante :</td></tr>
<tr><td colspan="2">Commentaires :</td></tr>
</table>

<table>
<tr><td> </td><td>Ponceuse rectangulaire :
• Ponceuse orbitale rectangulaire
• Sander
• ?
(souligner le terme couramment utilisé ou indiquer le terme utilisé si pas dans la liste)</td></tr>
<tr><td colspan="2">Marque et modèle utilisé :</td></tr>
<tr><td colspan="2">Nombre d’heures d’utilisation par semaine :</td></tr>
<tr><td colspan="2">Tâche la plus courante :</td></tr>
<tr><td colspan="2">Tâche étant perçue comme étant la plus bruyante :</td></tr>
<tr><td colspan="2">Tâche étant perçue comme étant la plus vibrante :</td></tr>
<tr><td colspan="2">Commentaires :</td></tr>
</table>

Question 4.

Parmi les outils cités ci-dessus, quels sont selon vous ceux qui :

- **sont les plus bruyants ? :**

_____

- **sont les plus vibrants ? :**

_____

Question 5 :

Existe t'il d'autres outils que vous utilisez couramment et qui selon vous posent un problème de bruit et/ou de vibration?

_____

Nous vous remercions d'avoir répondu à ce questionnaire.

Les informations ainsi recueillies nous permettrons de mieux cibler vos besoins en termes d'outils moins vibrants et moins bruyants.

ANNEXE B : CARACTÉRISATION DU SYSTÈME DE MESURE

Cette annexe décrit les étapes de validation du système utilisé pour la mesure de la puissance acoustique. Dans un premier temps, les sources de référence utilisées pour la calibration seront présentées.

B.1 Sources de référence

Deux sources de référence sont présentées dans cette section : la source Campagna et la source BK. La source de référence Campagna (voir figure 40) est un ventilateur à cage d'écureuil dont l'axe de rotation est vertical.

Figure 40 : Source de référence Campagna

La puissance acoustique délivrée par cette source est connue. Elle est donnée en bandes d'octaves, de tiers d'octave ainsi que comme valeur globale.

La directivité de cette source a été mesurée au moyen de l'antenne décrivant un arc de cercle (voir figure 2, page 9). L'antenne contient cinq microphones et la mesure est réalisée selon 16 arcs de cercle équidistants (22,5° d'écart entre chaque point de mesure). Les niveaux de pression mesurés par les microphones sont représentés à la figure 41 par un jeu de couleur.

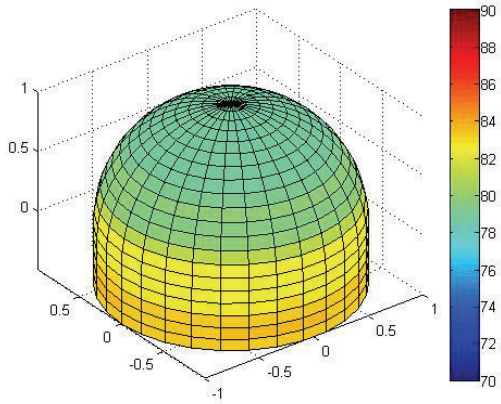


Figure 41 : Directivité de la source Campagna

On observe une directivité horizontale sur le plan de la pièce tournante, c'est-à-dire un niveau plus fort sur les cotés de la source que sur le dessus.

La source de référence BK (voir figure 42) est constituée d'un haut-parleur qui est calibré au préalable avec un microphone placé juste au dessus de la source. Cette source permet de générer sur chaque bande d'octave un niveau de pression acoustique précis. La directivité de la source BK est présentée à la figure 43.

Figure 42 : Source de référence BK

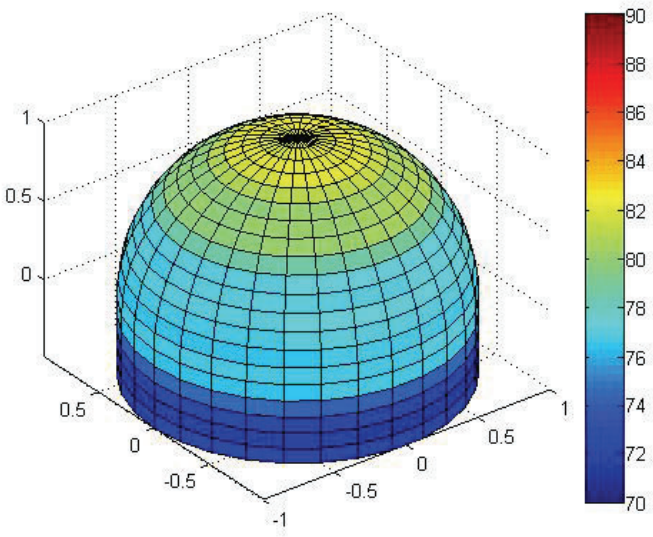


Figure 43 : Directivité de la source BK

B.2 Calibration du système de mesure

Les deux sources présentées précédemment ont été utilisées afin de calibrer le système de mesure de puissance acoustique par trajectoires circulaires des microphones sur un hémisphère. L'antenne se déplace sur un tour pendant 30 secondes et la mesure est réalisée en bandes de tiers d'octave. Deux configurations pour chacune des sources ont été choisies, l'une avec la source au sol et l'autre avec la source sur un socle de béton qui l'élève à 0,75 m de hauteur.

La répétabilité des mesures a été évaluée et est présentée à la figure 44 pour la source Campagna et à la figure 45 pour la source BK. Sur ces figures est également présentée la puissance acoustique des sources mesurée pour les deux configurations (au sol et sur socle). Pour la source Campagna, on remarque une bonne répétabilité suivant la configuration, cependant il y a un écart en basses fréquences entre la configuration sur le sol et celle sur le socle. Pour la source BK, la répétabilité est bonne quelle que soit la configuration. Il existe juste un écart pour les valeurs de 100 Hz et 125 Hz.

En ce qui concerne la différence entre les deux configurations (au sol et sur socle), elle est plus grande dans le cas de la source Campagna que dans la source BK. La directivité des sources peut expliquer cette différence : la source BK rayonnant plutôt vers le haut, l'influence du socle va être faible. Par contre, le socle va avoir un effet plus marqué dans le cas de la source Campagna car elle rayonne plutôt horizontalement.

En conclusion, on peut dire que pour des sources plutôt omnidirectionnelles, la mesure de puissance est fiable et rend bien compte du niveau de bruit émis.

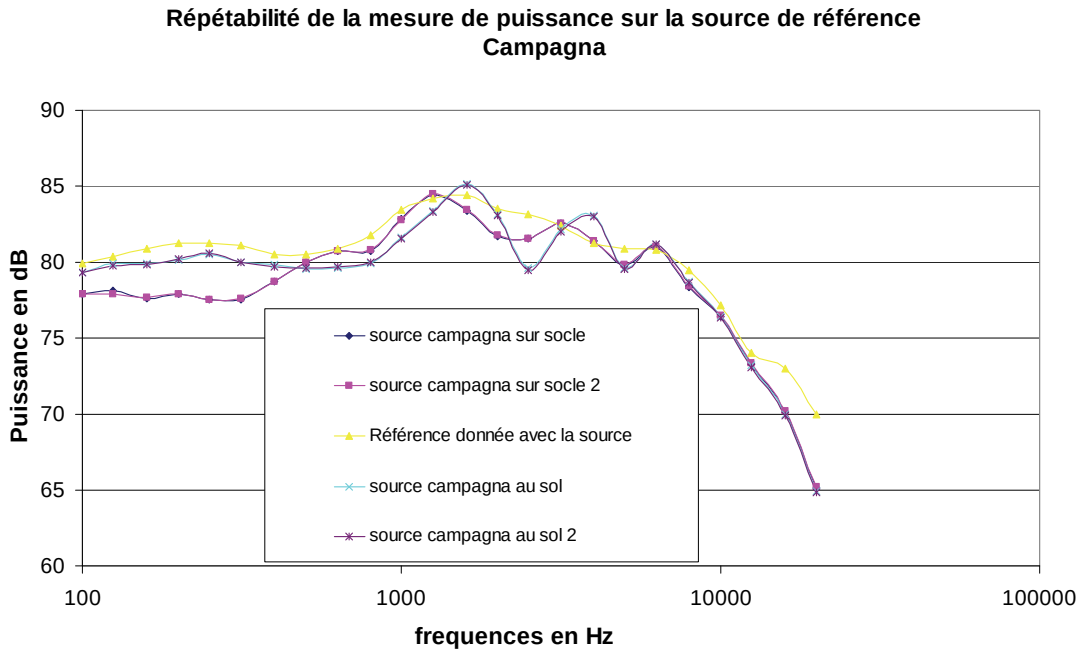


Figure 44 : Répétabilité de la mesure de puissance acoustique sur la source Campagna

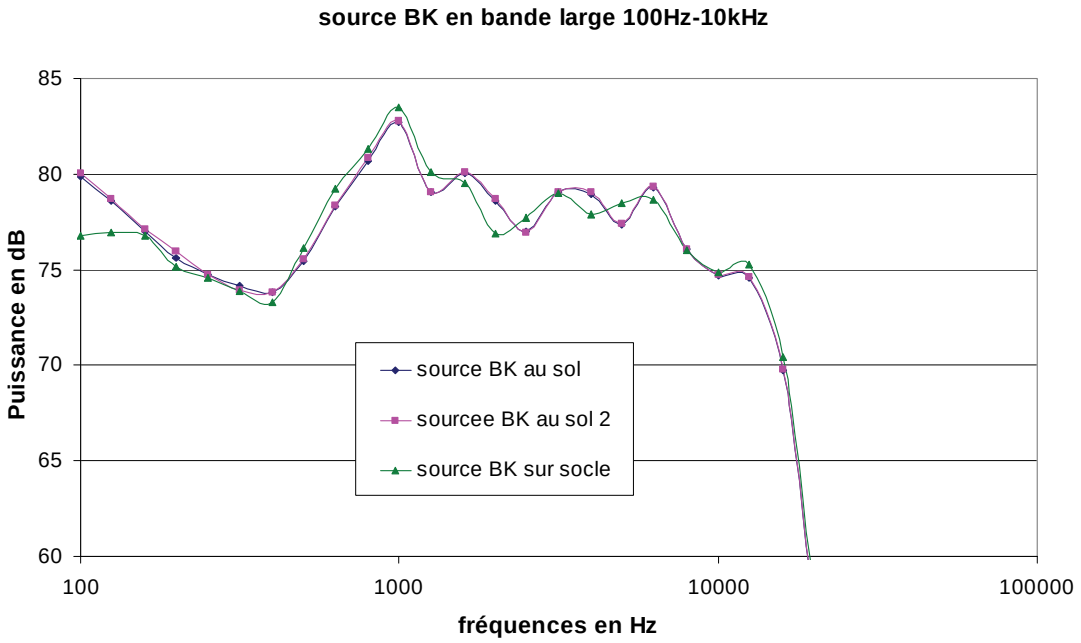


Figure 45 : Répétabilité de la mesure de puissance sur la source BK

Afin de comparer la référence et la mesure sur la source BK, une calibration de la source a été effectuée avec le microphone situé sur la source. Pour chaque bande d'octaves, une puissance de référence de 75 dB a été générée, tel que lue sur l'amplificateur, et on doit retrouver, au niveau du microphone, les valeurs de référence indiquées sur la source. La comparaison des niveaux mesurés aux valeurs de référence est présenté à la figure 46.

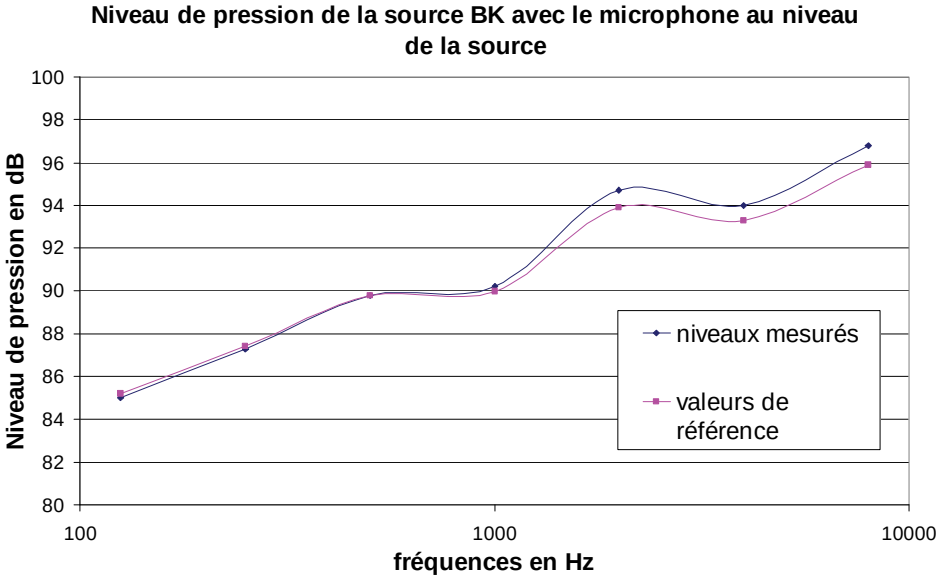


Figure 46 : Validation de la fiabilité de la source de référence BK

Étant donné que l'on retrouve bien les valeurs de référence (écart maximum de 1 dB), on peut donc maintenant comparer les valeurs de référence avec les valeurs de puissance acoustique mesurées avec le système d'antenne rotative de 5 microphones. On règle la puissance de l'amplificateur à 85 dB et pour chaque fréquence centrale de bande d'octaves, on envoie le signal correspondant (de 125 Hz à 8000 Hz, c'est-à-dire 8 signaux différents en tout) et on mesure la puissance acoustique sur la bande de fréquence correspondante avec les 5 microphones en rotation autour de la source. Les résultats ainsi obtenus sont présentés à la figure 47. L'écart entre la référence et la mesure est de moins de 2 dB, sauf pour la bande de fréquence de 125 Hz.

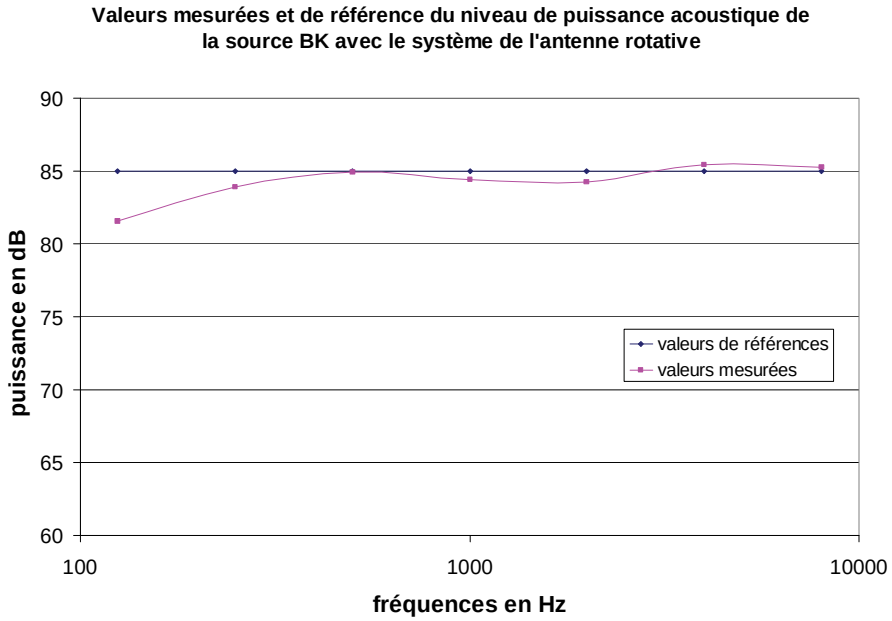


Figure 47 : Comparaison entre la mesure et la référence de puissance acoustique pour la source BK

Les écarts entre les valeurs de référence et la puissance acoustique mesurée avec l'antenne rotative sont présentés à la figure 48, pour les deux sources de référence disposées sur le socle de béton. On observe une différence de moins de 1 dB pour les fréquences supérieures à 500 Hz et de 3 à 4 dB pour les fréquences inférieures à 500 Hz. Cet écart assez important en basses fréquences pourrait provenir de la salle d'essai qui n'est pas qualifiée pour des fréquences inférieures à 200 Hz.

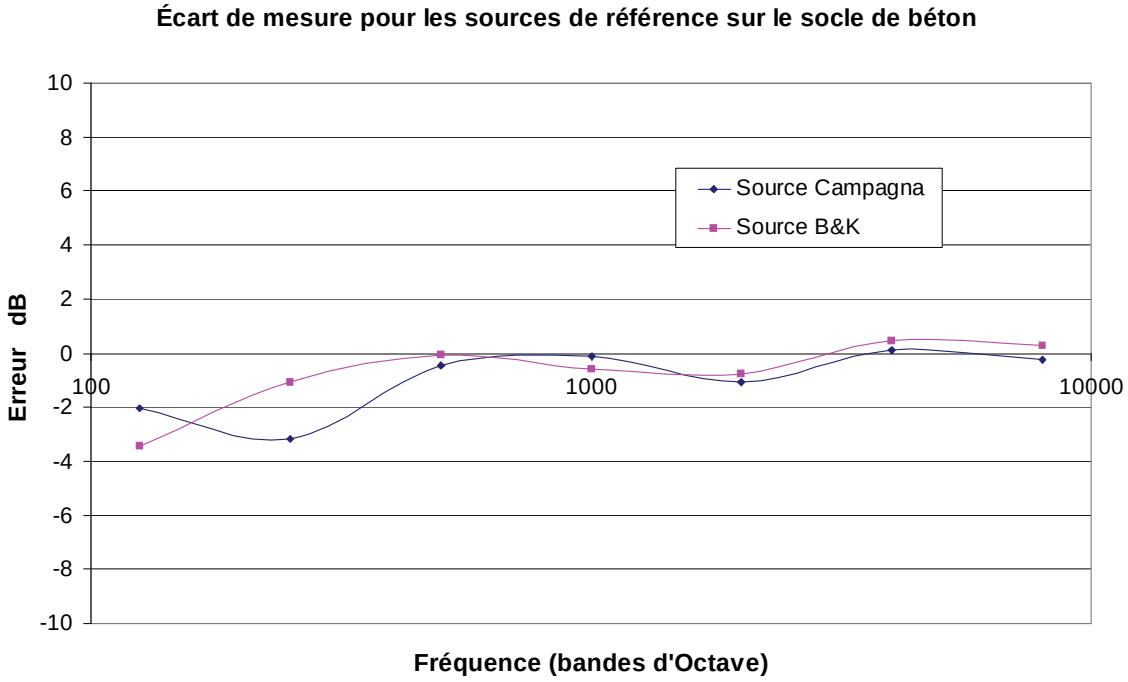


Figure 48 : Écart entre mesure et référence de puissance pour les deux sources (Campagna et BK)

B.3 Influence de l'opérateur sur la mesure

L'utilisation de certains outils nécessite la présence d'un opérateur. On s'attachera dans cette partie à comprendre l'influence de cet opérateur sur la mesure de la puissance acoustique et de la directivité de la source.

Avec la mesure de puissance, on compare les mesures effectuées sur la source de référence Campagna avec et sans opérateur. La source est placée au sol et lorsque l'opérateur est présent, il est debout à une distance de 50 cm de la source. Les résultats ainsi obtenus sont présentés à la figure 49, tandis que l'écart entre les deux courbes est présenté à la figure 50. On note que l'écart est de moins de 0,5 dB. L'influence de l'opérateur sur la mesure de la puissance acoustique est donc négligeable.

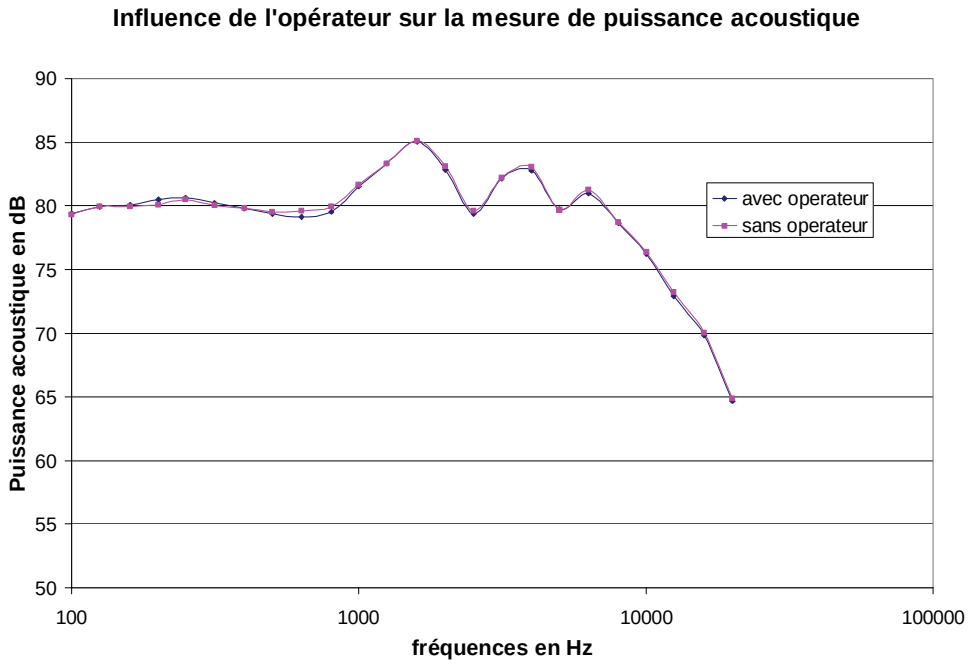


Figure 49 : Comparaison entre les mesures avec et sans opérateur

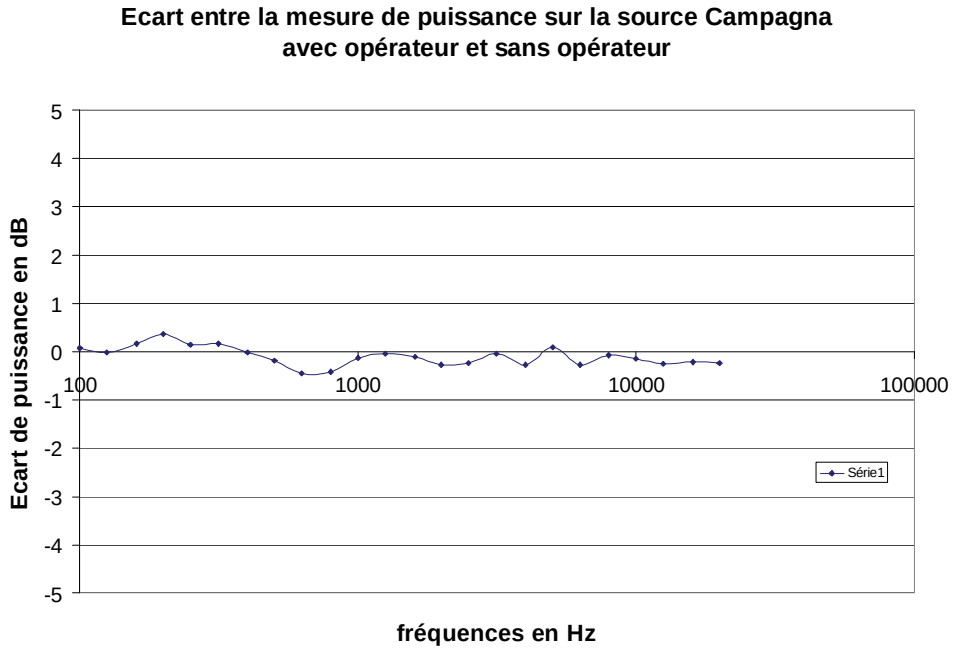


Figure 50 : Écart entre mesures avec et sans opérateur

La directivité de la source Campagna est présentée aux figures 51 et 52, pour les cas sans et avec opérateur respectivement. Lorsqu'on s'intéresse à la mesure de directivité de la source, on s'aperçoit que l'influence de l'opérateur est importante. En effet, pour la mesure sans opérateur, la directivité possède une symétrie de révolution autour de l'axe vertical passant par la source.

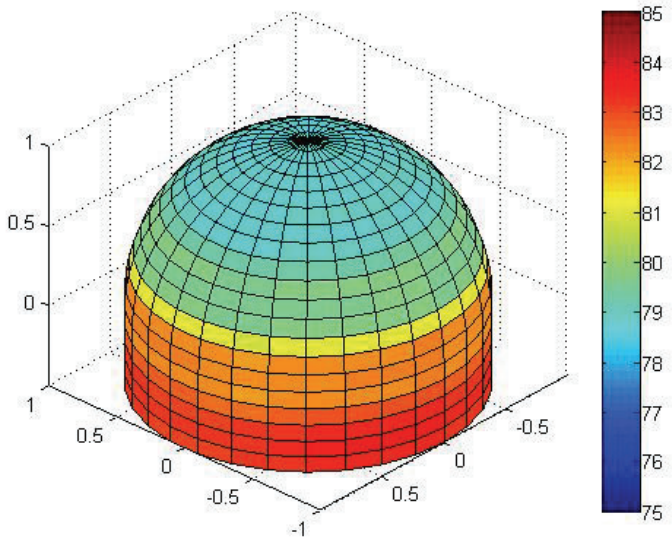


Figure 51 : Directivité sans opérateur sur la source Campagna

Or, pour la mesure avec l'opérateur, le niveau de pression est sensiblement atténué derrière le dos de l'opérateur (on passe de 79 à 76 dB), ainsi que derrière ses jambes (diminution de 83 à 79 dB). Dans l'ensemble, le corps de l'opérateur diminue de 2 à 4 dB le niveau de pression dans la région située derrière lui.

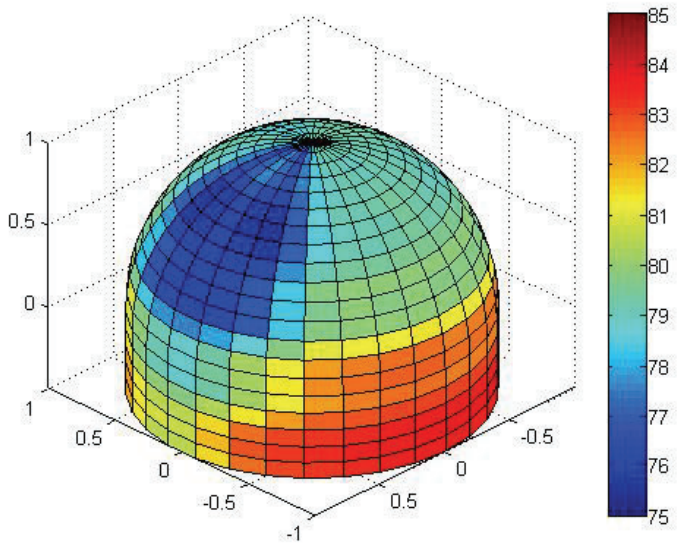


Figure 52 : Directivité avec opérateur sur la source Campagna

ANNEXE C : EXEMPLE DE CALCUL DE L'ÉMISSION VIBRATOIRE D'UN OUTIL PORTATIF

Tableau 51. Calcul de l'émission vibratoire pour une clé pneumatique à impact

Vibration globale pondérée (m/s^2, W_h)				Coefficient de variation	Valeur d'émission vibratoire (m/s^2, W_h)
axe x	axe y	axe z	total		
Sujet 1					
1,56	2,97	3,76	5,04		
2,76	2,41	4,46	5,77		
1,49	2,51	4,19	5,11	**7,41 %**	
2,92	2,46	4,52	5,92		
1,80	2,70	4,12	5,24		
Moyenne			**5,42**		
Écart-type			0,40		
Sujet 2					
2,66	2,11	3,79	5,09		
3,05	2,44	4,02	5,61		
2,95	2,29	3,98	5,46	**4,25 %**	**5,48**
3,25	2,31	3,9	5,58		
2,46	2,39	3,92	5,21		
Moyenne			**5,39**		
Écart-type			0,23		
Sujet 3					
2,71	2,37	3,34	4,91		
1,80	2,92	4,32	5,52		
3,50	2,41	4,19	5,97	**8,13 %**	
2,04	2,54	4,82	5,82		
3,23	2,53	4,43	6,04		
Moyenne			**5,65**		
Écart-type			0,46		

ANNEXE D : LISTE DES OUTILS TESTÉS EN LABORATOIRE

Clés pneumatiques :

Blue Point AT704
Chicago Pneumatic 7828
Chicago Pneumatic 828
Ingersoll-Rand 107XP

Clés pneumatiques à impacts :

Blue Point AT123
Chicago Pneumatic 734H
Chicago Pneumatic 749
Ingersoll-Rand 2135Ti
Ingersoll-Rand 2135Qti

Meuleuses d'outillage:

Blue Point AT109
Chicago Pneumatic 863
Chicago Pneumatic 875
Ingersoll-Rand 3102

Meuleuses:

Chicago Pneumatic 854
Hitachi G12S2

Ponceuses:

Chicago Pneumatic 870
Chicago Pneumatic 7250
Hutchins 3500
Hutchins 3560

Marteaux pneumatiques:

Chicago Pneumatic 715
Chicago Pneumatic 7110
Ingersoll-Rand 121
Snap-on PH3050