

**Cloueuses portatives**  
Développement de méthodes  
de diagnostic vibratoire  
et acoustique

Marc-André Gaudreau  
Pierre Marcotte  
Frédéric Laville  
Thomas Padois  
Jérôme Boutin

RAPPORTS  
SCIENTIFIQUES

R-1033



## NOS RECHERCHES travaillent pour vous !

**Solidement implanté au Québec depuis 1980, 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.**

### 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;

Assurer la diffusion des connaissances et jouer un rôle de référence scientifique et d'expertise;

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

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 des normes, de l'équité, 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](http://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 CNESST ([preventionautravail.com](http://preventionautravail.com))
- au bulletin électronique [InfoIRSST](#)

### Dépôt légal

Bibliothèque et Archives nationales du Québec  
2018  
ISBN : 978-2-89797-031-4  
ISSN : 0820-8395

IRSST - Direction des communications  
et de la valorisation de la recherche  
505, boulevard De Maisonneuve Ouest  
Montréal (Québec)  
H3A 3C2  
Téléphone : 514 288-1551  
[publications@irsst.qc.ca](mailto:publications@irsst.qc.ca)  
[www.irsst.qc.ca](http://www.irsst.qc.ca)  
© Institut de recherche Robert-Sauvé  
en santé et en sécurité du travail,  
novembre 2018

# Clouuses portatives

## Développement de méthodes de diagnostic vibratoire et acoustique

Marc-André Gaudreau<sup>1</sup>, Pierre Marcotte<sup>2</sup>, Frédéric Laville<sup>1</sup>,  
Thomas Padois<sup>1</sup> et Jérôme Boutin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>École de technologie supérieure

<sup>2</sup>IRSST

RAPPORTS  
SCIENTIFIQUES

R-1033



### 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.

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



#### ÉVALUATION PAR DES PAIRS

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.

## **REMERCIEMENTS**

Les auteurs tiennent à remercier le comité de suivi, formé de représentants patronaux et syndicaux, qui nous a accompagné et guidé tout au long du projet, ainsi que François Ouellet, conseiller en valorisation à l'Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et en sécurité du travail (IRSST), pour son soutien. Nous tenons aussi à remercier Serge Plamondon et Olivier Bouthot, techniciens au Département de génie mécanique de l'École de technologie supérieure (ÉTS), ainsi que Pierre Drouin, technicien à l'IRSST pour leurs soutiens techniques. Nous remercions aussi l'entreprise de construction ainsi que les travailleurs qui se sont portés volontaires pour la prise de nos mesures terrains.



## SOMMAIRE

Le fonctionnement des cloueuses portatives étant basé sur un processus d'impact visant à enfoncer un clou, l'utilisation de ces outils expose les travailleurs à des bruits et à des vibrations à caractère impulsionnel, en générant des niveaux très élevés pendant un très court laps de temps. Par ailleurs, l'exposition aux bruits et aux vibrations impulsionnels engendre un risque de développer des maladies professionnelles. Des échanges avec l'Association paritaire pour la santé et la sécurité du travail du secteur de la construction (ASP Construction) ont confirmé que ce type d'outil est très utilisé par les travailleurs de la construction qui, au Québec, se classent parmi les 5 premiers groupes de travailleurs en ce qui concerne le nombre d'indemnisations pour surdité professionnelle. Il est donc nécessaire de choisir et de concevoir des cloueuses moins bruyantes et pour lesquelles le niveau de vibration à la poignée est réduit. Il s'agit d'une tâche difficile à réaliser, car très peu d'information existe sur les niveaux de bruit et de vibrations de ces outils, ainsi que sur les moyens de les réduire.

Ce projet vise trois objectifs : (i) vérifier si les normes actuelles pour le bruit (EN 12549) et les vibrations (ISO 8662) permettent de mesurer en laboratoire des valeurs d'émission acoustique et vibratoire comparables aux valeurs mesurées sur le terrain; (ii) développer et utiliser des méthodes de diagnostic des sources de bruit et vibrations en laboratoire; (iii) formuler des pistes de solution visant à réduire les niveaux de bruit et de vibrations des cloueuses.

(i) Comparaison des mesures sur le terrain et en laboratoire. Pour ce premier objectif, dix cloueuses commerciales ont été retenues : huit cloueuses à charpente, dont une électrique (batteries), une à gaz (butane) et six pneumatiques, et deux cloueuses de toiture pneumatiques (bardeaux d'asphalte). Les vibrations ont été mesurées en laboratoire et sur le terrain à l'aide d'un accéléromètre triaxial fixé à la poignée de l'outil. En ce qui concerne le bruit, la puissance acoustique a été mesurée en laboratoire sur le banc de mesures normalisées (BMN) composé de neuf microphones (grille en cube) alors que pour les mesures terrains, le niveau d'exposition aux oreilles du travailleur a été mesuré avec deux microphones placés sur ses coquilles antibruit. Les mesures terrains ont été réalisées à l'aide d'un système d'acquisition portatif inséré dans un petit sac à dos, ce qui permettait à l'opérateur de ne pas modifier sa façon de travailler. La comparaison des niveaux de bruit mesurés sur le terrain et dans le laboratoire montre que le rayonnement acoustique de la pièce travaillée lors des mesures terrains peut contribuer au niveau global (maximum de 3,5 dBA de plus que les mesures laboratoire), mais que ce rayonnement ne modifie pas ou peu le classement des cloueuses selon leurs émissions sonores. En ce qui concerne les vibrations, le classement des cloueuses selon leurs émissions vibratoires était similaire entre le terrain et le laboratoire. Cela justifie l'utilisation du banc d'essai normalisé en laboratoire pour réaliser le classement des cloueuses.

(ii) Méthodes de diagnostic et sources. Selon les normes actuelles, les mesures pour qualifier une cloueuse nécessitent le recours à 3 opérateurs qui enfoncent plus de 50 clous chacun. Cette procédure exige énormément de temps et complique le travail de diagnostic des sources de bruit. Pour simplifier cette procédure, un dispositif de substitution de l'opérateur (DSO), constitué d'un support, d'un système remplaçant la main et le bras de l'opérateur ainsi que d'un déclencheur à distance, a été développé. Une validation du DSO a été réalisée et les résultats montrent que, pour une série de tests effectuée avec seulement dix clous, la variabilité des résultats est similaire à celle obtenue avec les tests normalisés (BMN) nécessitant trois opérateurs et un total de 150 clous. Par rapport au BMN, l'accélération moyenne obtenue avec

le DSO est légèrement surestimée ( $0,5 \text{ m/s}^2$ ) et les niveaux de puissance acoustique sont légèrement sous-estimés (environ 1 dB). Cependant, bien que ces différences ne soient pas souhaitables, elles ne viennent pas modifier le classement des clouuses selon leurs niveaux de bruit et de vibrations. Par ailleurs, ce système permet de qualifier une clouuse en moins de 30 minutes.

Les méthodes de diagnostic utilisées pour déterminer les sources de bruit sont le masquage des sources (encoffrements), l'imagerie acoustique et la synchronisation bruit/image avec une caméra haute vitesse. L'usage d'un banc d'essai modifié a aussi permis d'évaluer la contribution du rayonnement acoustique de la pièce travaillée au bruit total généré par la clouuse. Les trois principales sources de bruit sont le corps de la clouuse, le système d'échappement et la pièce travaillée. Pour les clouuses pneumatiques, le bruit généré par le corps de la clouuse est le plus important; il atteint des niveaux équivalents à ceux du système d'échappement, tandis que la clouuse électrique et la clouuse au gaz n'émettent pas de bruit d'échappement. Les vibrations se transmettant à l'opérateur par la poignée, seul le corps de la clouuse est contributif aux émissions vibratoires. La clouuse électrique génère des niveaux de vibrations équivalents à ceux des clouuses pneumatiques, alors que les niveaux de bruit sont environ 10 dBA inférieurs. La contribution de la pièce travaillée est significative et d'un ordre de grandeur équivalent au bruit de l'échappement ou du corps de la clouuse. Les vibrations de la clouuse sont pratiquement constantes et ne subissent aucune influence de la pièce travaillée.

(iii) Pistes de solution. Des pistes de solution pour les trois sources de bruit principales sont présentées. Pour les clouuses pneumatiques, l'ajout d'un silencieux est fortement suggéré. Aussi, pour le rayonnement du corps, il est suggéré d'ajouter une barrière acoustique. Finalement, des solutions qui concernent le fonctionnement de la clouuse sont aussi proposées. Pour les vibrations, la principale solution consiste à découpler la poignée de la clouuse. Étant donné que les vibrations d'amplitude maximale sont générées lors de l'arrivée en butée de la pièce mobile (béliet) qui enfonce le clou, l'optimisation des butées de fin de courses (basse et haute) du béliet semble pertinente. Par ailleurs, la quantité d'énergie utilisée pour l'enfoncement d'un clou est constante, peu importe le clou utilisé et le milieu cloué, ce qui oblige dans certains cas de dissiper une quantité d'énergie superflue. Cette énergie est probablement contributive au bruit et aux vibrations et pourrait être réduite si la quantité d'énergie utilisée pour l'enfoncement d'un clou était réglable.

Cette étude a permis de déterminer et de quantifier plusieurs mécanismes générant le bruit et les vibrations des clouuses portatives utilisées dans l'industrie de la construction. Elle a aussi permis le développement d'un dispositif de substitution de l'opérateur pour les essais en laboratoire. Ce dispositif nécessite encore du développement et de l'optimisation afin de mieux approximer les valeurs obtenues par des opérateurs, mais sa faible variabilité permet de qualifier une clouuse en utilisant seulement 10 clous. Un DSO optimisé permettrait de remplacer les 3 opérateurs requis par les normes actuelles et ainsi grandement simplifier l'évaluation d'une clouuse, tout en facilitant l'utilisation, par les fabricants, de bancs d'essai pour évaluer les émissions sonores et vibratoires de leurs clouuses.

## TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS .....	I
SOMMAIRE .....	III
TABLE DES MATIÈRES .....	V
LISTE DES TABLEAUX .....	IX
LISTE DES FIGURES .....	XI
1. INTRODUCTION .....	1
1.1 Problématique de santé et de sécurité du travail .....	1
1.2 Objectifs du projet de recherche .....	2
1.3 Méthodologie et structure du rapport .....	2
2. ÉTAT DES CONNAISSANCES .....	5
2.1 Bruit et vibrations des cloueuses portatives .....	5
2.1.1 Bruit des cloueuses et bruit impulsionnel .....	5
2.1.2 Vibrations des cloueuses et vibrations impulsionnelles .....	6
2.2 Travaux d'identification et de réduction des sources de bruit et de vibrations des cloueuses .....	6
3. SÉLECTION DE DIX MODÈLES DE CLOUEUSE .....	9
3.1 Types de cloueuses étudiés .....	9
3.1.1 Clous de charpente .....	9
3.1.2 Clous de toiture .....	10
3.2 Modèles de cloueuses retenus .....	11
4. MESURES EN LABORATOIRE SELON LES NORMES EN VIGUEUR (BANC DE MESURES NORMALISÉES : BMN) .....	15
4.1 Description du banc de mesures .....	15
4.1.1 Mise en application de la norme relative aux vibrations .....	17
4.1.2 Mise en application de la norme relative à l'acoustique .....	20
4.2 Résultats .....	22
5. MESURES EN MILIEU DE TRAVAIL .....	25
5.1 Sélection de deux environnements de travail et déroulement des mesures .....	25
5.2 Instrumentation des mesures terrains .....	26
5.2.1 Mesures des vibrations .....	26
5.2.2 Mesures acoustiques .....	26

---

5.2.3	Mesures de la pression d'air comprimé .....	27
5.2.4	Système d'acquisition .....	27
5.3	Traitement des données .....	28
5.3.1	Correction selon le nombre de clous enfoncés et durée des signaux.....	28
5.3.2	Correction pour le calcul du niveau d'exposition .....	28
5.4	Résultats.....	29
6.	COMPARAISON DES RÉSULTATS TERRAINS ET EN LABORATOIRE.....	31
6.1	Comparaison des niveaux vibratoires .....	31
6.2	Comparaison des niveaux de bruit.....	32
6.3	Classement des outils.....	33
7.	AMÉLIORATION DU BMN EN DÉVELOPPANT UN DISPOSITIF DE SUBSTITUTION DE L'OPÉRATEUR (DSO).....	37
7.1	Développement du mécanisme de substitution .....	37
7.1.1	Usage du système main-bras pour les burineurs .....	37
7.1.2	Prise en compte de la mesure du bruit .....	38
7.1.3	Influence sur l'accélération de la charge appliquée sur la cloueuse .....	39
7.1.4	Solution finale .....	40
7.2	Validation du DSO .....	42
7.2.1	Comparaison des valeurs moyennes.....	45
7.3	Pondérations alternatives et niveaux de crête.....	46
7.3.1	Niveaux vibratoires : pondération hF et valeurs de crête .....	46
7.3.2	Niveaux de bruit : pondération C et valeurs de crête .....	47
7.4	Recommandations .....	48
7.4.1	DSO avec les mêmes valeurs que les sujets humains.....	48
7.4.2	Déclencheur automatique amélioré .....	49
7.4.3	Système de retenue plus facile d'installation .....	49
7.4.4	Limiter les ajustements d'alignement.....	49
8.	DÉVELOPPEMENT D'UNE MÉTHODE D'IDENTIFICATION ET DE QUANTIFICATION DES MÉCANISMES DE GÉNÉRATION DU BRUIT ET DES VIBRATIONS .....	51
8.1	Encoffrement partiel et silencieux .....	51
8.2	Imagerie acoustique.....	58
8.3	Influence du rayonnement de la pièce travaillée .....	64
8.3.1	Description du banc de test rayonnant.....	64
8.3.2	Comparaison des accélérations avec le banc de sable.....	65
8.3.3	Comparaison des puissances acoustiques avec le banc de sable.....	67
8.3.4	Estimation de la puissance acoustique rayonnée par la table .....	67

8.3.5	Estimation de la puissance acoustique rayonnée par les structures terrains.....	69
8.4	Caméra haute vitesse .....	70
8.4.1	Durée de l'enfoncement d'un clou .....	71
8.4.2	Mesures avec vue d'ensemble .....	72
8.4.3	Synchronisation des images avec les signaux vibratoires du banc rayonnant .....	72
9.	SYNTHÈSE DES SOURCES ET PISTES DE SOLUTION.....	75
9.1	Le bruit d'échappement .....	75
9.2	Le rayonnement du corps de la cloueuse.....	75
9.3	La pièce travaillée.....	76
9.4	Le choc du bélier (fin de course).....	76
9.5	La quantité d'énergie constante .....	77
10.	CONCLUSION.....	79
	BIBLIOGRAPHIE .....	81
ANNEXE A :	SONDAGE EFFECTUÉ AUPRÈS D'ENTREPRISES DE LA CONSTRUCTION.....	85



## LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Caractéristiques concernant les types de clous standards .....	9
Tableau 2	Résultats globaux en laboratoire, vibrations et bruit .....	23
Tableau 3	Résultats terrains globaux, vibrations et bruit .....	30
Tableau 4	Comparaison des niveaux de vibrations obtenus en laboratoire et sur le terrain .....	32
Tableau 5	Comparaison des niveaux de bruit obtenus en laboratoire et sur le terrain .....	33
Tableau 6	Classement des cloueuses de charpente selon leurs niveaux vibratoires (de la moins vibrante à la plus vibrante) .....	34
Tableau 7	Classement des cloueuses de toiture selon leurs niveaux vibratoires (de la moins vibrante à la plus vibrante) .....	34
Tableau 8	Classement des cloueuses de charpente selon leurs niveaux acoustiques (de la moins bruyante à la plus bruyante) .....	35
Tableau 9	Classement des cloueuses de toiture selon leurs niveaux acoustiques .....	35
Tableau 10	Niveaux de puissance acoustique avec une source de référence (avec et sans le support) .....	38
Tableau 11	Comparaison des accélérations efficaces pondérées, par ordre croissant, entre les mesures avec les sujets humains (BMN) et les mesures avec le DSO .....	45
Tableau 12	Comparaison des niveaux de puissance acoustique, par ordre croissant, entre les mesures avec les sujets humains (BMN) et celles avec le DSO .....	46
Tableau 13	Niveau efficace, niveau de crête et facteur de crête pour l'accélération pondérée $Wh$ et $hF$ (axe $z$ ) .....	47
Tableau 14	Niveau efficace, niveau de crête et facteur de crête pour la pression acoustique pondérée $A$ et $C$ (microphone #9) .....	48
Tableau 15	Description des différents essais d'enclassement avec la cloueuse PB3 .....	52
Tableau 16	Comparaison des accélérations pondérées pour le DSO, par ordre croissant, entre les mesures sur le banc rayonnant et celles sur le banc de sable .....	66
Tableau 17	Classement des cloueuses selon le niveau de puissance acoustique pour les mesures avec le DSO sur le banc rayonnant et sur le banc de sable .....	67
Tableau 18	Valeurs estimées du niveau de la puissance acoustique du rayonnement de la table du banc rayonnant ( $L'_w$ table), par soustraction énergétique .....	68
Tableau 19	Valeurs estimées de la puissance acoustique du rayonnement de la charpente ( $L'_w$ charpente), par soustraction énergétique ( $W_{terrain} - W_{BMN}$ ) .....	69
Tableau 20	Valeurs estimées de la puissance acoustique du rayonnement de la toiture ( $L'_w$ toiture), par soustraction énergétique ( $W_{terrain} - W_{BMN}$ ) .....	69



## LISTE DES FIGURES

Figure 1	Types de têtes de clou et de chargement utilisés par les cloueuses à charpente.....	10
Figure 2	Clou à bardeaux et bobine de clous.....	11
Figure 3	Présentation des cloueuses choisies .....	12
Figure 4	Bac de sable (selon la norme ISO 8662-11:1999).....	16
Figure 5	Détails concernant la pièce de bois enfouie dans le sable. (a) stencil, et pièces prêtes à être utilisées, (b) pièce utilisée lors des essais en laboratoire.....	16
Figure 6	(a) Position de travail de l'opérateur et (b) position du capteur d'accélération et définition de l'axe de percussion (axe z) .....	17
Figure 7	Filtre de pondération main-bras (norme ISO 5349-1:2001) .....	18
Figure 8	(a) Accéléromètre triaxial monté sur une plaquette de montage, (b et c) montages types de la plaquette vissée directement dans le bâti de la cloueuse et (d) avec une contre-plaquette collée sur le bâti.....	19
Figure 9	Banc d'essai pour évaluer l'émission sonore des cloueuses (selon la norme NF EN 12549:1999 + A1:2008).....	21
Figure 10	Travailleurs en action avec le système de mesure terrains : (a) pour les travaux de charpente et (b) pour les travaux de toiture. ....	26
Figure 11	Position des microphones sur les coquilles avec bonnette anti-vent : (a) vue du casque et des deux microphones sur les coquilles antibruit de gauche (bleu) et de droite (rouge); (b) vue agrandie du microphone de l'oreille droite.....	27
Figure 12	Mécanisme de substitution main-bras : (a) utilisation avec un marteau burineur, (b) problème de torsion et (c) problème de préhension .....	37
Figure 13	Source de puissance de référence (a) sans le support et (b) avec le support Note : la couverture évite le contact de la source avec le sable du bac.....	38
Figure 14	Contact entre la structure et le DSO : (a) contact direct et (b) ajout de plots flexibles.....	39
Figure 15	Accélération globale en fonction de la charge appliquée (cloueuse PB3).....	40
Figure 16	Solution finale du dispositif de substitution de l'opérateur (DSO) .....	40
Figure 17	Système de retenue de la cloueuse (2 points d'ancrage) avec cales d'épaisseur variable .....	41
Figure 18	Système de déclenchement à distance : (a) position fermée, prêt à déclencher et (b) position ouverte .....	42
Figure 19	Accélération efficace pondérée en fonction du niveau de puissance acoustique (a) pour trois sujets humains et (b) avec le DSO .....	43

Figure 20	Accélération efficace pondérée en fonction du niveau de puissance acoustique pour a) PR1, b ) PR2, c) PB1, d) PB2, e) PB3,f) GB1 et g) EB1.....	44
Figure 21	Photographies des moyens d'encoffrement partiel : (a) Barymat sur la pièce travaillée, (b) extraction du silencieux et (c) encoffrement de la cloueuse .....	53
Figure 22	Accélération efficace pondérée en fonction du niveau de puissance acoustique .....	54
Figure 23	Spectre de puissance acoustique en tiers d'octave pour la cloueuse PB3 : (a) sans traitement, (b) bruit résiduel, (c) bruit de l'échappement d'air, (d) bruit de la pièce travaillée et (e) bruit du corps de la cloueuse .....	55
Figure 24	Comparaison des spectres de puissance acoustique de la cloueuse PB3 (S3) par rapport au (a) bruit résiduel (RESI), (b) bruit de l'échappement d'air (SIL), (c) bruit de la pièce travaillée (BUC) et (d) bruit du corps de la cloueuse (COR) .....	57
Figure 25	(a) Antenne acoustique et (b) antenne positionnée devant la cloueuse.....	58
Figure 26	Signaux temporels pour les cloueuses : a) PB3, b) GB1 et c) EB1 .....	59
Figure 27	Cartographie des sources acoustiques de la cloueuse pneumatique PB3 à 4 instants différents. Les barres de couleur représentent le niveau de pression acoustique en dBA .....	61
Figure 28	Cartographie des sources acoustiques de la cloueuse à gaz GB1 à 3 instants différents. Les barres de couleur représentent le niveau de pression acoustique en dBA .....	62
Figure 29	Cartographie des sources acoustiques de la cloueuse électrique EB1 à 3 instants différents. Les barres de couleur représentent le niveau de pression acoustique en dBA .....	63
Figure 30	Description des composantes du banc rayonnant.....	65
Figure 31	Spectre de l'accélération mesurée (accéléromètre 2) sur la table du banc rayonnant.....	66
Figure 32	Caméra haute vitesse : (a) vue rapprochée pour mesurer l'enfoncement d'un clou et (b) vue éloignée pour mesurer le mouvement global de la cloueuse .....	70
Figure 33	Caméra haute vitesse (6000 Hz) utilisée pour visualiser l'enfoncement d'un clou de charpente avec la cloueuse PB3 : (a) début et (b) fin .....	71
Figure 34	Caméra haute vitesse (6000 Hz) utilisée pour calculer la vitesse d'enfoncement avec (a) des clous peints par espacements de $\frac{1}{4}$ po (6 mm) en noir et blanc et (b) une image de la cloueuse PB3 montrant le clou en train de s'enfoncer .....	72
Figure 35	Synchronisation de la caméra haute vitesse avec le signal vibratoire du banc rayonnant pour les cloueuses EB1 (haut) et PB3 (bas) .....	73

## 1. INTRODUCTION

### 1.1 Problématique de santé et de sécurité du travail

Les cloueuses portatives sont des outils utilisés dans plusieurs milieux de travail (principalement le secteur de la construction et les fabricants de produits de bois). Le fonctionnement des cloueuses portatives étant basé sur un processus d'impact visant à enfoncer un clou, ces outils exposent les travailleurs à des bruits et à des vibrations à caractère impulsif, en générant des niveaux très élevés pendant un très court laps de temps. Par ailleurs, l'exposition aux bruits et aux vibrations impulsifs engendre un risque de développer des maladies professionnelles tels la surdité ainsi que le syndrome vibratoire main-bras. Le niveau de bruit équivalent sur 1 seconde d'un seul impact peut atteindre 105 dBA (Shanks, 2008), soit, lors d'une utilisation typique (12 000 clouages par jour), un niveau équivalent sur 8 heures de 101 dBA, d'où un risque de surdité professionnelle chez les utilisateurs. De plus, la nature impulsif du bruit d'impact augmente le risque de surdité professionnelle (Davis et Clavier, 2016). Par ailleurs, le niveau équivalent de vibration d'un seul impact sur 3 secondes peut atteindre  $4 \text{ m/s}^2$  soit, lors d'une utilisation typique, un niveau équivalent sur 8 heures de  $4,5 \text{ m/s}^2$ , bien au-dessus du niveau de précaution santé de  $2,5 \text{ m/s}^2$  et proche du seuil limite d'exposition de  $5 \text{ m/s}^2$  (Conseil de l'Union européenne, 2002), d'où un risque de développer le syndrome vibratoire main-bras. Des échanges avec l'ASP Construction ont confirmé que ce type d'outil est très utilisé par les travailleurs du groupe de profession « charpentier en charpentes de bois et travailleurs assimilés » qui est, au Québec, dans les 5 premiers groupes de travailleurs identifiés en ce qui concerne le nombre d'indemnités pour surdité professionnelle pour la période 2005-2009, avec 425 indemnités, soit 3,1 % de l'ensemble des cas de surdité professionnelle. Il est donc nécessaire de choisir et de concevoir des cloueuses moins bruyantes et présentant un niveau de vibration réduit à la poignée de l'outil, ce qui est difficile, car très peu d'information existe sur les niveaux de bruit et de vibrations de ces outils ou sur les moyens de les réduire.

De façon plus spécifique, les problématiques scientifiques et technologiques associées aux problématiques d'exposition au bruit et aux vibrations peuvent être regroupées en deux catégories, une catégorie « mesure des émissions » et une catégorie « réduction des émissions ». Elles sont présentées selon ces deux catégories :

#### 1) Problématique de mesure des émissions

- a) Il n'est pas possible de choisir un outil moins bruyant et moins vibrant, car les niveaux d'émission acoustique et vibratoire des outils couramment utilisés au Québec ne sont pas connus;
- b) Même si on effectue une mesure normalisée en laboratoire des émissions acoustique et vibratoire, il y a un doute sur le fait que les normes de mesure en laboratoire représentent bien les émissions sur le terrain.

#### 2) Problématique de réduction des émissions

- a) Les solutions classiques d'isolation du bruit et des vibrations ne sont pas applicables aux cloueuses portatives comme pour beaucoup d'outils portatifs;
- b) Très peu d'informations sont disponibles dans la littérature sur les sources de bruit et vibration de ces outils, ce qui ne permet pas aux fabricants de proposer des outils (ou

des adaptations de ceux-ci) moins bruyants et moins vibrants ni aux utilisateurs de savoir comment les adapter ou les utiliser.

## **1.2 Objectifs du projet de recherche**

Afin de répondre à la première problématique de la mesure des émissions acoustiques et vibratoires des clouees portatives, l'objectif du projet est de :

1. Vérifier si les méthodes de mesures en laboratoire représentent bien les mesures terrains.

Afin de répondre à la deuxième problématique de réduction du bruit et des vibrations des clouees, les objectifs du projet sont :

2. Développer et utiliser une méthode de diagnostic des sources de bruit et vibrations en laboratoire.
3. Formuler des pistes de solutions pour concevoir de nouveaux outils moins bruyants et moins vibrants ou adapter les outils existants ou modifier leur utilisation pour diminuer les émissions vibratoires et acoustiques. La réalisation de cet objectif est basée sur l'identification et la quantification des sources de bruit et de vibrations découlant de l'atteinte de l'objectif no 2.

## **1.3 Méthodologie et structure du rapport**

Suivant l'introduction, le chapitre 2 présente l'état de l'art sur : (1) les niveaux de bruit et de vibrations des clouees portatives ainsi que les effets sur la santé des travailleurs des vibrations et des bruits impulsifs tels que ceux émis par les clouees et (2) les travaux d'identification et de réduction des sources de bruit et de vibrations des clouees. Les sept chapitres suivants correspondent à sept tâches qui ont été identifiées pour répondre aux objectifs du projet. Finalement, le chapitre 10 présente les conclusions.

Les 7 tâches de la méthodologie sont présentées dans ce qui suit :

### **Pour l'objectif no 1 :**

Chapitre 3 - Sélection des modèles de clouees qui sont utilisés pour les études terrain et laboratoire

Chapitre 4 - Utilisation d'un banc de mesures normalisées (BMN) pour évaluer, en laboratoire, les niveaux de bruit et de vibrations des clouees sélectionnées

Chapitre 5 - Mesure, en milieu de travail, des niveaux de bruit et de vibrations des clouees sélectionnées

Chapitre 6 - Comparaison des résultats terrain et laboratoire

**Pour l'objectif no 2 :**

Chapitre 7 - Amélioration du BMN en développant un dispositif de substitution de l'opérateur (DSO) pour remplacer les 3 sujets humains et ainsi pouvoir accélérer les procédures de mesures laboratoire.

Chapitre 8 - Développement de méthodes de diagnostic et identification des mécanismes de génération du bruit et des vibrations.

**Pour l'objectif no 3 :**

Chapitre 9 - Élaboration de pistes de solution pour concevoir de nouveaux outils moins bruyants et moins vibrants ou adapter les outils existants ou modifier leur utilisation pour diminuer les émissions vibratoires et acoustiques.



## 2. ÉTAT DES CONNAISSANCES

### 2.1 Bruit et vibrations des cloueuses portatives

#### 2.1.1 Bruit des cloueuses et bruit impulsionnel

Un rapport de recherche publié en 2008 par le HSE (Shanks, 2008) sur le bruit émis par des cloueuses et agrafeuses inclut des résultats de mesures du  $L_{pA,1s}$  (niveau de pression acoustique d'émission pondéré A d'un seul impact sur 1 seconde) avec 11 modèles d'outils en laboratoire et avec ces mêmes outils en usage sur 4 sites industriels. Les niveaux  $L_{pA,1s}$  obtenus sur les sites industriels varient de 85 à 105 dBA. Pour estimer le  $L_{pA,8h}$  (niveau de pression acoustique d'émission pondéré A équivalent sur une journée de travail de 8 heures), on peut simuler un poste de travail de réparation de palettes qui comporterait une moyenne de 30 clouages par palette pour 400 palettes par jour, soit 12 000 clouages par jour : les valeurs des  $L_{pA,8h}$  correspondant aux  $L_{pA,1s}$  précédents donnent des niveaux équivalents sur 8 heures de 81 à 101 dBA, ce qui engendrerait un risque de surdité professionnelle. L'ordre de grandeur du  $L_{pA,1s}$  est confirmé par des mesures effectuées dans une usine de fabrication de palettes en France (Tisserand et Triomphe, 2011); les niveaux  $L_{pA,1s}$  pour trois modèles de cloueuses variaient de 96 à 99 dBA.

Par ailleurs, la nature impulsionnelle du bruit d'impact augmente le risque de surdité professionnelle. En effet, il a été démontré que pour un niveau équivalent de bruit d'un point de vue énergétique, un contenu impulsionnel augmente le temps de récupération de l'oreille par rapport à un bruit de nature continu (Irle, Hesse et Strasser, 1998). Ce risque est par ailleurs reconnu par différents organismes réglementaires. Par exemple, le Règlement sur la santé et la sécurité du travail du Québec (Québec, 2015, sect. Section XV) stipule, en plus de la dose de bruit quotidienne maximale, le nombre d'impacts auquel un travailleur peut être exposé en fonction des amplitudes crête des bruits d'impacts.

Un bruit impulsionnel est défini comme un bruit qui connaît une variation très importante et abrupte de la pression acoustique sur une durée de l'ordre de la microseconde à la milliseconde (Davis et Clavier, 2016). Étant donné la nature soudaine et imprévisible des bruits impulsionnels, le réflexe acoustique, qui est un mécanisme de protection de l'audition de l'oreille moyenne, n'est pas suffisamment rapide pour limiter l'exposition au bruit de la cochlée. Le réflexe acoustique est constitué de deux mécanismes au niveau des osselets de l'oreille moyenne (Amrein et Letowski, 2012). Un premier mécanisme consiste en la contraction du muscle stapédien (ou muscle de l'étrier) qui, en se contractant, déplace la tête de l'étrier vers l'arrière, diminuant la force exercée sur la fenêtre ovale de la cochlée et diminuant ainsi le son qui y est transmis. Un deuxième mécanisme consiste en la contraction du muscle du marteau (ou muscle tenseur du tympan), dont la contraction augmente la rigidité du tympan. Cependant, chez l'humain ne souffrant pas d'hyperacousie ou du syndrome du choc acoustique, seul le réflexe stapédien est déclenché. Le délai d'activation du réflexe stapédien serait de 10 à 150 millisecondes, tandis que le délai de relaxation varierait de 200 microsecondes à 2 secondes selon les cas (Amrein et Letowski, 2012). Les longs délais d'activation et de relaxation limitent l'efficacité du réflexe acoustique aux basses fréquences seulement (en dessous de 1-2 kHz) et aux bruits de longues durées (donc inefficace pour les bruits impulsionnels). Pour les basses fréquences, le réflexe acoustique procurerait une atténuation du bruit de l'ordre de 10-20 dB,

tandis qu'elle serait seulement de l'ordre de quelques dB et même nulle pour les plus hautes fréquences (Amrein et Letowski, 2012).

### **2.1.2 Vibrations des cloueuses et vibrations impulsionnelles**

Selon un rapport de recherche publié en 2007 par le HSE (Heaton, Hewitt et Yeomans, 2007) sur les vibrations des cloueuses et agrafeuses, le niveau équivalent d'accélération d'un seul impact sur 3 secondes ( $a_{hw,3s}$ ) peut atteindre  $4 \text{ m/s}^2$  pondéré selon la norme ISO 5349-1 (ISO, 2001), ce qui correspond à un niveau équivalent sur 8 heures, A(8), de  $4,5 \text{ m/s}^2$  pour une utilisation typique de 12 000 clouages par jour. Ce niveau d'exposition se situe bien au-dessus du niveau de précaution santé de  $2,5 \text{ m/s}^2$  et légèrement en dessous du seuil limite d'exposition de  $5 \text{ m/s}^2$  (Conseil de l'Union européenne, 2002). Par ailleurs, la nature impulsionnelle de la vibration, reflétée par un facteur de crête élevé (60 à 110) de l'accélération non pondérée, mais limitée en fréquence (de 6,3 à 1250 Hz), calculée selon les dispositions de la spécification technique ISO/TS 15694 (ISO, 2004), pourrait augmenter les risques de développer le syndrome vibratoire main-bras.

Une étude comparant des travailleurs utilisant des outils vibrants non impulsionnels (sans impacts) à des travailleurs utilisant des outils vibrants avec impacts démontre une augmentation des symptômes liés à l'exposition aux vibrations main-bras du coude et de l'épaule pour les travailleurs utilisant des outils à impacts de basses fréquences, et du poignet pour ceux utilisant des outils à impacts de hautes fréquences, par rapport à des travailleurs utilisant des outils vibrants sans impacts (Kihlberg et Hagberg, 1997). Par ailleurs, une étude réalisée auprès de 141 travailleurs souffrant du syndrome vibratoire main-bras démontre une forte association entre l'utilisation d'outils vibrants à impacts et le développement d'attaques de blanchiment des doigts associé au syndrome de Raynaud, avec un effet prédominant de l'impulsivité du choc par rapport à l'accélération pondérée (Pelmear, Kusiak et Leong, 1995), suggérant un effet nocif plus marqué pour les outils percutants exposant à des chocs élevés. Par ailleurs, il a été démontré que l'opération d'outils percutants (clés à chocs) peut détériorer la perception tactile des doigts, pour une exposition équivalente sur 8 heures, A(8), aussi basse que  $1,3$  à  $2 \text{ m/s}^2$  (Bovenzi, Apostoli, Alessandro et Vanoni, 1997). Une étude sur des riveteurs dans l'industrie aéronautique suggère que les utilisateurs d'outils à impacts sont plus susceptibles de rapporter des problèmes de douleurs et de raideurs à la main, au bras, à l'épaule ainsi qu'au poignet (Burdorf et Monster, 1991).

## **2.2 Travaux d'identification et de réduction des sources de bruit et de vibrations des cloueuses**

À notre connaissance, peu d'études ont été effectuées sur l'identification des sources de bruit des cloueuses portatives. Dans une étude financée par le National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) des États-Unis, le bruit d'une cloueuse pneumatique opérée sur un plan réfléchissant dans une salle semi-anéchoïque a été enregistré à l'aide d'un microphone (Adelberg, Anderson, Kuykendall, Schwartz et Vu, 2002). Le signal temporel de la pression acoustique a été analysé en fonction des maximums d'amplitude du signal, et ces maximums ont été attribués aux événements suivants : (1) l'entrée de l'air lorsque la gâchette est activée, (2) la collision du piston sur le heurtoir de caoutchouc à l'avant de la cloueuse, (3) l'échappement d'air et (4) l'impact de retour du piston à l'arrière de la cloueuse. Selon les auteurs, les deux principales sources de bruit seraient la collision du piston sur le heurtoir en

caoutchouc suivi du bruit d'échappement de la cloueuse. Une étude conjointe du CARSAT de l'Auvergne et de l'entreprise Transmission du Forez, en France, a obtenu des réductions du niveau de bruit pour trois cloueuses différentes de 2,1; 7,0 et 7,6 dBA en installant un silencieux au niveau de l'échappement d'air (Tisserand et Triomphe, 2011). Ces réductions suggèrent que l'échappement d'air des cloueuses pneumatiques peut être, dans certains cas, la source dominante de bruit.

Une autre étude a utilisé l'antennerie acoustique ainsi que la mesure de la puissance acoustique en salle semi-anéchoïque pour identifier les sources de bruit d'une cloueuse pneumatique (Jayakumar, Kim et Zechmann, 2015). Le clouage s'effectuait sur une pièce de bois enchâssée dans du sable. Le bruit émis par la cloueuse a été divisé en quatre éléments distincts : 1) l'admission de l'air comprimé, 2) l'impact du piston sur le clou, 3) l'impact du clou sur le bois et 4) l'échappement de l'air comprimé. Selon ces auteurs, les principales sources de bruit sont le rayonnement du bruit d'impact par le corps de la cloueuse suivi par l'échappement de l'air comprimé. En utilisant un silencieux à l'échappement et en recouvrant le corps de la cloueuse à l'aide d'un matériau acoustique absorbant, le bruit de la cloueuse a été réduit de 3,5 dB. Les sources de bruit d'une cloueuse pneumatique ont été évaluées dans une salle semi-anéchoïque par la méthode de masquage des sources pour deux configurations différentes : 1) le clouage sur une pièce de bois enchâssée dans du sable et 2) le clouage d'une pièce de bois reposant sur une table de travail (Ahmadabadi, Laville et Guilbault, 2016). Pour la pièce de bois reposant dans du sable, les principales sources de bruit étaient le rayonnement de la pièce de bois et l'échappement d'air, avec des contributions au bruit total similaires, suivi par le rayonnement du corps de la cloueuse. Tandis que pour la pièce de bois reposant sur une table de travail, la source de bruit dominante était le rayonnement de la pièce de bois et de la table de travail, suivi par l'échappement d'air et par le rayonnement du corps de la cloueuse.



### 3. SÉLECTION DE DIX MODÈLES DE CLOUEUSE

Ce chapitre présente les types de cloueuses étudiés (section 3.1), ainsi que le choix des modèles de cloueuses retenus (section 3.2).

#### 3.1 Types de cloueuses étudiés

La présente étude vise deux secteurs de l'industrie de la construction qui sont plus sujets aux problèmes de bruit et de vibrations générés par l'utilisation de cloueuses portatives, soit ceux des charpentiers et des couvreurs. Les travailleurs de ces deux secteurs n'utilisent pas le même type de clous et, par conséquent, le même type de cloueuse. La fonction première d'un clou de charpente est de lier 2 pièces de bois et c'est le corps du clou (la tige) qui les retient ensemble; la fonction de la tête est principalement d'aider à l'enfoncement du clou. Par contre, en ce qui concerne les clous pour le bardeau d'asphalte, le corps ne sert qu'à tenir le clou en place alors que c'est la tête qui retient le bardeau, ce qui explique le diamètre élevé de la tête de ce type de clou, permettant d'éviter que le bardeau ne se déchire sous la force de la tête du clou.

Les clous se distinguent par la forme et le diamètre de leur tête, leur longueur et leur diamètre (Tableau 1). Aussi, une caractéristique additionnelle concerne la façon dont les clous sont retenus ensemble pour l'approvisionnement en série des cloueuses portatives; cette caractéristique détermine la forme de la tête (pleine ou en forme de « D ») et ne concerne que les clous de charpente.

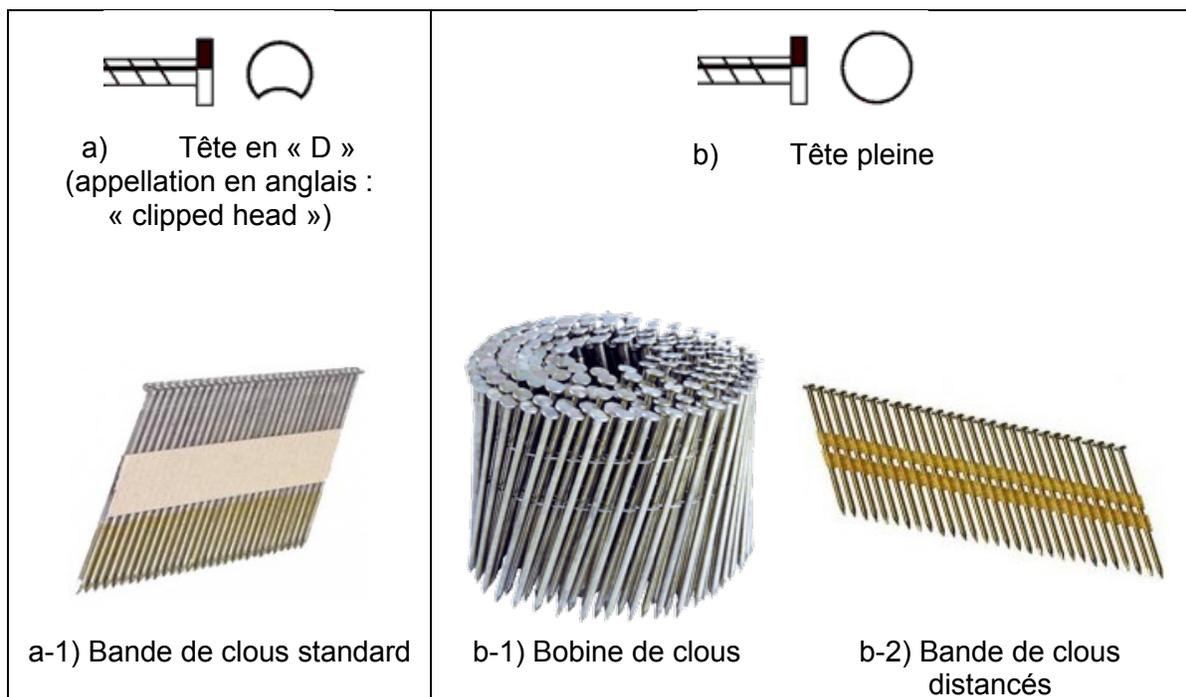
**Tableau 1** Caractéristiques concernant les types de clous standards <sup>1</sup>

Type de cloueuse	Tête	Longueur	Diamètre
<b>Charpente</b>	Pleine ou en « D » Diamètre : ¼ po (6 mm)	Standard : 3 ¼ po (82 mm)	Standard : 0,120 po (3 mm)
<b>Toiture</b>	Pleine Diamètre : 5/16 – 3/8 po (9,5 – 11 mm)	Standard : 1 ¼ po (32 mm)	Standard : 0,120 po (3 mm)

#### 3.1.1 Clous de charpente

Il existe deux types de magasins pour les cloueuses de charpente, soit : (i) en bande ou (ii) en bobine (Figure 1). Lors de l'achat d'une cloueuse, le type de magasin est un critère de sélection déterminant. Un avantage des clous en bobine est que le magasin peut en contenir jusqu'à 200, ce qui évite les pertes de temps associées au chargement. Par contre, le poids de ces 200 clous devient rapidement une source d'inconfort, surtout si le clouage s'effectue au-dessus des épaules. Au Québec, la majorité des cloueuses de charpente utilise des clous en bande.

<sup>1</sup> Les dimensions en pouces reflètent l'identification commerciale du clou et non pas les dimensions exactes du clou qui sont exprimées en mm.

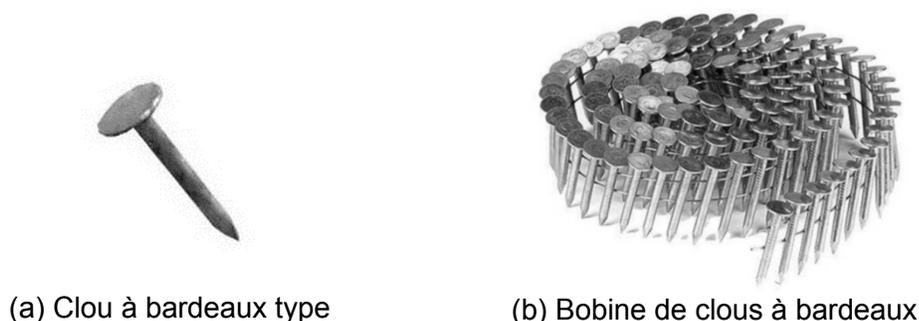


**Figure 1** Types de têtes de clou et de chargement utilisés par les cloueuses à charpente

Les deux types de clous ont une longueur identique, soit de 3 ¼ po (82 mm), mais leurs têtes diffèrent. La tête du premier type de clou est incomplète, elle est tronquée d'un côté et prend la forme d'un « D ». Cette particularité permet d'assembler les clous les uns à la suite des autres pour former des bandes compactes (Figure 1). Au Québec, la majorité des cloueuses de charpenterie fonctionne avec ce type de clou. La tête du deuxième type de clou est pleine, ainsi pour l'assemblage des clous en bande ou en bobine, un espace doit être laissé entre chacun des clous pour éviter l'interférence des têtes. Les bandes de clous à tête pleine en contiennent 20 plutôt que 40 comme c'est le cas pour les clous ayant une tête en « D », ce qui occasionne deux fois plus de perte de temps en chargement.

### 3.1.2 Clous de toiture

Les caractéristiques du clou type utilisé pour installer du bardeau d'asphalte sont sa longueur de 1 ¼ pouce (32 mm) avec sa tête pleine et surdimensionnée, ayant pour fonction de retenir le bardeau. La tête pleine oblige un montage avec espacement des clous et l'industrie de la toiture a opté pour un seul type de chargement, soit celui par bobine (Figure 2).



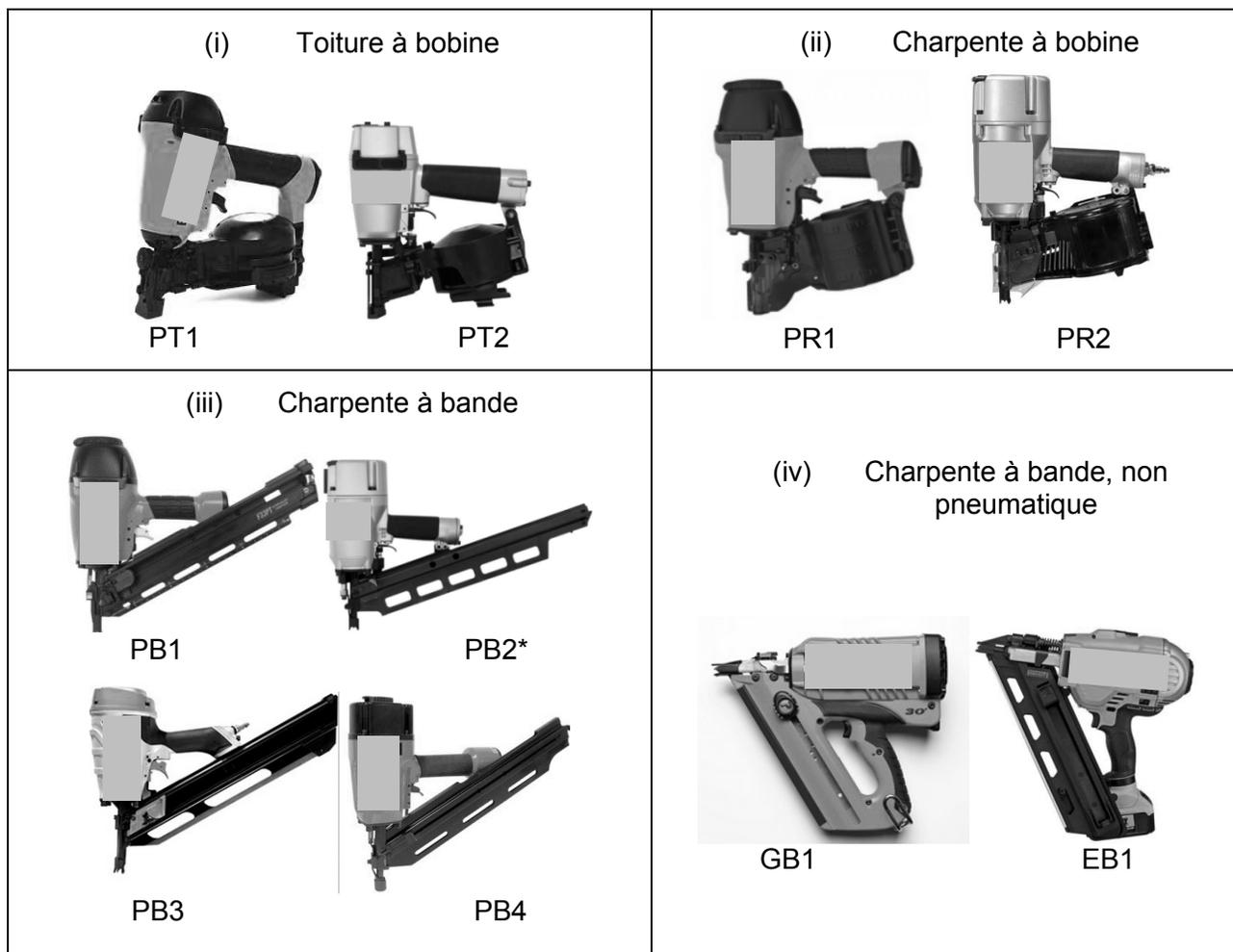
**Figure 2 Clou à bardeaux et bobine de clous**

### 3.2 Modèles de cloueuses retenus

Afin d'effectuer le choix des cloueuses les plus utilisées par l'industrie de la construction, un questionnaire a été développé pour sonder les préférences des employeurs. Comme l'étude propose qu'une partie des mesures soit effectuée sur le terrain par des travailleurs expérimentés, il était primordial de réaliser ces mesures avec les outils utilisés par les travailleurs. Le questionnaire (voir l'annexe A), développé avec le soutien du comité de suivi, visait d'abord à favoriser le choix des cloueuses appropriées, mais aussi à recruter des entreprises qui accepteraient de participer à la prise de mesures terrains. Le questionnaire a été distribué à l'ensemble des entreprises de construction représentées au sein du comité de suivi et plus de 40 réponses ont été reçues. Les résultats obtenus ont été corroborés par quatre détaillants d'outils concernant les produits les plus vendus. Cette démarche a permis de faire une sélection éclairée des modèles de cloueuse à acquérir pour l'étude.

Pour les cloueuses de toiture, les choix dominants étaient peu nombreux, deux modèles de cloueuses pneumatiques ont donc été retenus. Pour les cloueuses de charpente, la diversité des modèles disponibles et utilisés a forcé un choix selon le type de clous. Ce choix, qui a été validé par le comité de suivi, comportait 2 cloueuses à bobine et 6 cloueuses à bande, dont une cloueuse à bande distancée. Bien que la présente étude visait principalement à étudier les cloueuses portatives pneumatiques, le choix des cloueuses de charpente s'est également arrêté sur des cloueuses ayant des technologies alternatives ou émergentes. En effet, les résultats du questionnaire ont permis de déterminer que les travailleurs de la construction n'utilisaient pas seulement des cloueuses pneumatiques, mais aussi des cloueuses utilisant d'autres sources d'énergie. Ces résultats ont conduit à l'achat d'une cloueuse au gaz (cartouche de butane qui alimente une chambre de combustion, avec une batterie qui permet l'allumage du gaz) et d'une cloueuse électrique (volant d'inertie entraîné par un moteur électrique alimenté par une batterie). La cloueuse au gaz, selon nos résultats de sondage, est largement utilisée alors que la cloueuse électrique était un produit qui, au début du projet, venait d'être commercialisé. Aussi, une cloueuse d'entrée de gamme (PB4), qui n'est jamais utilisée par les travailleurs de la construction, a été acquise afin de mettre en perspective les différences avec les cloueuses de plus haut de gamme. Cette cloueuse ne devait servir qu'aux mesures en laboratoire et non pour les mesures terrains, et des problèmes d'opération non sécuritaire ont empêché son usage avec le dispositif de substitution de l'opérateur (chapitre 1). En conséquence, seuls les résultats des mesures en laboratoire avec sujets humains sont présentés pour cette cloueuse.

La Figure 3 présente les modèles de clouuses retenus ainsi que la dénomination qui est utilisée pour le présent rapport. La figure est divisée en 4 catégories, soit : (i) toiture à bobine, (ii) charpente à bobine (iii) charpente à bande et (iv) charpente non pneumatique à bande.



**Figure 3 Présentation des clouuses choisies**

La note « \* » est ajoutée à la clouuse PB2\* pour indiquer qu'elle utilise des bandes distancées (clous à tête pleine).

La numérotation utilisée se lit comme suit :

- Première lettre : P – pneumatique, G – gaz ou E – électrique (batterie)
- Deuxième lettre : T – toiture à bobine, R – charpente à bobine ou B – charpente à bande
- Chiffre : numéro séquentiel aléatoire pour chaque catégorie

Exemple : PT1 – clouuse pneumatique à toiture n° 1

Toutes les clouuses de charpente retenues fonctionnent en mode séquentiel intermittent. Ce mode possède une double protection qui consiste à devoir enfoncer le palpeur (composante en

contact avec la pièce travaillée) et ensuite enfoncer la gâchette. Les cloueuses de toiture fonctionnent en mode séquentiel continu (traduction de « bump mode »). Dans ce mode de fonctionnement, lorsque la gâchette reste enfoncée, il ne suffit que d'enfoncer le palpeur pour enfoncer un clou. Ce second mode d'opération est plus dangereux. Il est à noter que les travailleurs de la construction utilisent presque exclusivement le mode séquentiel continu. Pour une raison de sécurité, le mode séquentiel intermittent a été privilégié lors des mesures en laboratoire.



## **4. MESURES EN LABORATOIRE SELON LES NORMES EN VIGUEUR (BANC DE MESURES NORMALISÉES : BMN)**

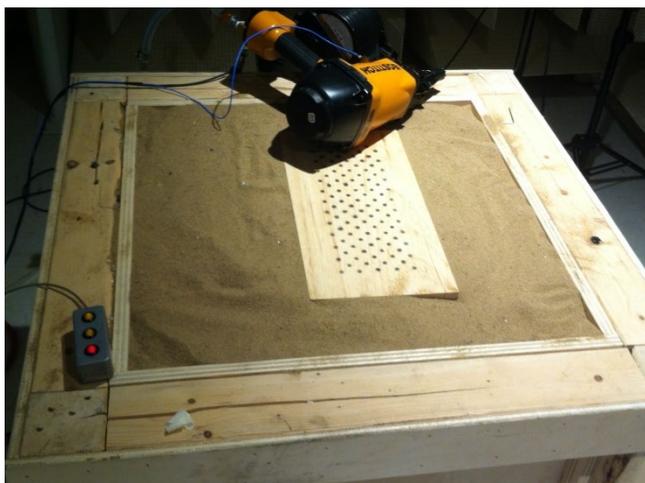
Les premières mesures sur les cloueuses ont été réalisées dans une salle anéchoïque conformément aux normes établies pour la mesure du bruit et des vibrations des cloueuses portatives en laboratoire. Les mesures en laboratoires discutées dans cette section concernent la vibration mesurée à la poignée de la cloueuse, la puissance acoustique rayonnée par la cloueuse ainsi que le niveau d'exposition du travailleur au bruit. Les mesures d'émission vibratoire des cloueuses en laboratoire ont été réalisées selon la norme internationale ISO 8662-11:1999 « Machines à moteur portatives – Mesurage des vibrations au niveau des poignées – Partie 11 : Machines à enfoncer les fixations » (ISO, 1999), qui donne la procédure à suivre pour évaluer l'émission vibratoire d'une cloueuse portative. En ce qui concerne les mesures acoustiques, celles-ci ont été réalisées selon une norme de mesure acoustique spécifique aux cloueuses, soit la norme européenne EN 12549:1999 + A1:2008(F) « Acoustique. Code d'essai acoustique pour les machines à enfoncer les fixations. Méthode d'expertise » (AFNOR, 2008).

Les mesures en laboratoire ont été réalisées par des sujets humains. Trois sujets étaient nécessaires pour répondre aux exigences des normes. Une demande de certificat d'éthique en recherche a été complétée, comprenant un formulaire de consentement, afin de s'assurer que les sujets étaient libres de choisir de participer à l'étude. Le risque le plus important auquel les sujets étaient exposés, bien que très faible, était le bruit. Il a donc été demandé aux sujets de porter des protecteurs auditifs pour la réalisation des mesures.

La première section du chapitre présente la description du banc de mesures (section 4.1). Les sous-sections suivantes portent sur la norme concernant les mesures vibratoires (sous-section 4.1.1), ainsi que sur la norme concernant les mesures acoustiques (sous-section 4.1.2). Les résultats sont présentés à la dernière section (section 4.2).

### **4.1 Description du banc de mesures**

La norme ISO 8662-11 (ISO, 1999) précise les paramètres de conception du banc d'essai, les conditions d'opération, les prises des mesures et les informations à consigner. Le banc d'essai est constitué d'un lit de sable sec sur lequel repose une pièce travaillée en bois de pin dans laquelle l'opérateur va enfoncer une fixation avec la machine testée (Figure 4). Ce banc d'essai est conçu pour minimiser le rayonnement de la pièce travaillée. Le bac de sable est de dimensions de 600 mm x 600 mm x 400 mm de profondeur avec le dessus du bac à environ 800 mm de hauteur du sol, afin de permettre que le centre de la cloueuse soit positionné à 1 m du sol, afin de respecter la norme.



**Figure 4 Bac de sable (selon la norme ISO 8662-11:1999)**

La pièce travaillée est faite de pin, sans nœud et ayant les fibres droites (Figure 5). La masse volumique apparente moyenne se situe entre  $0,42 \text{ g/cm}^3$  et  $0,48 \text{ g/cm}^3$  et l'humidité moyenne du bois est de  $12 \pm 3 \%$ . Comme la pièce de bois doit être 1,2 fois plus épaisse que les clous utilisés, qui eux ont une longueur maximale de 83 mm, l'épaisseur choisie est de 102 mm. La pièce est éloignée d'au moins 120 mm des limites du bac de sable et les clous sont enfoncés à au moins 50 mm du bord de la pièce et à 25 mm les uns des autres. Les pièces de bois utilisées pour les mesures ont pour dimension 356 mm x 203 mm x 102 mm (épaisseur). De plus, afin d'optimiser le nombre de clous, un patron de clouage a été fabriqué afin d'indiquer aux opérateurs où enfoncer les clous en respectant le critère de distance de 25 mm entre 2 clous.



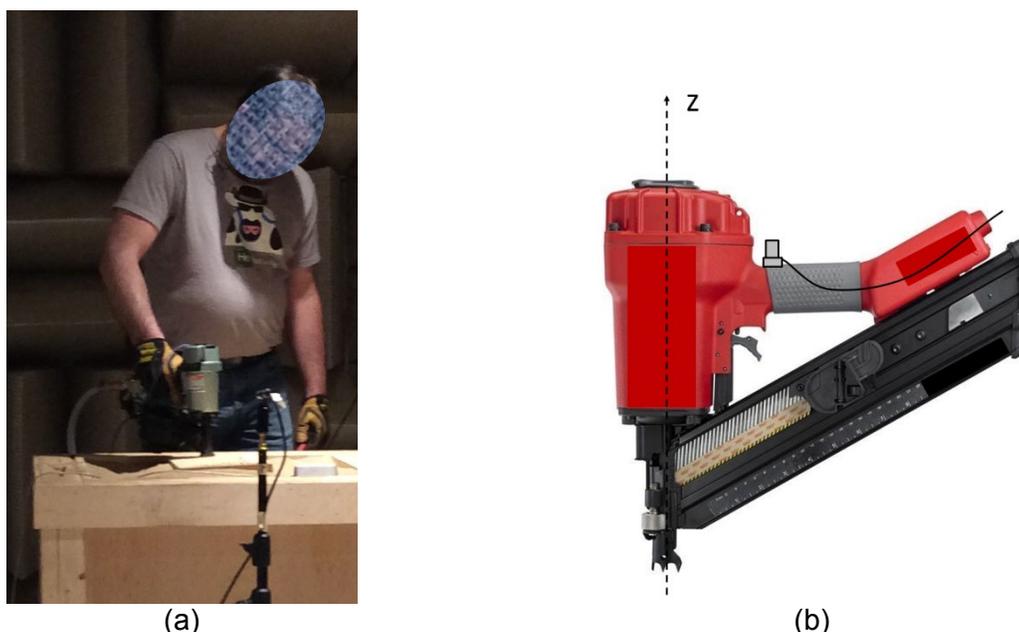
(a)



(b)

**Figure 5 Détails concernant la pièce de bois enfouie dans le sable. (a) stencil, et pièces prêtes à être utilisées, (b) pièce utilisée lors des essais en laboratoire**

L'opérateur de l'outil doit adopter la posture spécifiée à la Figure 6, avec une position du corps droite ou quasi droite, et travailler de telle sorte que l'angle formé par son bras et son avant-bras soit compris entre  $100^\circ$  et  $160^\circ$ . Pour les mesures en laboratoire normalisées, trois opérateurs qualifiés ont effectué une série de clouage, comprenant 5 essais pour chacun des 3 opérateurs. Chaque essai consiste à opérer l'outil pour enfoncer 10 clous durant une période de 30 secondes. Tant pour les mesures acoustiques que pour les mesures vibratoires, une valeur équivalente pour un événement élémentaire a été calculée pour chacun des essais. Pour chaque opérateur, la moyenne des 5 essais consécutifs est rapportée. Par la suite, la moyenne globale est calculée avec les moyennes obtenues.

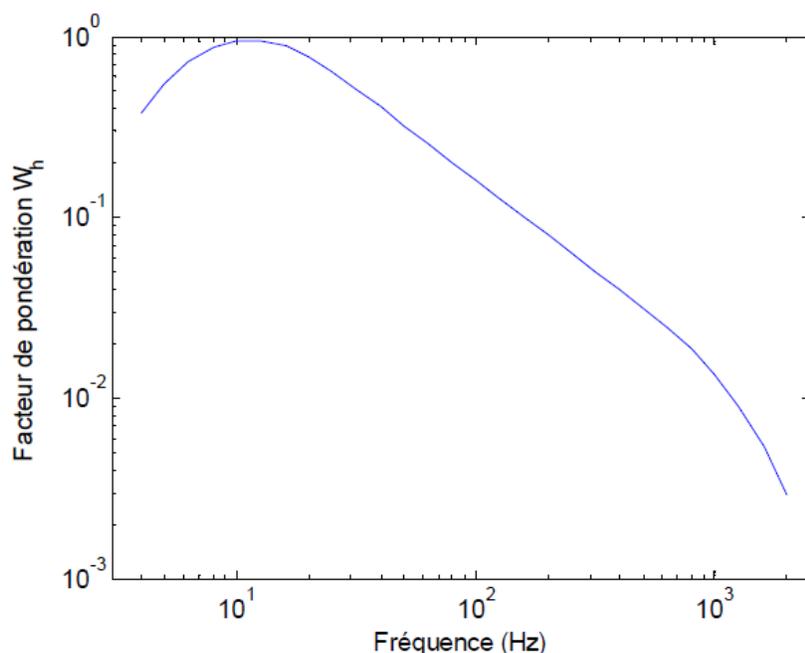


**Figure 6 (a) Position de travail de l'opérateur et (b) position du capteur d'accélération et définition de l'axe de percussion (axe z)**

#### **4.1.1 Mise en application de la norme relative aux vibrations**

Les vibrations sont mesurées à l'aide d'un accéléromètre triaxial PCB 356B20 ayant une gamme dynamique de  $\pm 49\,000\text{ m/s}^2$  et une fréquence de résonance située au-dessus de 55 kHz. Il permet de mesurer l'accélération sur 3 axes orthogonaux  $x$ ,  $y$  et  $z$  où, par convention, l'axe de percussion est l'axe  $z$  (Figure 6).

Comme spécifié dans la norme ISO 5349-1:2001 (ISO, 2001), la valeur de l'accélération doit être pondérée afin de mieux représenter l'effet de la vibration sur le système main-bras de l'humain. Le filtre de pondération main-bras utilisé ( $W_h$ ) est présenté à la Figure 7.



**Figure 7** Filtre de pondération main-bras (norme ISO 5349-1:2001)

Aux fins d'analyse, les mesures d'accélération ont été pondérées en bandes de tiers d'octave et le filtre  $W_h$  a été appliqué à chacun des tiers d'octave tel que :

$$a_{hw,i} = \sqrt{\sum_j (W_{hi} a_{hij})^2} \quad (1)$$

où  $a_{hij}$  est l'accélération efficace mesurée dans la bande de tiers d'octave  $j$ , en  $m/s^2$  sur l'axe  $i$  ( $x$ ,  $y$  ou  $z$ ).

Les valeurs de l'émission vibratoire dans les 3 axes ont ensuite été sommées afin d'obtenir la valeur d'émission vibratoire globale  $a_{hw}$ , tel que :

$$a_{hw} = \sqrt{(a_{hw,x})^2 + (a_{hw,y})^2 + (a_{hw,z})^2} \quad (2)$$

où  $a_{hw,x}$ ,  $a_{hw,y}$  et  $a_{hw,z}$  sont respectivement les accélérations pondérées selon les axes  $x$ ,  $y$  et  $z$ .

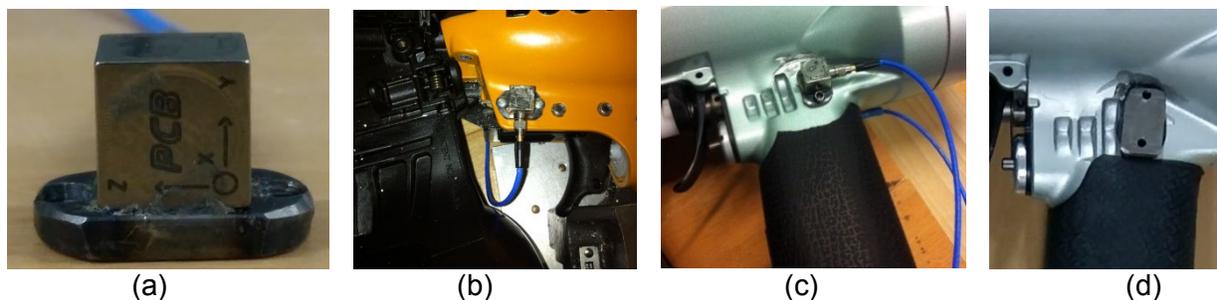
La valeur d'accélération efficace pondérée  $a_{hw}$  (ISO, 2001) a été mesurée sur une période de 30 secondes. Par la suite, cette accélération est rapportée pour un événement élémentaire (enfoncement d'un clou) sur une période de 3 secondes  $a_{hw,3s}$  ( $T_0 = 3$  s). Elle est calculée en utilisant la formule suivante :

$$a_{hw,3s} = a_{hw} \sqrt{\frac{T}{T_0 n}} \quad (3)$$

où  $T$  est la période de mesure en secondes (par exemple, 30 secondes pour un essai) et  $n$  est le nombre de clous enfoncés durant cette période (typiquement 10 clous pour un essai). Pour un opérateur, les essais doivent être poursuivis jusqu'à ce que 5 valeurs consécutives de  $a_{hw,3s}$  aient un coefficient de variation ( $CV$ ) inférieur à 15 % ou que l'écart-type soit inférieur à  $0,30 \text{ m/s}^2$  (ISO, 1999).

Comme postulé par la norme ISO 8662-11 (ISO, 1999), l'accéléromètre a été solidement ancré sur la poignée, le plus près possible de la main de l'opérateur, avec un axe pointant dans la même direction que l'axe de percussion (voir Figure 6). Pour les mesures terrains, les cloueuses devaient être utilisées sans nuire à la production, cela a impliqué que la poignée doive rester libre pour assurer le confort de l'opérateur. Aussi, l'accéléromètre devait pouvoir être transféré rapidement d'une cloueuse à l'autre.

La solution de fixation retenue consiste en une plaquette d'acier qui a été vissée et collée sur l'accéléromètre. Cette plaquette de fixation a 2 trous qui ont permis de fixer l'accéléromètre sur la cloueuse à l'aide de 2 boulons (Figure 8). La position de l'accéléromètre sur chacune des cloueuses a été déterminée afin de positionner le capteur le plus près possible de la poignée, sans nuire au travail de l'opérateur.



**Figure 8 (a) Accéléromètre triaxial monté sur une plaquette de montage, (b et c) montages types de la plaquette vissée directement dans le bâti de la cloueuse et (d) avec une contre-plaquette collée sur le bâti**

Une série de tests en laboratoire a été réalisée, avant la collecte de données, afin de valider que la position de l'accéléromètre et de la plaquette de montage ne modifiait pas le résultat obtenu par rapport au montage recommandé par la norme ISO 8662-11 (Figure 8b). Au final, peu importe la cloueuse testée, et ce, malgré l'ajout de la masse de la plaquette et de la contre-plaquette, les différences entre les valeurs d'accélération obtenues à la position recommandée par la norme et celles obtenues à la position de la plaquette utilisée dans ce projet étaient négligeables.

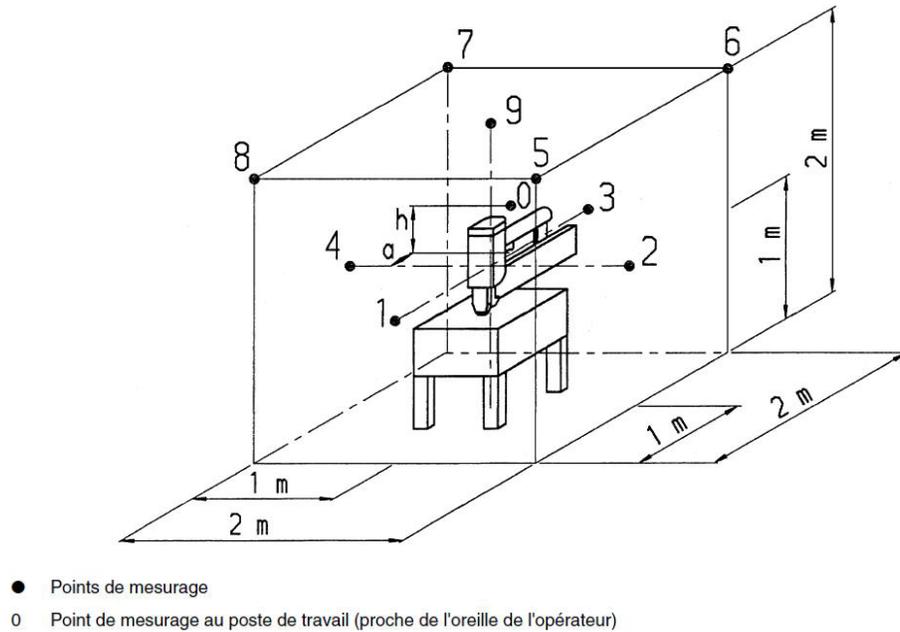
#### **4.1.2 Mise en application de la norme relative à l'acoustique**

La norme européenne EN 12549:1999 + A1:2008(F) « Acoustique. Code d'essai acoustique pour les machines à enfoncer les fixations. Méthode d'expertise » (AFNOR, 2008) spécifie la détermination de deux descripteurs de base de l'émission sonore de ces machines, soit (1) le niveau de puissance acoustique de la machine et (2) le niveau de pression acoustique d'émission au poste de travail (à l'oreille de l'opérateur). Elle s'appuie sur deux normes correspondantes :

- 1- La détermination du niveau de puissance acoustique est basée sur une norme plus générale, la norme ISO 3744:2010 « Acoustique -- Détermination des niveaux de puissance acoustique et des niveaux d'énergie acoustique émis par les sources de bruit à partir de la pression acoustique -- Méthodes d'expertise pour des conditions approchant celles du champ libre sur plan réfléchissant » (ISO, 2010b). La norme ISO 3744 décrit les conditions d'essai pour évaluer la puissance acoustique d'une machine dans des conditions voisines d'un champ libre sur un plan réfléchissant (les conditions idéales étant une salle semi-anéchoïque) en utilisant une surface de mesure entourant la machine sur laquelle sont situés des points de mesure microphoniques. La surface de mesure peut être soit un parallélépipède (ce qui a été choisi pour la norme EN 12549) ou un hémisphère. Cette norme s'applique aussi bien aux bruits continus qu'aux bruits impulsifs et, dans ce dernier cas, elle propose d'intégrer la puissance acoustique sur la durée d'un événement élémentaire. Le résultat obtenu est appelé niveau d'énergie acoustique dans la version 2010 de cette norme, alors que dans la version 1994, le résultat est ramené à 1 seconde et le terme niveau de puissance acoustique est utilisé. C'est cette dernière appellation que l'on retrouve dans la norme EN 12549, qui est basée sur la version 1994 de la norme ISO 3744.
- 2- La détermination du niveau de pression acoustique d'émission au poste de travail est basée sur la norme ISO 11201:2010 « Acoustique – Bruit émis par les machines et équipements – Détermination des niveaux de pression acoustique d'émission au poste de travail et en d'autres positions spécifiées dans des conditions approchant celles du champ libre sur plan réfléchissant avec des corrections d'environnement négligeables » (ISO, 2010a). Cette norme définit la mesure du niveau de pression en un ou des points spécifiés, en particulier au poste de travail, de manière à estimer l'exposition de l'opérateur dans les mêmes conditions expérimentales que celles pour la norme sur la puissance acoustique.

Le bac de sable (voir Figure 4) est utilisé pour mesurer les deux descripteurs acoustiques mentionnés précédemment :

- 1- Pour la puissance acoustique, les mesures se font en 9 positions microphoniques (points 1 à 9) situées au centre de 5 des 6 surfaces et aux sommets d'un cube de 2 m d'arête (Figure 9).
- 2- Pour le niveau de pression acoustique d'émission, un microphone est placé à une position représentative de la position de l'oreille de l'opérateur (point 0 situé à la distance  $a = 0,3$  m et  $h = 0,5$  m à partir du centre de la machine du côté de la poignée).



**Figure 9 Banc d'essai pour évaluer l'émission sonore des cloueuses (selon la norme NF EN 12549:1999 + A1:2008)**

Pour toutes ces mesures microphoniques, étant donné que le fonctionnement des cloueuses peut être représenté par un événement élémentaire, c'est-à-dire l'enfoncement d'un seul clou, la quantité mesurée est appelée « niveau de pression acoustique d'un événement élémentaire pondéré  $A$  sur 1 seconde »,  $L_{pA,1s}$ , en dBA, et son expression est donnée par :

$$L_{pA,1s} = L_{pA_{eq}T} + 10 \log_{10} \left( \frac{T}{T_0} \right) - 10 \log_{10}(N) \quad (4)$$

où  $L_{pA_{eq}T}$  est le niveau de pression équivalent évalué sur une période  $T$  (en secondes),  $T_0$  correspond à 1 seconde et  $N$  est le nombre d'événements élémentaires (ou nombre de clous enfoncés) pendant la période  $T$ . Pour déterminer  $L_{pA,1s}$ , la norme requiert d'effectuer, pour chaque position microphonique, 5 mesures du niveau de pression acoustique (chaque mesure étant un événement isolé ou plusieurs événements si la machine opère obligatoirement en mode rafale) et de faire la moyenne arithmétique des 5 valeurs obtenues.

Pour la détermination de la puissance acoustique, à partir des valeurs obtenues pour chaque position de mesurage  $i$  ( $L'_{pA,1s,i}$  avec  $i = 1,2,\dots,9$ ), une valeur moyenne sur la surface de mesure est calculée, soit le niveau de pression surfacique d'un événement élémentaire sur 1 seconde, en dBA :

$$\bar{L}_{pA,1s,1m} = 10 \log_{10} \left[ \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 10^{0,1 L'_{pA,1s,i}} \right] - K_{1A} - K_{2A} \quad (5)$$

où les valeurs de  $K_{2A}$  et  $K_{1A}$  sont considérées nulles si les essais se font en salle semi-anéchoïque, comme il est recommandé par la norme. On ajoute ensuite à cette valeur  $L_s$  pour obtenir le niveau de puissance acoustique d'un événement élémentaire :

$$L_{wA,1s} = \bar{L}_{pA,1s,1m} + L_s \quad (6)$$

où  $L_s$  est fonction de la surface de mesure de la puissance, tel que :

$$L_s = 10 \log_{10}[S] = 13 \text{ dB} \quad (7)$$

avec  $S = 20 \text{ m}^2$ , puisque le cube de mesure a une arête de 2 m (5 surfaces de  $4 \text{ m}^2$  chacune).

## 4.2 Résultats

Les résultats obtenus lors des mesures en laboratoire sont résumés dans le Tableau 2. La première colonne présente la cloueuse évaluée (voir la section 3.2 pour la codification). Chaque cloueuse a été évaluée par les 3 mêmes sujets enfonçant chacun 50 clous (5 essais de 10 clous). La moyenne ( $\bar{x}$ ) de l'accélération moyenne pondérée sur 3 secondes, pour chacun des sujets, est présentée avec l'écart-type ( $S_{n-1}$ ) et le coefficient de variation ( $CV$ ). Les 2 dernières colonnes présentent les résultats acoustiques soit la moyenne, pour chacun des sujets, des niveaux de puissance acoustique ( $L_{wA,1s}$ ), ainsi que le coefficient de variation respectif. Pour les niveaux vibratoires, on constate que chaque essai respecte les critères sur la variabilité des résultats, soit un coefficient de variation plus petit que 15 % ( $CV < 0,15$ ) et un écart-type plus petit que  $0,3 \text{ m/s}^2$ . Il est à noter que ces critères de variabilité, énoncés à la section 4.1.1, s'appliquent seulement pour les résultats vibratoires obtenus en laboratoire, où les conditions de prise de mesures sont contrôlées. Par ailleurs, la norme acoustique EN 12549 ne spécifie pas de critères de variabilité à respecter. Les niveaux de pression acoustique au point 0 n'ont pas été présentés à cause d'un manque de fiabilité de ces mesures. En effet, l'opérateur était souvent positionné entre ce microphone et la cloueuse, faussant ainsi la mesure du niveau de pression acoustique.

Pour les mesures vibratoires, on remarque que la majorité des clouees génère des niveaux de vibrations entre  $3,2$  et  $3,7 \text{ m/s}^2$ , seulement trois clouees (PT1, PR1 et PB1) génèrent des niveaux de vibrations plus élevés que les autres. Étant donné que ces trois clouees sont des modèles d'un même fabricant, il y a lieu de se demander si une différence au niveau de leur conception pourrait expliquer leurs niveaux vibratoires plus élevés.

En ce qui concerne le bruit, un écart important de 11,5 dBA est observé entre la cloueuse la moins bruyante (EB1 à batterie) et le modèle le plus bruyant (GB1 à gaz), dont la source de bruit dominante est la détonation. Parmi les clouees de charpente, la cloueuse électrique (EB1) est également 6,1 dBA moins bruyante que la deuxième cloueuse la moins bruyante (PR2). Les clouees pneumatiques à toiture qui sont les moins bruyantes (puissances acoustiques de 99,7 et 97,9 dBA pour les clouees PT1 et PT2, respectivement). Les niveaux de puissance acoustiques des clouees pneumatiques de charpente varient entre 101,7 et 105,1 dBA. En excluant la cloueuse à gaz, il est à noter que les clouees les plus bruyantes sont les clouees PR1 et PB1. Celles-ci sont également celles qui génèrent le plus de vibrations parmi les clouees pneumatiques. À l'inverse, la cloueuse électrique (EB1) est nettement moins bruyante que toutes les autres et se situe parmi celles qui vibrent le moins.

**Tableau 2 Résultats globaux en laboratoire, vibrations et bruit**

Cloueuse	Sujet	Niveau de vibrations			Niveau de puissance acoustique	
		$a_{hw,3s}$			$L_{wA,1s}$	
		$\bar{x}$ (m/s <sup>2</sup> )	$S_{n-1}$ (m/s <sup>2</sup> )	CV	$\bar{x}$ (dBA)	CV
PT1	1	4,2	0,20	0,05	99,8	0,01
	2	5,1	0,18	0,03	99,6	0,03
	3	5,1	0,07	0,01	99,7	0,01
	Moyenne	4,8			99,7	
PT2	1	3,4	0,06	0,02	97,9	0,04
	2	3,4	0,04	0,01	97,7	0,05
	3	3,4	0,04	0,01	98,0	0,04
	Moyenne	3,4			97,9	
PR1	1	4,9	0,10	0,02	105,4	0,03
	2	4,9	0,17	0,03	105,0	0,03
	3	5,0	0,20	0,04	105,0	0,02
	Moyenne	4,9			105,1	
PR2	1	3,4	0,10	0,03	101,6	0,02
	2	3,4	0,11	0,03	101,5	0,04
	3	3,3	0,10	0,03	102,0	0,02
	Moyenne	3,4			101,7	
PB1	1	4,9	0,10	0,02	105,0	0,04
	2	4,8	0,07	0,01	104,7	0,05
	3	4,9	0,09	0,02	105,2	0,03
	Moyenne	4,9			105,0	
PB2	1	3,7	0,03	0,01	103,2	0,05
	2	3,8	0,05	0,01	101,9	0,02
	3	3,7	0,04	0,01	102,6	0,10
	Moyenne	3,7			102,6	
PB3	1	3,6	0,03	0,01	103,2	0,03
	2	3,7	0,06	0,02	102,8	0,05
	3	3,6	0,04	0,01	103,1	0,02
	Moyenne	3,6			103,0	
PB4	1	3,5	0,19	0,06	104,9	0,04
	2	3,3	0,04	0,01	104,2	0,02
	3	3,5	0,06	0,02	105,9	0,08
	Moyenne	3,4			105,0	
GB1	1	3,5	0,25	0,07	107,2	0,04
	2	3,2	0,06	0,02	107,1	0,05
	3	3,0	0,07	0,02	106,9	0,05
	Moyenne	3,2			107,1	
EB1	1	3,6	0,09	0,02	96,2	0,06
	2	3,5	0,20	0,06	95,1	0,06
	3	3,0	0,08	0,03	95,4	0,05
	Moyenne	3,4			95,6	



## **5. MESURES EN MILIEU DE TRAVAIL**

Afin de mesurer le bruit et les vibrations des cloueuses utilisées dans l'industrie de la construction en milieu de travail, une campagne de mesures terrains a été réalisée. Pour ce faire, un système d'acquisition portatif a été développé. Les mesures ont été réalisées tant pour des travaux de toiture que pour des travaux de charpente.

Comme les mesures terrains étaient réalisées par des travailleurs de la construction, une demande de certificat d'éthique en recherche a été complétée. Bien que les travailleurs n'étaient exposés à aucun risque additionnel, un formulaire de consentement a été conçu et était signé par les travailleurs ayant accepté de participer à l'étude.

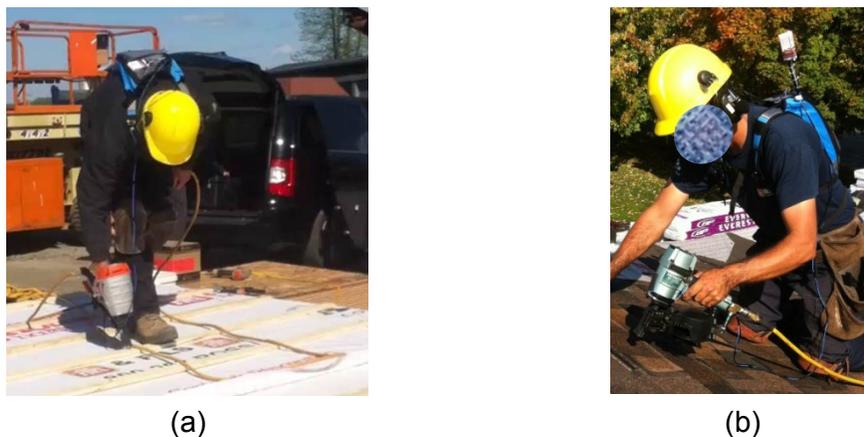
Le chapitre débute par la sélection des environnements de mesures ainsi que des entreprises visitées (section 5.1). L'instrumentation (section 5.2) est par la suite présentée ainsi que le traitement des données (section 5.3), suivi par la présentation des résultats (section 5.4).

### **5.1 Sélection de deux environnements de travail et déroulement des mesures**

En raison des deux secteurs de l'industrie de la construction visés par l'étude, il était nécessaire de réaliser les mesures dans ces deux environnements de travail distincts, soit pour des travaux de charpente et pour des travaux de toiture (installation de bardeaux d'asphalte) (Figure 10). Pour la sélection des entreprises à visiter, il était prévu que le questionnaire fournirait une liste d'entreprises intéressées à participer à la réalisation des mesures. Malheureusement, aucune des quelques entreprises qui s'étaient portées volontaires n'a pu être utilisée pour les mesures terrains, que ce soit pour cause de non-disponibilité, d'éloignement ou autres. Les mesures ont finalement été réalisées dans une seule entreprise (région de Drummondville), ce qui a permis de mesurer autant des travaux de réfection d'une toiture que des travaux de charpente de bois. Il aurait toutefois été préférable que ces mesures aient été effectuées dans plus qu'une entreprise, afin de maximiser la représentativité des résultats.

Pour les travaux de toiture, les conditions pour les mesures étaient idéales puisqu'il s'agissait d'une maison à un étage (de style bungalow), ce qui a permis de bien suivre les opérations à partir du sol. Les deux cloueuses (PT1 et PT2) ont été utilisées par chacun des deux travailleurs. Les travaux mesurés consistaient au clouage de bardeaux d'asphalte sur une surface de contreplaqué de 15 mm d'épaisseur. Les mesures ont été prises lors d'une même journée. Entre 8 et 12 séries de mesures de 10 clous ont été réalisées avec chacune des cloueuses et par chacun des deux travailleurs.

Pour les travaux de charpente, les mesures se sont déroulées sur une journée complète pendant laquelle deux autres travailleurs ont procédé à l'assemblage des murs de côté d'un entrepôt de 25 m de longueur par 3 m de hauteur. La structure clouée est constituée de montants d'épinette de 50 mm x 150 mm recouverts de panneaux de particule de 12 mm d'épaisseur. Au total, 7 cloueuses (PR1, PR2, PB1, PB2, PB3, GB1 et EB1) ont été opérées par les deux travailleurs. Toutefois, à la suite d'un problème d'instrumentation, les données terrains de la cloueuse PB1 ont été rejetées. Entre 8 et 12 séries de mesures de 10 clous ont été réalisées avec chacune des cloueuses et par chacun des deux travailleurs.



**Figure 10** Travailleurs en action avec le système de mesure terrains : (a) pour les travaux de charpente et (b) pour les travaux de toiture.

## 5.2 Instrumentation des mesures terrains

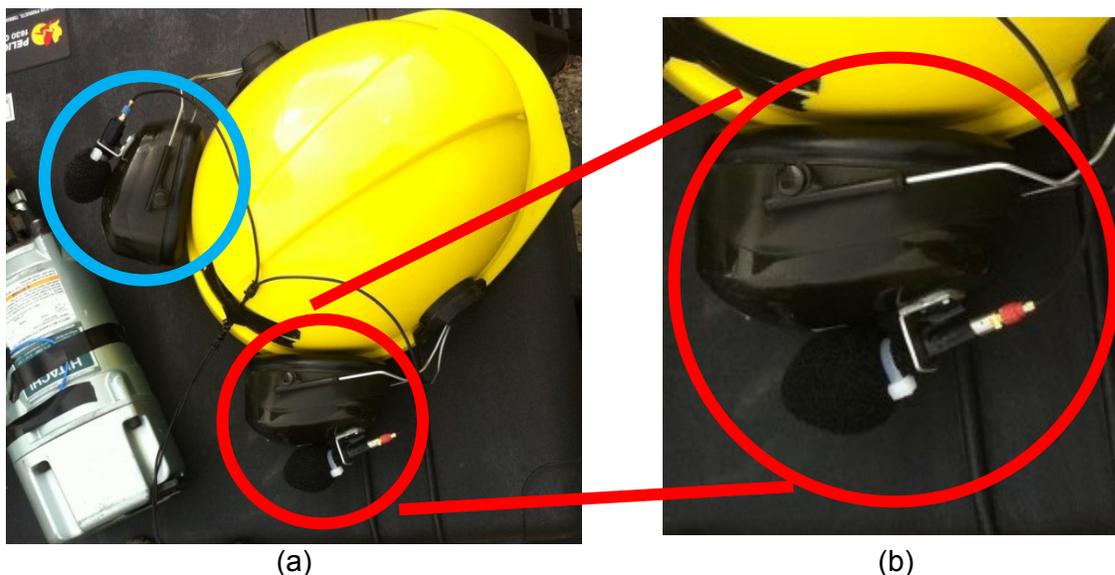
Afin de réaliser des mesures terrains qui ne modifiaient pas ou peu le comportement du travailleur, une instrumentation et un système d'acquisition adaptés ont été développés. Les détails concernant ces développements sont présentés dans les sous-sections suivantes.

### 5.2.1 Mesures des vibrations

Pour la mesure de l'accélération, le même accéléromètre triaxial de 5000 g ( $49\,000\text{ m/s}^2$ ), utilisé lors des mesures en laboratoire et assemblé à une plaquette de montage, a été utilisé. Comme les clouuses devaient être utilisées sans nuire à la production, la poignée de l'outil devait rester libre pour le confort de l'opérateur. Aussi, l'accéléromètre devait pouvoir être transféré rapidement d'une clouuse à l'autre.

### 5.2.2 Mesures acoustiques

Les mesures en laboratoire ont permis de mesurer la puissance acoustique émise lors de l'enfoncement d'un clou avec un réseau de 9 microphones. Cependant, lors des mesures terrains, il n'était pas possible de mesurer la puissance acoustique, faute de disposer d'un environnement acoustique contrôlé. L'équipe de recherche a plutôt privilégié de mesurer le niveau de pression acoustique aux oreilles du travailleur. Pour mesurer ce niveau de pression acoustique, un microphone de  $\frac{1}{4}$  pouce de marque PCB était fixé sur la surface de chacune des coquilles antibruit attachées au casque de sécurité du travailleur. Chaque microphone était recouvert d'une bonnette anti-vent (Figure 11).



**Figure 11** Position des microphones sur les coquilles avec bonnette anti-vent : (a) vue du casque et des deux microphones sur les coquilles antibruit de gauche (bleu) et de droite (rouge); (b) vue agrandie du microphone de l'oreille droite.

### 5.2.3 Mesures de la pression d'air comprimé

Un capteur de pression statique a été installé en parallèle sur la ligne d'air comprimé. Les cloueuses pneumatiques ont une plage de pression d'air comprimé où leur fonctionnement est optimal. Lorsque cette pression est plus basse que la limite inférieure de cette plage, la force d'impact sur le clou est insuffisante pour l'enfoncer, ce qui se traduit par un recul de la cloueuse. Ce recul peut fausser les mesures d'émission vibratoire des cloueuses. Le capteur de pression d'air comprimé a permis de valider ce phénomène, le cas échéant.

### 5.2.4 Système d'acquisition

Une carte d'acquisition (Brüel & Kjaer™, LAN-XI) a échantillonné les signaux à 51,2 kHz et a permis le transfert des données en temps réel, par l'intermédiaire d'une connexion WiFi, vers une station d'enregistrement. Cette station était constituée d'un ordinateur portable et d'un code maison développé avec le logiciel *LabView*. La carte possédait 6 voies d'enregistrement, soit 3 pour l'accéléromètre triaxial, 2 pour les microphones aux oreilles et 1 pour la pression statique de la ligne d'air comprimé. La carte était installée dans un petit sac à dos afin de limiter l'interférence avec les gestes du travailleur.

### 5.3 Traitement des données

Les données ont été traitées de la même façon que les mesures en laboratoire normalisées, à l'exception de deux paramètres qui sont détaillés dans les deux sous-sections suivantes.

#### 5.3.1 Correction selon le nombre de clous enfoncés et durée des signaux

Contrairement aux mesures en laboratoire, où seulement un impact était mesuré aux trois secondes, lors des mesures terrains, les enregistrements sont plus longs et comportent plusieurs dizaines d'évènements. La discrimination de chacun des impacts a été faite en post-traitement, en se basant sur le signal de pression statique de la ligne pneumatique. En effet, lors de l'enfoncement d'un clou, la pression statique chutait drastiquement (chute de plus de 40 psi) dans la ligne d'air comprimé. Pour la cloueuse au gaz et celle à batterie, le décompte a été fait à la main en se basant sur les signaux vibratoires. Le temps pour l'enfoncement de 10 clous n'étant pas constant, une correction a été faite pour le calcul des niveaux unitaires pondérés, tels que pour l'accélération pondérée d'un impact sur 3 secondes :

$$a_{hw,3s} = a_{h,w} \sqrt{\frac{T}{3N}} \quad (8)$$

où  $T$  est la période de mesure variable (en secondes) pour chacun des échantillons de 10 impacts ( $N = 10$ ) et  $a_{hw}$  est le niveau d'accélération pondérée sur la période  $T$  de mesure.

Pour le niveau de pression acoustique d'un impact sur 1 seconde, la correction est donnée par :

$$L_{pA,1s} = L_{pAeqT} + 10 \log_{10} \left( \frac{T}{T_0} \right) - 10 \log_{10}(N) \quad (9)$$

où  $T$  est la période de mesure variable (en secondes) pour chacun des échantillons de 10 impacts ( $N = 10$ ),  $L_{pAeqT}$  est le niveau de pression acoustique en dBA équivalent sur la période  $T$  de mesure et  $T_0 = 1$  seconde.

#### 5.3.2 Correction pour le calcul du niveau d'exposition

Le niveau d'exposition, lors des mesures en laboratoire, était évalué à l'aide d'un microphone suspendu à une certaine distance de la cloueuse, représentant l'endroit où la tête de l'opérateur pourrait se trouver. Cette position du microphone est souvent utilisée pour comparer, d'une cloueuse à l'autre, les niveaux acoustiques qui se rendent à l'oreille du travailleur. Cependant, pour les mesures terrains, un microphone a été apposé au niveau de chacune des oreilles. Pour pallier cette différence entre les mesures terrains et celles en laboratoire, le niveau de bruit binaural a été rapporté pour les mesures terrains, comme le suggèrent Gaudreau, Sgard, Laville et Nélisse (2017). En effet, ce niveau permet une approximation du niveau d'exposition d'un travailleur par une mesure du niveau de bruit à l'aide de microphones fixés sur le centre de la surface de chacune des deux coquilles. Cela consiste à prendre la moyenne énergétique des signaux des deux microphones, telle que :

$$P_{binaural}^2 = \frac{P_{gauche}^2 + P_{droite}^2}{2} \quad (10)$$

où  $P_{binaural}^2$  représente l'énergie moyenne obtenue par les deux microphones.

Ce résultat permet une approximation du niveau d'exposition  $L'_{exp}$ , telle que :

$$L'_{exp} \approx L_{p\ binaural} \quad (11)$$

#### 5.4 Résultats

Le Tableau 3 présente les résultats obtenus lors des mesures terrains. La première colonne présente le code d'identification de la cloueuse (voir le chapitre 3 pour la codification). Chaque cloueuse a été testée par 2 travailleurs. Pour les mesures de vibrations, les 3 colonnes montrent l'accélération moyenne pondérée pour un impact sur 3 secondes, suivie de l'écart-type ( $S_{n-l}$ ) et du coefficient de variation ( $CV$ ). Les 4 dernières colonnes présentent le niveau d'exposition au bruit, en dBA, pour l'oreille gauche, l'oreille droite et le niveau binaural, comme décrit à la section précédente, ainsi que le coefficient de variation ( $CV$ ) sur le niveau binaural.

**Tableau 3 Résultats terrains globaux, vibrations et bruit**

Cloueuse	Sujet	Niveau de vibration			Niveau de bruit			
		$a_{hw,3s}$			$L_{pA,1s}$			
		$\bar{x}$ ( $m/s^2$ )	$S_{n-1}$ ( $m/s^2$ )	$CV$	Gauche (dBA)	Droite (dBA)	Binaural (dBA)	$CV$
PT1	1	5,9	0,48	0,08	98,5	98,5	98,5	0,12
	2	5,5	0,25	0,04	100,3	100,6	100,5	0,13
	Moyenne	5,7			99,4	99,6	99,5	
PT2	1	4,5	0,27	0,06	100,1	100,0	100,1	0,25
	2	4,2	0,10	0,02	95,1	95,6	95,4	0,09
	Moyenne	4,4			97,6	97,8	97,7	
PR1	1	4,8	0,29	0,06	97,8	99,2	98,6	0,22
	2	5,0	0,37	0,07	97,2	98,5	97,9	0,19
	Moyenne	4,9			97,5	98,9	98,2	
PR2	1	4,1	0,13	0,03	97,6	99,5	98,7	0,20
	2	4,6	0,74	0,16	97,1	98,8	98,1	0,16
	Moyenne	4,4			97,3	99,2	98,4	
PB1	1				97,9	98,9	98,5	0,13
	2	Problème avec l'accéléromètre lors des mesures						
	Moyenne				97,9	98,9	98,5	
PB2	1	5,2	0,56	0,11	98,9	100,2	99,7	0,05
	2	4,5	0,10	0,02	100,7	100,4	100,5	0,07
	Moyenne	4,9			99,8	100,3	100,1	
PB3	1	3,9	0,16	0,04	97,9	100,0	99,1	0,22
	2	3,7	0,05	0,01	97,5	98,8	98,2	0,22
	Moyenne	3,8			97,7	99,4	98,7	
PB4	1	Aucune mesure terrain pour cette cloueuse						
	2							
	Moyenne							
GB1	1	3,1	0,36	0,12	99,5	100,3	99,9	0,11
	2	3,1	0,12	0,04	99,6	99,2	99,4	0,17
	Moyenne	3,1			99,5	99,7	99,7	
EP1	1	2,9	0,12	0,04	91,7	92,1	92,0	0,28
	2	3,4	0,10	0,03	91,7	90,9	91,3	0,18
	Moyenne	3,1			91,7	91,5	91,7	

## 6. COMPARAISON DES RÉSULTATS TERRAINS ET EN LABORATOIRE

L'évaluation des émissions vibratoire et sonore des cloueuses a été réalisée en laboratoire sur un banc d'essai selon les normes en vigueur (AFNOR, 2008; ISO, 1999) dans des conditions contrôlées, où des dispositions ont été prises pour minimiser le rayonnement acoustique de la pièce travaillée. Par ailleurs, en laboratoire, c'est la puissance acoustique rayonnée par l'outil qui a été évaluée dans une salle semi-anéchoïque. Pour les mesures terrains, c'est plutôt le niveau de pression acoustique qui a été mesuré près des oreilles du travailleur, afin de caractériser son exposition au bruit. Dans ce dernier cas, le bruit rayonné par la pièce travaillée, soit la charpente ou le toit dans lequel les clous étaient enfoncés, était présent. Il y a donc lieu de se questionner sur la représentativité des mesures en laboratoire normalisées, qui ne tiennent pas compte du rayonnement de la pièce travaillée par rapport aux mesures terrains. Est-ce que les mesures effectuées en laboratoire peuvent être utilisées pour estimer les niveaux d'exposition au bruit et aux vibrations ? Comme les émissions vibratoires et sonores des cloueuses peuvent également être utilisées pour choisir des outils moins vibrants et moins bruyants, il était pertinent de se demander si le classement des outils, selon leurs niveaux sonores et vibratoires, est le même en laboratoire que sur le terrain. La comparaison des niveaux vibratoires (section 6.1) et des niveaux de puissance acoustique (section 6.2) est suivie du classement des différentes cloueuses évaluées (section 6.3).

### 6.1 Comparaison des niveaux vibratoires

Les niveaux moyens de vibration main-bras obtenus en laboratoire et sur le terrain sont comparés dans le Tableau 4. On constate que les niveaux de vibrations mesurés en laboratoire sont jusqu'à 25 % moins élevés pour toutes les cloueuses pneumatiques (dénotées P\*\*), tandis que pour les cloueuses à gaz (GB1) et électrique (EB1), ces niveaux sont respectivement de 3 % et 10 % moins élevés par rapport aux mesures sur le terrain. L'utilisation du mode séquentiel continu (« bump mode ») par les travailleurs sur le terrain peut, en partie, expliquer ces niveaux plus élevés. Pour les cloueuses pneumatiques, la pression d'alimentation était également plus élevée en milieu de travail (120 psi) par rapport à la pression d'alimentation mesurée en laboratoire (100 psi), ce qui peut mener à des chocs plus importants. L'incertitude associée à la variabilité des mesures peut également expliquer en partie les différences entre les mesures en laboratoire et celles sur le terrain. En effet, pour les mesures en laboratoire, les coefficients de variation (*CV*) sont de 1 % à 7 % (Tableau 2), tandis que pour les mesures terrains, les coefficients de variation sont de 1 % à 16 % (Tableau 3).

**Tableau 4 Comparaison des niveaux de vibrations obtenus en laboratoire et sur le terrain**

Cloueuse	Accélération $a_{hw,3s}$ ( $m/s^2$ )		Différence (%)
	Terrain	Laboratoire	
PT1	5,7	4,8	-16
PT2	4,4	3,4	-23
PR1	4,9	4,9	0
PR2	4,4	3,4	-23
PB1	N/A	4,9	N/A
PB2	4,9	3,7	-25
PB3	3,8	3,6	-5
PB4	N/A	3,4	N/A
GB1	3,1	3,2	3
EB1	3,1	3,4	10

## 6.2 Comparaison des niveaux de bruit

Les niveaux moyens de bruit obtenus en laboratoire et sur le terrain sont comparés dans le Tableau 5. Les niveaux obtenus sur le terrain correspondent aux niveaux d'exposition binauraux (Tableau 3), tandis que les niveaux en laboratoire ont été estimés à partir des niveaux de puissance acoustique obtenus en laboratoire (Tableau 2). Pour les mesures en laboratoire, l'estimation du niveau de pression acoustique à partir de la puissance acoustique a été calculée selon les équations (6) et (7) du chapitre 4, en considérant un plan réfléchissant. Donc, la surface de mesure est constituée d'une demi-sphère disposée sur le plan réfléchissant ayant un rayon de 0,5 m ( $L_s = 2,0$  dB) pour les travaux de toiture et de 0,8 m ( $L_s = 6,0$  dB) pour les travaux de charpente. Les rayons des demi-sphères correspondent aux distances oreilles-cloueuse estimées à partir de l'observation des travailleurs sur le terrain.

On note que les niveaux de bruit mesurés sur le terrain ont tendance à être légèrement plus élevés par rapport à ceux estimés à partir des mesures en laboratoire, ce qui peut s'expliquer par la contribution additionnelle de la pièce travaillée pour les mesures terrains. Par ailleurs, pour trois cloueuses (PR1, PB1 et GB1), le niveau de bruit sur le terrain est de 0,5 dB à 1,4 dB moins élevé par rapport aux valeurs estimées à partir des mesures en laboratoire. Ces écarts peuvent être attribués à l'incertitude des mesures. En effet, pour les mesures en laboratoire, les coefficients de variation ( $CV$ ) sont de 1 % à 10 % (Tableau 2), tandis que pour les mesures terrains, les coefficients de variation sont de 5 % à 28 % (Tableau 3).

**Tableau 5 Comparaison des niveaux de bruit obtenus en laboratoire et sur le terrain**

Cloueuse	Niveau de bruit $L_{pA,1s}$ (dBA)		Différence (dBA)
	Laboratoire	Terrain	
PT1	97,7	99,5	1,8
PT2	95,9	97,7	1,8
PR1	99,1	98,2	-0,9
PR2	95,7	98,4	2,7
PB1	99,0	98,5	-0,5
PB2	96,6	100,1	3,5
PB3	97,0	98,7	1,7
PB4	99,0	N/A	N/A
GB1	101,1	99,7	-1,4
EB1	89,6	91,7	2,1

### 6.3 Classement des outils

Le classement des outils selon leurs niveaux de bruit et de vibrations permet le choix, pour l'utilisateur, d'outils moins bruyants et moins vibrants. Ce n'est pas alors le niveau absolu de bruit ou de vibration qui importe, comme pour l'évaluation de l'exposition, mais plutôt de savoir si tel outil est moins bruyant ou moins vibrant que tel autre. Le Tableau 6 présente le classement des outils selon leurs émissions vibratoires mesurées sur le terrain (à gauche) et en laboratoire (à droite) pour les cloueuses de charpente, tandis que le même classement pour les cloueuses de toiture est présenté au Tableau 7. Pour les cloueuses de charpente, on constate que le classement en fonction du niveau de vibrations est le même, peu importe que les mesures soient effectuées en laboratoire ou sur le terrain, sauf pour les cloueuses PB3 et PR2 qui s'échangent les troisième et quatrième rangs. On constate toutefois que plusieurs cloueuses affichent des niveaux vibratoires similaires (GB1 et EB1, ainsi que PB2 et PR1 pour les mesures terrains; EB1 et PR2 pour les mesures en laboratoire), ce qui rend le classement arbitraire pour ces cas particuliers. Par ailleurs, étant donné la variabilité des résultats terrains et en laboratoire, on peut facilement considérer qu'une différence de  $0,2 \text{ m/s}^2$  ou moins dans un classement n'est pas significatif. Donc, la différence de rang entre la PR2 et la PB3 pour les mesures en laboratoire ne serait pas significative. En ce qui concerne les cloueuses de toiture, le même classement est obtenu, que les mesures aient été prises sur le terrain ou en laboratoire (Tableau 7). On peut donc conclure pour les mesures de vibrations que le classement obtenu en laboratoire est cohérent avec celui obtenu sur le terrain.

**Tableau 6 Classement des cloueuses de charpente selon leurs niveaux vibratoires (de la moins vibrante à la plus vibrante)**

Terrain			Laboratoire	
Rang	Accélération pondérée 3s (m/s <sup>2</sup> )		Accélération pondérée 3s (m/s <sup>2</sup> )	
1	3,1	GB1	GB1	3,2
2	3,1	EB1	EB1	3,4
3	3,8	PB3	PR2	3,4
4	4,4	PR2	PB3	3,6
5	4,9	PB2	PB2	3,7
6	4,9	PR1	PR1	4,9

**Tableau 7 Classement des cloueuses de toiture selon leurs niveaux vibratoires (de la moins vibrante à la plus vibrante)**

Terrain			Laboratoire	
Rang	Accélération pondérée 3s (m/s <sup>2</sup> )		Accélération pondérée 3s (m/s <sup>2</sup> )	
1	4,4	PT2	PT2	3,4
2	5,7	PT1	PT1	4,8

De façon similaire, le classement des outils selon le niveau de pression acoustique binaural pour les mesures terrains et selon le niveau de puissance acoustique pour les mesures en laboratoire est présenté au Tableau 8 pour les cloueuses de charpente et au Tableau 9 pour les cloueuses de toiture. On constate que la cloueuse électrique EB1 est la moins bruyante autant sur le terrain qu'en laboratoire. La cloueuse à gaz GB1 est également la plus bruyante pour les mesures en laboratoire et la deuxième plus bruyante pour les mesures terrains. Le classement est également similaire pour les cloueuses de charpente pneumatiques, sauf pour les cloueuses PR1 et PB2. Le rayonnement acoustique de la pièce travaillée pour les mesures terrains ainsi que la directivité du bruit de l'échappement pourraient expliquer ces différences. La contribution du rayonnement de la pièce travaillée sera considérée au chapitre suivant. En ce qui concerne les cloueuses de toiture (Tableau 9), le même classement est obtenu pour les mesures terrains et celles en laboratoire. Comme les mesures en laboratoire montrent des niveaux vibratoires et des niveaux acoustiques qui permettent un classement entre les cloueuses cohérent avec le classement des mesures terrains, il est justifié de conclure que les mesures en laboratoire permettent de classer les cloueuses.

**Tableau 8 Classement des cloueuses de charpente selon leurs niveaux acoustiques (de la moins bruyante à la plus bruyante)**

Terrain			Laboratoire	
Rang	Pression acoustique 1s (dBA)			Puissance acoustique 1s (dBA)
1	91,7	EB1	EB1	95,6
2	98,2	PR1	PR2	101,7
3	98,4	PR2	PB2	102,6
4	98,7	PB3	PB3	103,0
5	99,7	GB1	PR1	105,1
6	100,1	PB2	GB1	107,1

**Tableau 9 Classement des cloueuses de toiture selon leurs niveaux acoustiques (de la moins bruyante à la plus bruyante)**

Terrain			Laboratoire	
Rang	Pression acoustique 1s (dBA)			Puissance acoustique 1s (dBA)
1	97,7	PT2	PT2	97,9
2	99,5	PT1	PT1	99,7



## 7. AMÉLIORATION DU BMN EN DÉVELOPPANT UN DISPOSITIF DE SUBSTITUTION DE L'OPÉRATEUR (DSO)

Le deuxième objectif de l'étude vise à développer et à utiliser une méthode diagnostique des sources de bruit et de vibrations. Pour ce faire, plusieurs tests et itérations doivent être réalisés sur différentes cloueuses. Comme la norme de mesure actuelle nécessite 3 opérateurs différents et plus de 150 clous par cloueuse, cela rend très difficiles ces itérations, d'où l'importance de développer un dispositif qui permet de réduire la complexité et le coût en temps pour l'évaluation d'une cloueuse. Le but recherché lors du développement d'un dispositif de substitution de l'opérateur (DSO) est de réduire le nombre de clous à enfoncer, sans opérateur, pour procéder à l'évaluation d'une cloueuse. Le développement du DSO est le sujet de la première section. La seconde section présente la validation du concept retenu, la troisième section présente les niveaux crêtes de bruit et de vibrations et finalement, la dernière section traite des améliorations à apporter afin d'optimiser le DSO actuel.

### 7.1 Développement du mécanisme de substitution

#### 7.1.1 Usage du système main-bras pour les burineurs

Le concept initial du DSO a été inspiré d'une étude de l'IRSST portant sur l'évaluation de l'émission vibratoire de marteaux burineurs (Boutin, Marcotte et Jasinski, 2007; Marcotte, Boutin et Jasinski, 2010). Dans cette étude, un système recréant l'impédance mécanique du système main-bras d'un opérateur a été développé. Un marteau burineur opère généralement selon une force uniaxiale dans l'axe de percussion et possède une géométrie axisymétrique selon ce même axe. Cependant, une cloueuse ne présente pas ce même mode opératoire. La poignée d'une cloueuse est excentrée par rapport à l'axe de percussion, ce qui génère une force de recul en translation, mais aussi en rotation, que le système de préhension du burineur ne peut supporter. La Figure 12 illustre l'incapacité à réutiliser ce même système pour les cloueuses.

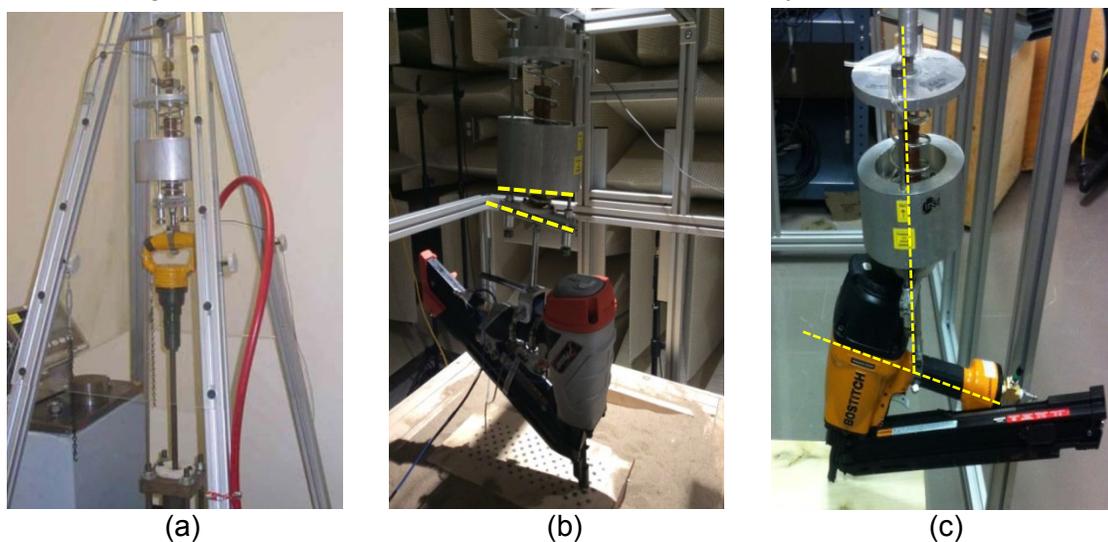


Figure 12 Mécanisme de substitution main-bras : (a) utilisation avec un marteau burineur, (b) problème de torsion et (c) problème de préhension

### 7.1.2 Prise en compte de la mesure du bruit

Comme la présente étude ne mesure pas que les vibrations, le banc de test devait aussi permettre de mesurer le bruit généré par une cloueuse. À cette fin, lors de la conception, deux critères ont été pris en compte, soit (i) l'influence du support sur la mesure de la puissance acoustique et (ii) le rayonnement de la structure elle-même, sous l'excitation de l'impact de la cloueuse.

#### 7.1.2.1 Influence du support du DSO sur la mesure de la puissance acoustique

Le support utilisé pour tenir le DSO est un assemblage de profilés d'aluminium modulaires. Pour mesurer l'influence du support, une source de puissance de référence a été utilisée (Acculab RSS 400). La Figure 13 montre le montage du banc de test avec et sans le support et les résultats obtenus sont présentés au Tableau 10.

**Tableau 10 Niveaux de puissance acoustique avec une source de référence (avec et sans le support)**

$L_w$ sans le support	95,2 dBA
$L_w$ avec le support	94,7 dBA
Différence des $L_w$	0,5 dBA



(a)



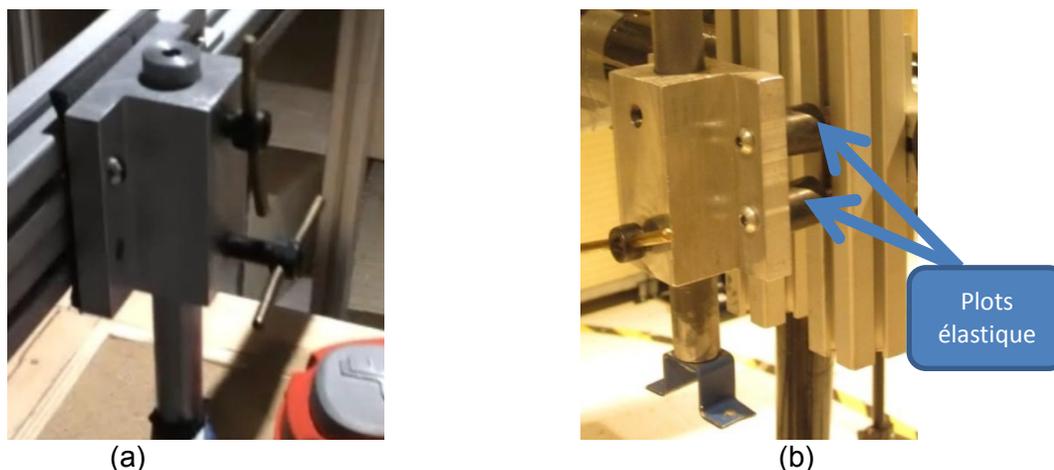
(b)

**Figure 13 Source de puissance de référence (a) sans le support et (b) avec le support**  
**Note : la couverture évite le contact de la source avec le sable du bac**

La différence entre les deux niveaux de puissance (avec et sans le support) est de l'ordre de 0,5 dBA, ce qui ne devrait pas influencer les résultats lors de l'utilisation du DSO, particulièrement en ce qui concerne le classement des clouees.

### 7.1.2.2 Rayonnement de la structure

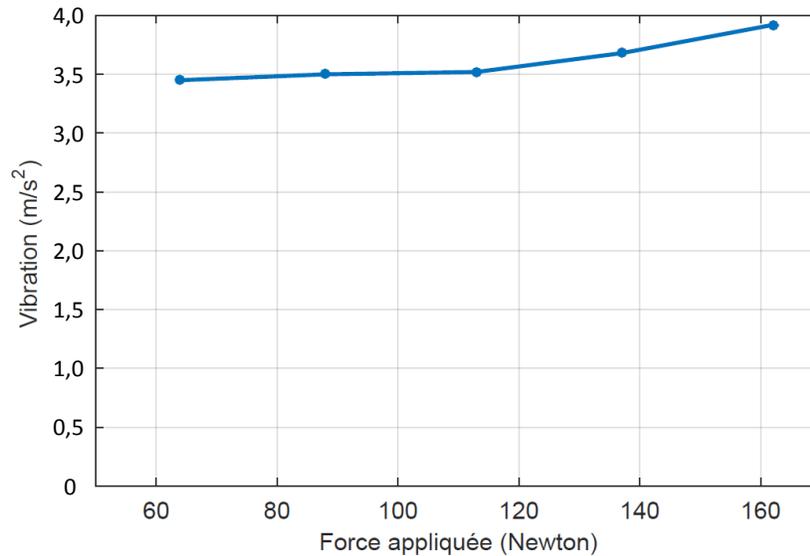
Le rayonnement de la structure a été réduit en modifiant l’attache qui lie le DSO à la structure d’aluminium, afin de limiter le couplage entre les deux. La modification consiste à insérer des plots flexibles entre le support et l’attache du DSO (Figure 14).



**Figure 14** Contact entre la structure et le DSO : (a) contact direct et (b) ajout de plots flexibles

### 7.1.3 Influence sur l’accélération de la charge appliquée sur la cloueuse

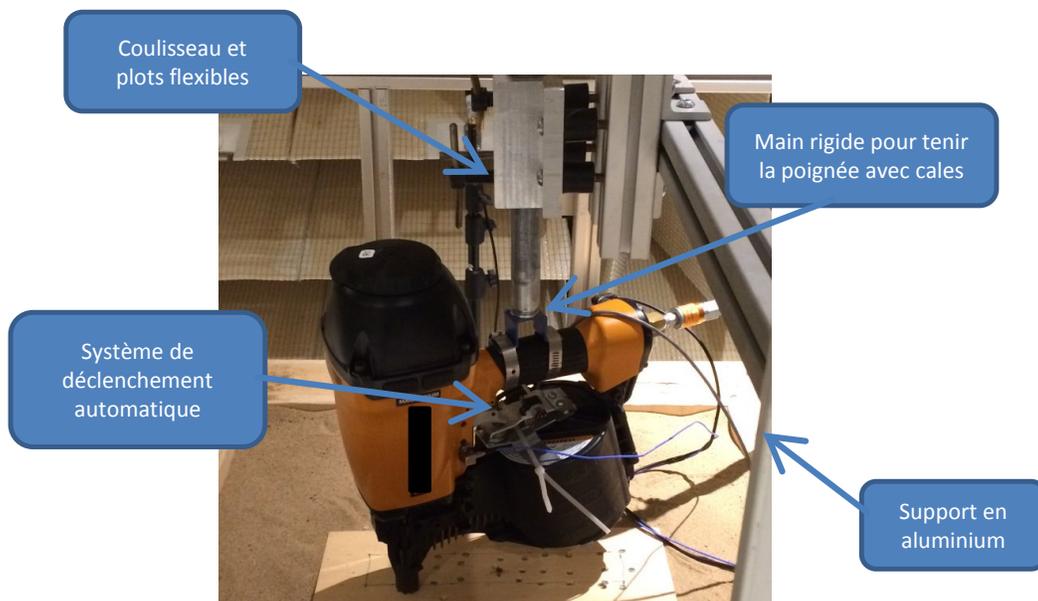
Lors de l’élaboration des prototypes du DSO, certaines solutions nécessitaient de mettre une charge élevée (poids additionnel) sur la cloueuse pour bien la maintenir en position. En conséquence, il était justifié de se demander quelle est l’influence sur l’accélération de la charge appliquée par l’opérateur sur la cloueuse lors de l’enfoncement d’un clou. L’évaluation de cette influence s’est faite sur une cloueuse pneumatique à bande pour charpente, la cloueuse PB3. Cette cloueuse pèse environ 5 kg (50 N). Le graphique de la Figure 15 montre l’évolution de l’accélération globale pondérée en fonction de l’application d’une force variant entre 60 et 160 N, soit le poids de la cloueuse additionné d’une force de maintien de 10 à 110 N. Il est à noter que la force appliquée par un opérateur est normalement très faible; elle se situe plus près de 10 N que de 110 N. Or, pour des charges faibles, l’accélération globale est assez stable; elle n’augmente que pour des charges importantes (> 110 N).



**Figure 15** Accélération globale en fonction de la charge appliquée (cloueuse PB3)

#### 7.1.4 Solution finale

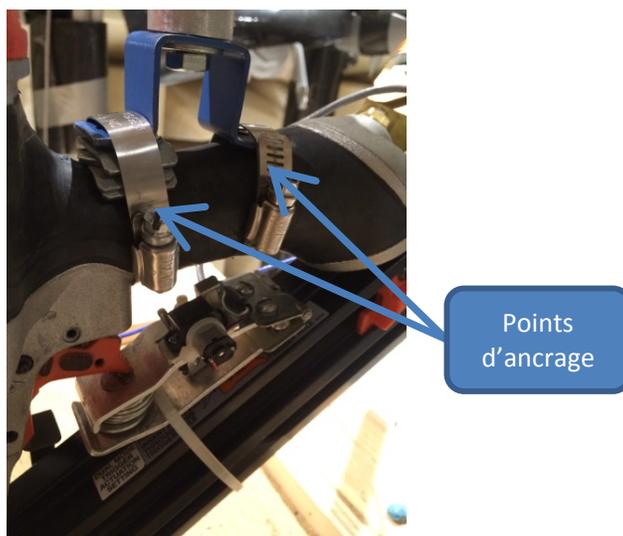
La solution finale présente un support en profilés d'aluminium utilisant des plots flexibles pour tenir le DSO (Figure 16), tout en limitant le couplage entre le DSO et le support (voir la Figure 14). Le DSO consiste en (i) un système de retenue qui s'attache à la cloueuse et (ii) une tige coulissante verticale qui permet à la cloueuse de s'appuyer avec une charge répétable (poids de la cloueuse) sur la pièce travaillée. Le DSO comporte aussi (iii) un système de déclenchement à distance.



**Figure 16** Solution finale du dispositif de substitution de l'opérateur (DSO)

### 7.1.4.1 Système de retenue de la cloueuse

Comme le centre de masse d'une cloueuse n'est pas coaxial à l'axe de percussion, la cloueuse cherche à pivoter sur elle-même lors de l'enfoncement d'un clou en plus d'être soumise à un mouvement de recul. Ce mouvement de rotation est pris en charge par les plots flexibles. Cela permet d'attacher de façon rigide la cloueuse au DSO (Figure 16). Deux points d'ancrage sont utilisés afin permettre de positionner des cales d'épaisseur variable sous un des points d'ancrage, afin de s'assurer que l'axe de percussion de la cloueuse soit parfaitement vertical (Figure 17).



**Figure 17** Système de retenue de la cloueuse (2 points d'ancrage) avec cales d'épaisseur variable

### 7.1.4.2 Système de coulisseau dans l'axe de percussion

Le mouvement de recul de la cloueuse est rendu possible par l'utilisation d'un coulisseau sur le DSO (Figure 16). Le coulisseau est enduit de graisse afin de minimiser le frottement. Cette fonction de coulissement permet de s'assurer que le poids de la cloueuse repose entièrement sur la pièce travaillée. Cela permet de réduire la variabilité de la charge totale appliquée sur la cloueuse. La charge totale étant égale au poids de la cloueuse additionné à celui de la tige d'aluminium qui constitue la partie mâle du coulisseau, cela permet de rapprocher la valeur d'accélération globale du DSO à celle des sujets humains (Figure 15).

### 7.1.4.3 Système de déclenchement à distance

Afin de pouvoir déclencher l'enfoncement d'un clou par l'intermédiaire du système d'acquisition, un dispositif a été développé (Figure 18). Un ressort est écrasé et contient suffisamment d'énergie pour enfoncer la gâchette de la cloueuse. Le mécanisme doit être réarmé à la main après chaque impact. Comme la tension du ressort maintient la gâchette de la cloueuse en position enfoncée, le DSO ne peut pas être utilisé avec les cloueuses de toiture dont le mécanisme est réglé pour un usage en mode séquentiel continu.



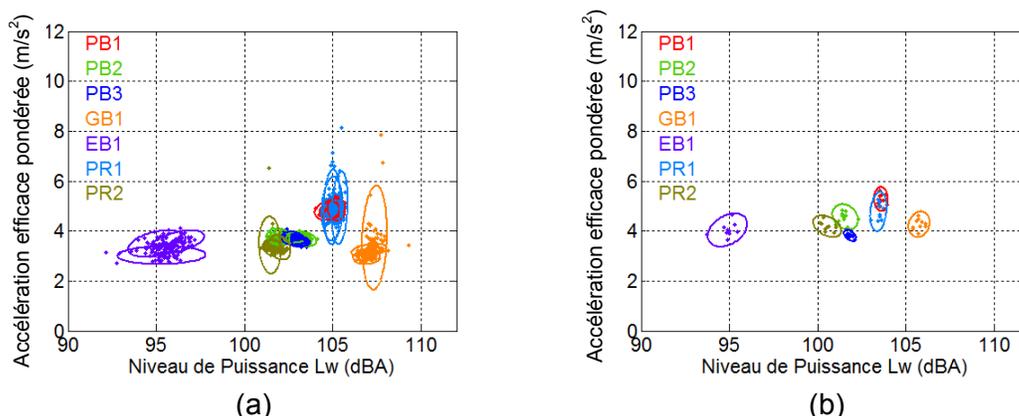
**Figure 18** Système de déclenchement à distance : (a) position fermée, prêt à déclencher et (b) position ouverte

## 7.2 Validation du DSO

Afin de valider le DSO, les données obtenues avec ce dispositif et celles provenant du banc de mesures normalisées avec les sujets humains (BMN) sont comparées. Pour l'évaluation des cloueuses, telle que requise par les normes applicables, trois sujets humains ont enfoncé 50 clous chacun avec les cloueuses (PR1, PR2, PB1, PB2, PB3, GB1 et EB1), alors que seulement 10 clous sont enfoncés avec le DSO. Pour chaque mesure, les grandeurs caractéristiques étudiées sont le niveau de puissance acoustique pondéré  $A$  ( $L_{wA,1s}$ ) et l'accélération efficace avec la pondération main-bras  $Wh$  ( $a_{hw,3s}$ ). Ainsi, pour une mesure, c'est-à-dire un clou enfoncé, il est possible de définir un couple de valeur (puissance acoustique, accélération efficace). Afin d'illustrer la distribution de ces couples de valeurs (puissance acoustique, accélération efficace), ceux-ci ont été reportés sur un même graphique avec la puissance acoustique en abscisse et l'accélération moyenne en ordonnée. On obtient ainsi un nuage de points pour chaque cloueuse et pour chacun des 3 sujets humains (Figure 19a) ainsi que pour chaque cloueuse testée avec le DSO (Figure 19b). Afin de mettre en évidence et comparer plus facilement la dispersion et le positionnement relatif des résultats des sujets humains entre eux ainsi qu'entre eux et le DSO, chaque nuage de point est pourvu d'une ellipse de covariance (avec la réserve qu'il ne s'agit pas d'une ellipse de confiance à 90 %, car le nuage de points ne suit pas une distribution normale bivariée). Une ellipse de petite dimension indique de faibles variations et, inversement, une ellipse de grande dimension est associée à de fortes variations. Une ellipse allongée suivant l'axe de l'abscisse dénote une plus forte variation du niveau de puissance acoustique et une ellipse allongée suivant l'axe de l'ordonnée indique une plus forte variation de l'accélération.

Par ailleurs, cette représentation permet de faire un classement des cloueuses. Ainsi, une cloueuse se situant en bas à gauche de la Figure 19a est une cloueuse peu bruyante et peu vibrante et, inversement, une cloueuse en haut à droite de la même figure indique une cloueuse très bruyante et très vibrante. En comparant les deux graphiques de la Figure 19, il est possible de constater que le DSO conserve le même ordre de classement des cloueuses que le BMN pour les niveaux de bruit et de vibrations. Que ce soit avec les sujets humains ou avec le DSO, la cloueuse EB1 est toujours celle qui présente le niveau de puissance acoustique le plus faible. Inversement, la cloueuse GB1 se caractérise par le niveau acoustique le plus élevé avec les sujets humains et le DSO. D'un point de vue vibratoire, le DSO a tendance à légèrement augmenter le niveau de vibration, mais en restant dans des proportions équivalentes. Cette première comparaison permet de valider le DSO d'un point de vue global, car les résultats obtenus sont similaires à ceux obtenus avec les sujets humains. Pour mieux observer les

différences entre le DSO et les sujets humains, les ellipses de covariance sont analysées pour chaque cloueuse.



**Figure 19 Accélération efficace pondérée en fonction du niveau de puissance acoustique (a) pour trois sujets humains et (b) avec le DSO**

La Figure 20a présente les ellipses obtenues avec la cloueuse PR1 lorsqu'utilisée par les trois sujets humains et avec le DSO. Le niveau de puissance acoustique obtenu avec le DSO par rapport aux essais avec les opérateurs est en moyenne légèrement sous-estimé de 1,5 dBA, alors que l'accélération moyenne est similaire. La surface de l'ellipse est plus petite avec le DSO, ce qui indique que ce dispositif présente moins de variations dans les résultats que les trois sujets humains. Avec la cloueuse PR2 (Figure 20b), l'accélération moyenne mesurée avec le DSO est légèrement surestimée de 0,5 m/s<sup>2</sup> et le niveau de puissance acoustique est sous-estimé de 1 dB. La variation de l'accélération est plus faible qu'avec les sujets humains, mais celle en puissance est similaire. Avec la cloueuse PB1 (Figure 20c), les ellipses obtenues avec les sujets humains et le DSO sont similaires, avec toujours une légère sous-estimation du niveau de puissance acoustique pour le DSO. Pour la cloueuse PB2 (Figure 20d), le niveau de puissance acoustique est mieux estimé, mais l'accélération en utilisant le DSO est surestimée de presque 1 m/s<sup>2</sup>. Pour la cloueuse PB3 (Figure 20e), l'accélération pour le DSO est similaire à celle obtenue avec les sujets humains et la surface de l'ellipse est plus petite. En revanche, le niveau de puissance acoustique est sous-estimé de 1 dB. Avec la cloueuse GB5 (Figure 20f), le niveau de puissance acoustique fourni par le DSO est sous-estimé et l'accélération est similaire. Finalement, pour la cloueuse EB6 (Figure 20g) le niveau de puissance acoustique mesuré avec le DSO est correctement estimé, mais l'accélération est légèrement surestimée. Pour conclure, le DSO est capable de reproduire le classement des cloueuses obtenu avec les trois sujets humains. D'un point de vue général, la surface des ellipses indique que les variations sont moins importantes avec le DSO. Ainsi, malgré une légère sous-estimation du niveau de puissance acoustique et une surestimation de l'accélération moyenne, le DSO est capable de simuler de façon satisfaisante l'interaction d'un sujet humain avec les cloueuses.

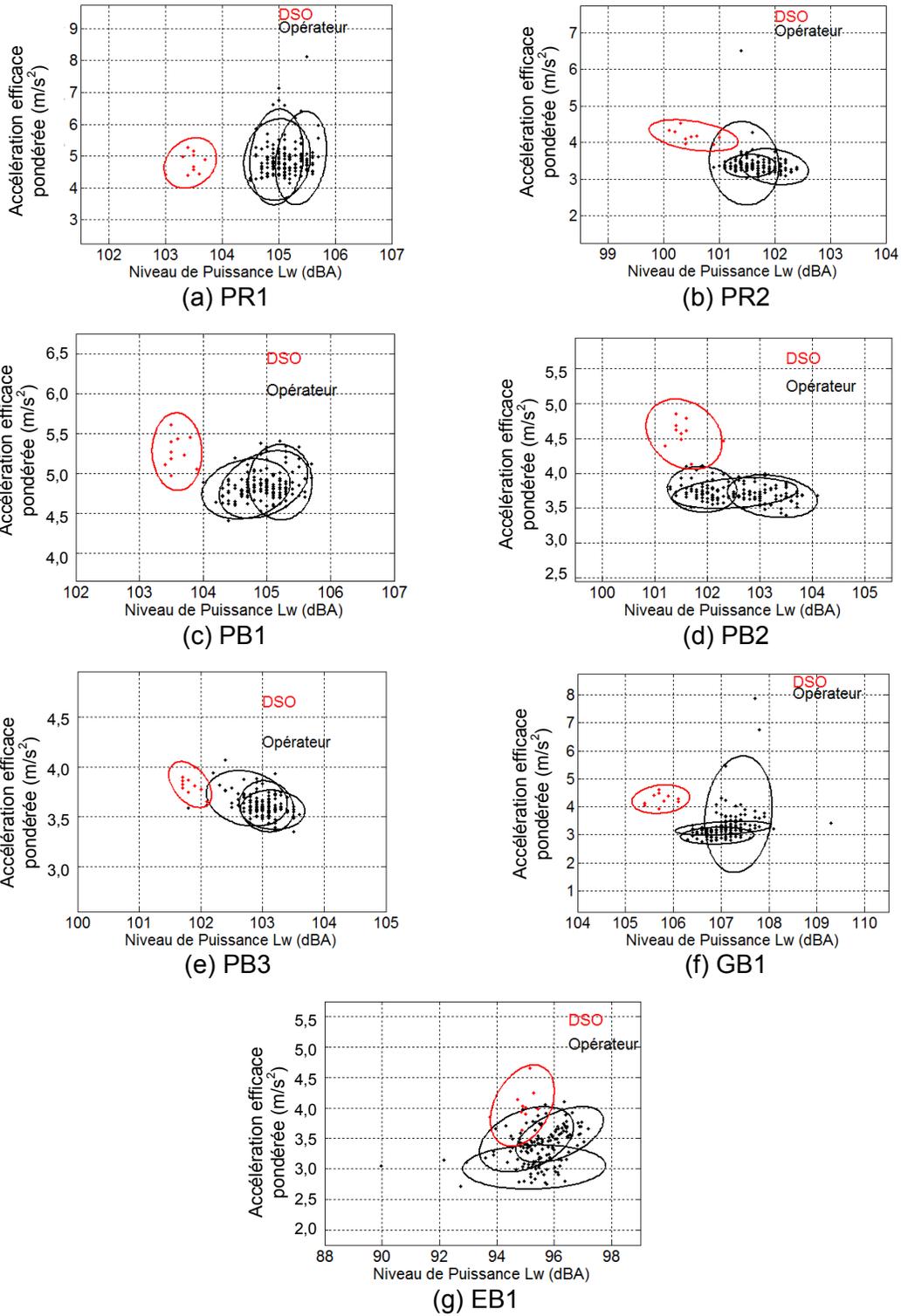


Figure 20 Accélération efficace pondérée en fonction du niveau de puissance acoustique pour a) PR1, b) PR2, c) PB1, d) PB2, e) PB3, f) GB1 et g) EB1

### 7.2.1 Comparaison des valeurs moyennes

Les résultats obtenus avec le DSO (valeurs moyennes avec seulement 10 clous) sont comparés avec ceux obtenus avec les sujets humains (banc de mesures normalisées ou BMN) dans les deux sous-sections suivantes pour les mesures d'accélération et de puissance acoustique.

#### 7.2.1.1 Accélération

La comparaison des résultats vibratoires entre le BMN effectué avec des sujets humains et le DSO sont présentés au Tableau 11. Ce tableau est divisé en 3 parties contenant chacune 2 colonnes. La section de gauche présente les accélérations globales pondérées pour les mesures en laboratoire avec sujets humains. Les données sont présentées en ordre croissant, soit un classement de la cloueuse la moins vibrante à la plus vibrante. La section du centre présente les mêmes résultats que la section de gauche, mais le DSO est utilisé à la place des sujets humains. On remarque que même si les niveaux avec le DSO sont plus élevés, le classement des cloueuses est sensiblement le même (à l'exception des cloueuses PB3 et GB1). Finalement, la 3<sup>e</sup> section du tableau illustre la différence des niveaux d'accélération entre les mesures avec sujets humains et celles avec le DSO. Ces différences ne sont pas présentées en ordre croissant, mais plutôt dans le même ordre que les mesures avec sujets humains (1<sup>re</sup> colonne).

**Tableau 11 Comparaison des accélérations efficaces pondérées, par ordre croissant, entre les mesures avec les sujets humains (BMN) et les mesures avec le DSO**

Accélération BMN		Accélération DSO		Différence $a_{hw,3s}$ (BMN - DSO)	
Cloueuse	$a_{hw,3s}$ (m/s <sup>2</sup> )	Cloueuse	$a_{hw,3s}$ (m/s <sup>2</sup> )	Cloueuse	$a_{hw,3s}$ (m/s <sup>2</sup> )
GB1	3,2	PB3	3,8	GB1	-1,1
EB1	3,4	EB1	4,0	EB1	-0,7
PR2	3,4	PR2	4,1	PR2	-0,7
PB3	3,6	GB1	4,3	PB3	-0,2
PB2	3,7	PB2	4,5	PB2	-0,8
PR1	4,9	PR1	4,8	PR1	0,1
PB1	4,9	PB1	5,7	PB1	-0,7

#### 7.2.1.2 Puissance acoustique

Comme pour la sous-section précédente, les résultats obtenus avec le DSO pour les niveaux de puissance acoustique sont présentés au Tableau 12. Le classement des cloueuses basé sur les mesures prises avec les sujets humains et celui déterminé par les mesures prises avec le DSO est exactement le même. Également, les différences entre les deux séries de mesures sont réellement faibles (entre 0 et 1,2 dB). La cloueuse à batterie (EB1) est très silencieuse en comparaison avec les autres cloueuses. À l'inverse, la cloueuse à gaz (GB1) est plus bruyante que les autres.

**Tableau 12 Comparaison des niveaux de puissance acoustique, par ordre croissant, entre les mesures avec les sujets humains (BMN) et celles avec le DSO**

L <sub>w</sub> avec le BMN		L <sub>w</sub> avec le DSO		Différence L <sub>w</sub> (BMN - DSO)	
Cloueuse	L <sub>w</sub> (dBA)	Cloueuse	L <sub>w</sub> (dBA)	Cloueuse	L <sub>w</sub> (dBA)
EB1	95,6	EB1	95,5	EB1	0,0
PR2	101,7	PR2	100,9	PR2	0,8
PB2	102,6	PB2	101,8	PB2	0,7
PB3	103,0	PB3	102,2	PB3	0,9
PB1	105,0	PR1	104,0	PB1	1,2
PR1	105,1	PB1	104,1	PR1	0,8
GB1	107,1	GB1	106,5	GB1	0,6

### 7.3 Pondérations alternatives et niveaux de crête

Comme mentionné au chapitre 2, le bruit et les vibrations de nature impulsionnelle posent une problématique particulière au niveau de la santé des travailleurs. Cependant, les indicateurs usuels basés sur la valeur efficace du signal de bruit ou de vibration ne prennent pas en compte la nature impulsionnelle de ces signaux. Des indicateurs alternatifs, qui tiennent compte de l'impulsivité des signaux, sont donc introduits dans cette section. En effet, le DSO offre une bonne représentativité des résultats obtenus avec les sujets humains en laboratoire, tout en offrant une variabilité similaire par rapport aux sujets humains pour moins d'essais (10 essais pour le DSO contre 150 essais pour les sujets humains avec le BMN). Ce sont donc les résultats du DSO qui sont utilisés pour calculer les indicateurs alternatifs des niveaux de bruit et de vibrations qui tiennent compte de leur nature impulsionnelle.

#### 7.3.1 Niveaux vibratoires : pondération $hF$ et valeurs de crête

La pondération main-bras  $Wh$  est largement utilisée pour caractériser l'exposition aux vibrations main-bras. Cependant, elle met l'accent sur les basses fréquences (12 – 16 Hz), et néglige les plus hautes fréquences (jusqu'à 1000 Hz). Une pondération alternative, qui consiste en un filtre passe-bande entre 10 et 1000 Hz, procurant une pondération unitaire dans cette gamme de fréquences, est proposée dans la spécification technique ISO/TS 15694 :2004 «Vibrations et chocs mécaniques -- Mesurage et évaluation des chocs simples transmis par les machines portatives et guidées à la main au système main bras » (ISO, 2004). Cette pondération est dénommée « flat<sub>h</sub> » ou encore  $hF$ . Une étude épidémiologique a d'ailleurs conclu que la pondération  $hF$  était supérieure à la pondération  $Wh$  pour prédire le développement du syndrome de Raynaud auprès de travailleurs exposés aux vibrations main-bras (Massimo Bovenzi, Pinto, Picciolo, Mauro et Ronchese, 2011). Par ailleurs, la spécification technique ISO/TS 15694 présente plusieurs méthodes alternatives permettant de mieux évaluer les chocs simples que l'on retrouve sur les clouees. Les chocs étant générés dans l'axe de percussion (axe  $z$ ) de la cloueuse (qui est aussi l'axe dominant), les résultats de cette sous-section sont limités aux accélérations se trouvant dans cet axe dominant. Le facteur de crête, qui est le niveau instantané maximal d'un signal divisé par sa valeur efficace, a été retenu dans le cadre de cette étude, car il représente bien l'impulsivité de ce type de signal (choc simple). Les résultats de vibrations, pour l'axe de percussion  $z$ , sont présentés au Tableau 13. Ce tableau

présente la moyenne ( $\bar{x}$ ) des 10 essais ainsi que le coefficient de variation ( $CV$ ) pour les niveaux d'accélération efficace 3 secondes et de crête, et ce, pour chacune des deux pondérations  $Wh$  et  $hF$ . Le facteur de crête  $FC$  (niveau de crête/niveau efficace) est également rapporté pour ces deux pondérations. Contrairement aux sections précédentes, les résultats du Tableau 13 ne sont pas classés par ordre croissant des niveaux de vibrations.

**Tableau 13 Niveau efficace, niveau de crête et facteur de crête pour l'accélération pondérée  $Wh$  et  $hF$  (axe  $z$ )**

Cloueuse	Pondération $Wh$					Pondération $hF$				
	Niveau efficace 3 s (axe $z$ , $m/s^2$ )		Niveau de crête (axe $z$ , $m/s^2$ )		$FC$	Niveau efficace 3 s (axe $z$ , $m/s^2$ )		Niveau de crête (axe $z$ , $m/s^2$ )		$FC$
	$\bar{x}$	$CV$	$\bar{x}$	$CV$		$\bar{x}$	$CV$	$\bar{x}$	$CV$	
PR1	4,4	0,07	105,9	0,05	24,3	233,5	0,04	19034	0,09	81,5
PR2	3,5	0,04	66,8	0,01	19,4	75,4	0,08	6891	0,20	90,8
PB1	4,9	0,04	122,5	0,04	24,9	147,0	0,08	17492	0,20	118,2
PB2	4,0	0,05	80,9	0,02	20,3	100,1	0,07	10862	0,06	108,6
PB3	3,5	0,03	79,7	0,01	22,7	127,4	0,02	10658	0,04	83,7
GB1	2,3	0,07	43,8	0,18	19,0	62,4	0,12	3882	0,17	62,0
EB1	3,2	0,08	62,1	0,04	19,3	61,4	0,07	3196	0,13	51,9

À la lecture du Tableau 13, on constate que les cloueuses non pneumatiques (GB1 et EB1) produisent les niveaux de crête les moins élevés, tandis que les cloueuses pneumatiques PR1 et PB1 affichent les niveaux de crête les plus élevés, et ce peu importe la pondération utilisée. Par ailleurs, les facteurs crêtes ( $FC$ ) varient de 19,0 à 24,9 pour la pondération  $Wh$ , et de 51,9 à 118,2 pour la pondération  $hF$ .

### 7.3.2 Niveaux de bruit : pondération $C$ et valeurs de crête

De façon similaire à la présentation de la sous-section précédente sur les vibrations, celle-ci présente des indicateurs alternatifs du niveau de bruit qui prennent mieux en compte la nature impulsionnelle du bruit des cloueuses. D'ailleurs, la norme ISO 12549 :1999 requiert de rapporter le niveau de pression de crête pondéré en dBC lorsque celui-ci dépasse les 130 dB. Afin de mieux caractériser la nature impulsionnelle du bruit des cloueuses, les résultats de niveau de pression acoustique du microphone #9 (microphone situé au-dessus de la cloueuse, voir Figure 9) sont présentés au Tableau 14. Ce tableau présente la moyenne  $\bar{x}$  des 10 essais ainsi que le coefficient de variation associé ( $CV$ ) pour les niveaux de pression acoustique efficace 1 seconde et de crête, et ce, pour chacune des deux pondérations  $A$  et  $C$ . Le facteur de crête  $FC$  est également rapporté pour ces deux pondérations. Tout comme pour le Tableau 13, les résultats du Tableau 14 ne sont pas classés par ordre croissant des niveaux de bruit.

**Tableau 14 Niveau efficace, niveau de crête et facteur de crête pour la pression acoustique pondérée *A* et *C* (microphone #9)**

Cloueuse	Pondération <i>A</i>					Pondération <i>C</i>				
	Niveau efficace 1 s (dBA)		Niveau de crête (dBA)		<i>FC</i>	Niveau efficace 1 s (dBC)		Niveau de crête (dBC)		<i>FC</i>
	$\bar{x}$	<i>CV</i>	$\bar{x}$	<i>CV</i>		$\bar{x}$	<i>CV</i>	$\bar{x}$	<i>CV</i>	
<b>PR1</b>	92,5	0,04	120,8	0,10	26,0	92,2	0,04	121,8	0,08	30,1
<b>PR2</b>	91,3	0,04	116,8	0,08	18,9	90,3	0,03	116,2	0,11	19,7
<b>PB1</b>	93,3	0,03	122,5	0,09	28,9	92,9	0,03	122,9	0,05	31,7
<b>PB2</b>	91,5	0,02	117,9	0,10	20,9	90,6	0,03	118,5	0,07	24,6
<b>PB3</b>	93,4	0,02	123,1	0,06	30,1	92,4	0,03	121,9	0,06	30,5
<b>GB1</b>	95,8	0,07	129,3	0,12	47,4	96,4	0,05	128,2	0,09	39,3
<b>EB1</b>	84,4	0,03	114,3	0,06	31,4	84,2	0,04	115,2	0,08	35,3

Les résultats du Tableau 14 montrent que les niveaux efficaces et les niveaux de crête sont très similaires entre les pondérations *A* et *C*. Il en résulte que les facteurs de crête sont également semblables entre ces deux pondérations (18,9 à 47,4 pour la pondération *A* et 19,7 à 39,3 pour la pondération *C*). Contrairement aux résultats relatifs aux émissions vibratoires, ce sont les cloueuses non pneumatiques (EB1 et GB1) qui produisent les facteurs de crête les plus élevés, particulièrement avec la pondération *C*. Par ailleurs, la cloueuse à gaz produit les niveaux de crête les plus élevés, ce qui est cohérent avec son mode de fonctionnement basé sur un mécanisme d'explosion. Les niveaux de crête de pression acoustique les moins élevés sont produits par la cloueuse à batterie EB1, suivie de près par les cloueuses pneumatiques PR2 et PB2. Ces deux cloueuses pneumatiques proviennent du même fabricant et partagent donc la même technologie. Cette analyse fait bien ressortir la nature impulsionnelle du bruit et des vibrations associés aux cloueuses et complète les analyses précédentes des signaux de bruit et de vibrations qui sont basées sur la valeur efficace des signaux.

## 7.4 Recommandations

Bien que l'objectif de réduire la variabilité entre les mesures ait été atteint en utilisant un DSO, faisant en sorte que l'évaluation d'une cloueuse ne requiert plus d'opérateurs et ne nécessite que 10 clous, il reste beaucoup de travail à réaliser afin de rendre les mesures du DSO comparables aux mesures prises avec les sujets humains. Plusieurs suggestions pour améliorer la répétabilité des mesures sont donc proposées.

### 7.4.1 DSO avec les mêmes valeurs que les sujets humains

Bien que la variabilité obtenue avec les 10 clous du DSO soit semblable à celle des 150 clous pour les 3 sujets humains du BMN, les valeurs obtenues avec le DSO ne sont pas encore parfaitement équivalentes à celles des mesures effectuées avec les sujets humains. Il serait intéressant d'optimiser les paramètres du DSO. Pour ce faire, il est nécessaire d'évaluer, entre autres, l'influence de la rigidité des plots flexibles et de la masse ajoutée sur la tige coulissante

ou encore de concevoir un système différent qui prend en compte l'impédance mécanique du système main-bras.

#### ***7.4.2 Déclencheur automatique amélioré***

Le déclencheur conçu pour le présent projet a été développé pour bien fonctionner avec la cloueuse PB3. Cependant, lorsqu'il était utilisé avec les autres cloueuses, l'ajustement pour obtenir un bon fonctionnement était très difficile à obtenir. Une solution envisageable serait d'utiliser de l'air comprimé pour gonfler une bande disposée autour de la poignée et de la gâchette. Afin de provoquer un déclenchement, l'arrivée d'air ferait gonfler la bande et aurait pour effet d'enfoncer la gâchette. La bande gonflable serait fixée sur une bande à fermeture autoagrippante, et pourrait ainsi être fonctionnelle pour tous les types de cloueuses.

#### ***7.4.3 Système de retenue plus facile d'installation***

Le système de retenue actuel utilise une plaquette d'acier qui est reliée à la cloueuse par deux collets de serrage. Comme les deux pattes de la plaquette sont dans le même plan, si la poignée d'une cloueuse n'est pas perpendiculaire à l'axe de percussion, des cales doivent être ajoutées pour ajuster le tout. Aussi, aucune solution n'a été envisagée pour faire en sorte que la plaquette de retenue soit positionnée au même endroit lors du remontage d'une cloueuse. Pour corriger ces détails, il est nécessaire de développer une attache qui serait fixée sur la cloueuse pour la durée des mesures. Cette attache serait ajustée perpendiculairement à l'axe de percussion de façon permanente et pourrait être facilement fixée sur la tige coulissante. Il serait aussi envisageable de fixer directement l'accéléromètre sur cette attache.

#### ***7.4.4 Limiter les ajustements d'alignement***

Durant la prise des mesures avec le DSO, il est apparu essentiel de prendre le temps de bien positionner la cloueuse sur le banc de test. Si son positionnement n'est pas parfait, la variabilité des mesures augmente drastiquement. En plus de dépendre du système de retenue, l'alignement de la cloueuse dépend également de la lubrification du coulisseau, du positionnement des plots, de la position finale de la cloueuse par rapport au support, etc. Le coulisseau pourrait être remplacé par un roulement linéaire. La résistance du déplacement serait toujours la même et la cloueuse ne pourrait pas pivoter latéralement sur elle-même.



## 8. DÉVELOPPEMENT D'UNE MÉTHODE D'IDENTIFICATION ET DE QUANTIFICATION DES MÉCANISMES DE GÉNÉRATION DU BRUIT ET DES VIBRATIONS

Après s'être assuré que le DSO permettait de qualifier une cloueuse avec seulement 10 clous, il a été possible de procéder au développement d'outils permettant d'identifier et de quantifier les sources de bruit des cloueuses. Pour avoir une vue synthétique globale de l'origine du rayonnement acoustique d'une cloueuse, trois grandes sources de bruit ont été définies sur la base des mécanismes de génération et des surfaces de rayonnement :

- (i) le bruit d'échappement généré par la libération brusque dans l'atmosphère de l'air emprisonné dans le cylindre après ouverture de la valve de tête et les effets aéroacoustiques de l'écoulement de l'air à grande vitesse dans le conduit d'échappement; le rayonnement se faisant principalement par l'orifice d'échappement.
- (ii) le rayonnement du corps de la cloueuse. Le corps de la cloueuse est mis en vibrations par les multiples forces internes dynamiques associées au processus de clouage, dont les fluctuations de pression et les chocs de l'équipement mobile.
- (iii) le rayonnement de la pièce travaillée. Cette pièce travaillée est soumise à des vibrations par les forces dynamiques de l'enfoncement du clou.

Une autre source de bruit, qui n'est pas inhérente au processus réel, mais qui est à considérer dans les tests en laboratoire sans sujet humain, est le rayonnement du DSO et de sa structure. Cette source est à considérer dans le but de vérifier que sa contribution reste négligeable par rapport aux autres sources.

Le premier outil utilisé pour quantifier les sources consiste au masquage des sources par encoffrement et/ou usage d'un silencieux (section 8.1). Le deuxième outil utilisé est l'imagerie acoustique, présenté à la section 8.2. Pour ce faire, une antenne acoustique de 41 microphones a été développée. A la section 8.3, une démonstration de l'effet du rayonnement de la pièce travaillée est présentée et finalement, une caméra haute vitesse a été utilisée pour déterminer la vitesse d'enfoncement d'un clou (section 8.4).

### 8.1 Encoffrement partiel et silencieux

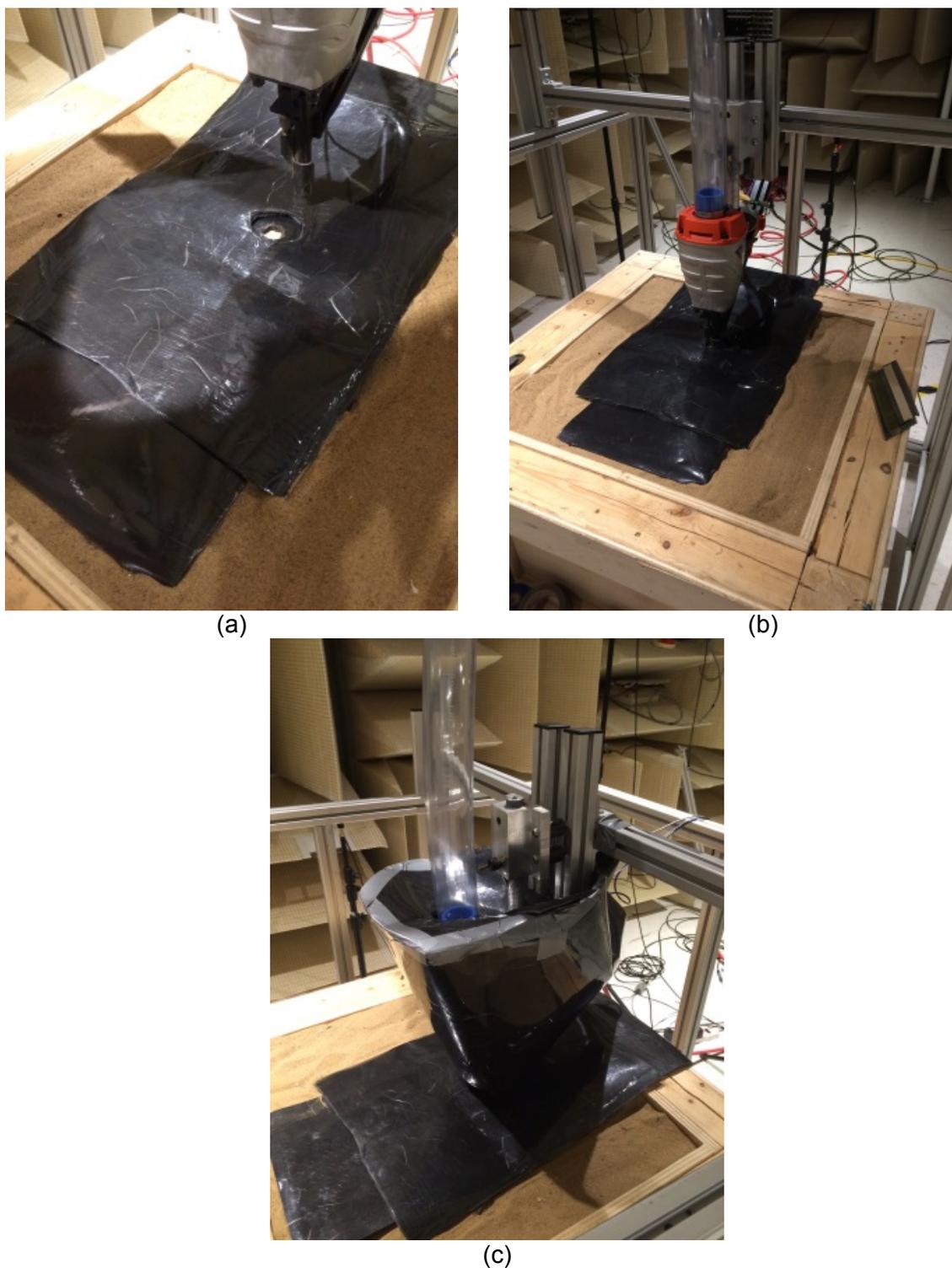
Pour identifier la position des sources acoustiques sur les cloueuses, une méthode d'encoffrement a été utilisée. Cette méthode repose sur une connaissance *a priori* de la position des sources qu'il faut isoler pour ainsi déterminer la contribution des sources restantes. L'avantage de cette méthode réside dans sa simplicité de mise en place, car aucune méthode de traitement du signal n'est requise. Il suffit simplement d'encoffrer les sources présumées. Cependant, l'encoffrement ajoute de la masse au système étudié et donc modifie son fonctionnement, ce qui en constitue l'inconvénient le plus notable.

Pour cette caractérisation des sources de bruit, la cloueuse pneumatique PB3 a été choisie, car son comportement est reproductible avec le DSO et ses statistiques acoustique et vibratoire se situent dans la moyenne par rapport à celles des autres cloueuses.

Comme mentionné au préalable, la méthode d'encoffrement nécessite une connaissance *a priori* des sources acoustiques principales de la cloueuse. Ici, les trois sources retenues sont l'échappement d'air de la cloueuse, le corps de la cloueuse et la pièce de bois, appelée pièce travaillée (Tableau 15). La Figure 21 montre des photographies des moyens utilisés pour encoffrer les différentes sources acoustiques de la cloueuse. Pour supprimer le bruit de la pièce travaillée, deux feuilles de matériaux absorbants (Barymat, AcoustiGuard™) ont été déposées sur celle-ci (Figure 21a). L'échappement d'air est également considéré comme une source principale. Pour s'affranchir de sa contribution, un adaptateur a été conçu, permettant de fixer un tuyau flexible (silencieux) à l'échappement, afin de déporter l'écoulement d'air hors de la zone de mesure (Figure 21b). Finalement la dernière source, soit le corps de la cloueuse, a été encoffrée avec un matériau de type Barymat (Figure 21c).

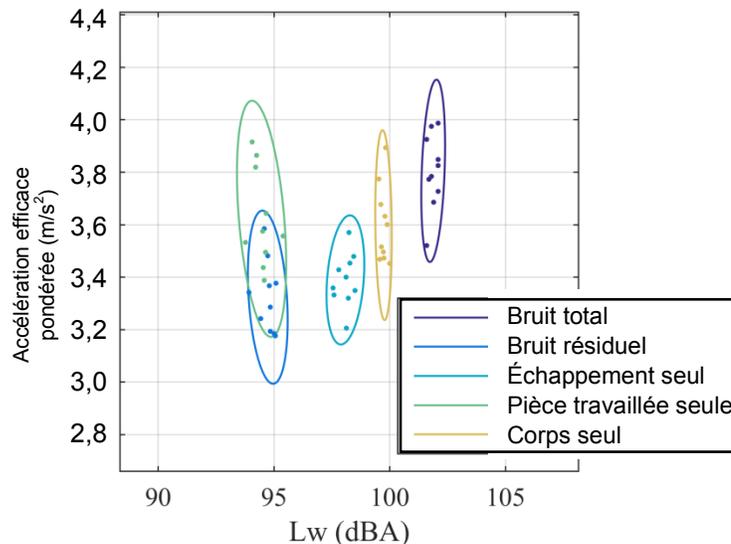
**Tableau 15 Description des différents essais d'encoffrement avec la cloueuse PB3**

Essai	Barymat recouvrant la pièce travaillée	Utilisation d'un silencieux	Encoffrement du corps de la cloueuse	Type de bruit
1	NON	NON	NON	Bruit total
2	OUI	OUI	OUI	Bruit résiduel
3	OUI	NON	OUI	Bruit de l'échappement
4	NON	OUI	OUI	Bruit de la pièce travaillée
5	OUI	OUI	NON	Bruit du corps de la cloueuse



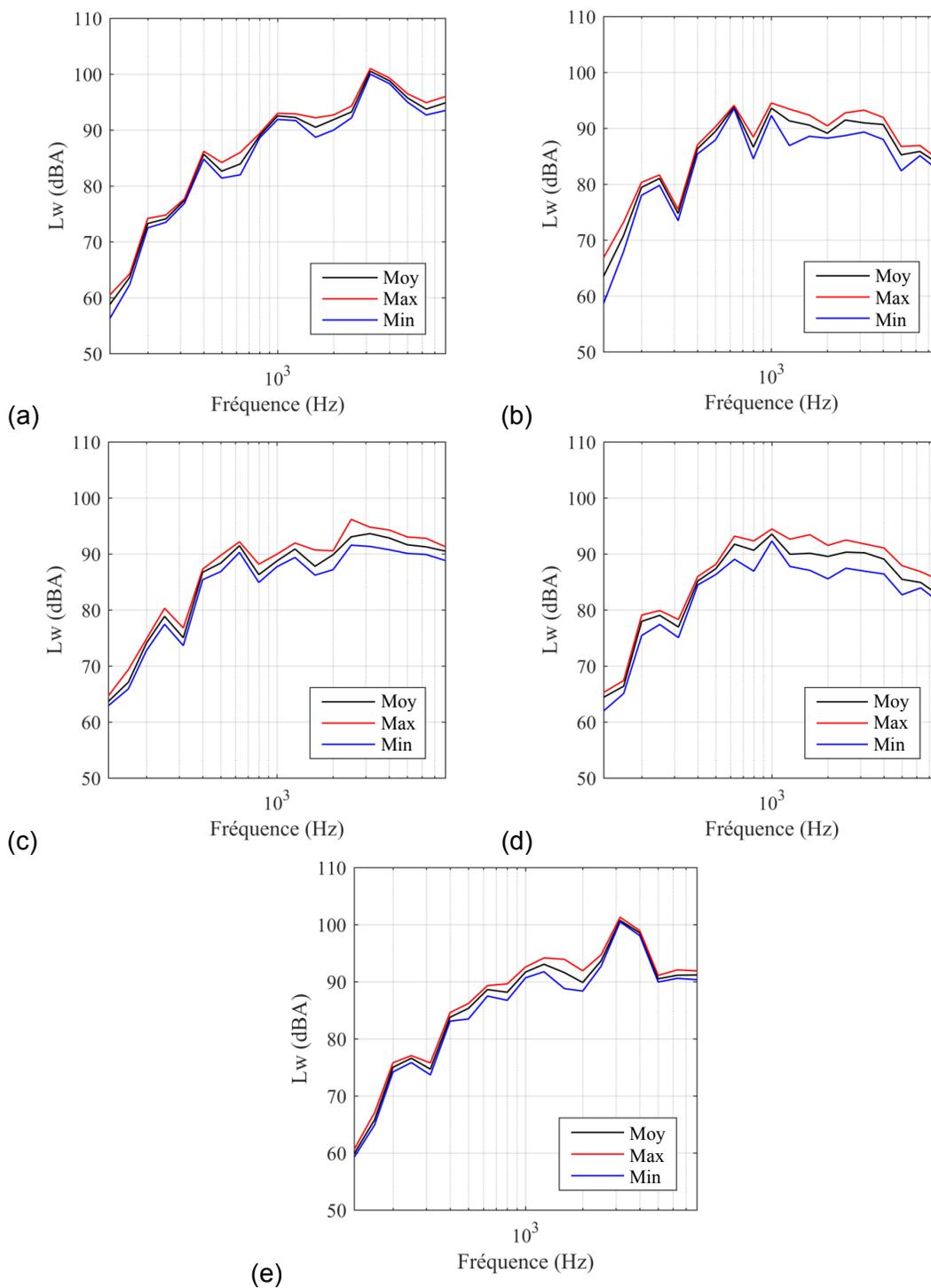
**Figure 21** Photographies des moyens d'encoffrement partiel : (a) Barymat sur la pièce travaillée, (b) extraction du silencieux et (c) encoffrement de la cloueuse

Avant d'analyser les performances de chaque encoffrement, les statistiques acoustique et vibratoire de la cloueuse ont été compilées. La méthode utilisée est similaire à celle utilisée au chapitre précédent. Dix clous sont enfoncés et les valeurs de la puissance acoustique en dBA et de l'accélération efficace pondérée  $Wh$  sont mesurées. La Figure 22 présente le résultat obtenu pour les 5 essais décrit dans le Tableau 15. Les niveaux de puissance acoustique sont les plus élevés pour la cloueuse sans encoffrement, comme attendu. Quand la cloueuse est totalement encoffrée (bruit résiduel), le niveau de puissance acoustique est le plus faible. Cependant, les niveaux obtenus pour le bruit de la pièce travaillée encoffrée ou non sont similaires. Par conséquent, cette première analyse permet de conclure que le rayonnement de la pièce travaillée est faible par rapport à celui des autres sources. Ce résultat est d'autant plus logique que la pièce travaillée est enfouie dans le sable pour limiter son rayonnement acoustique. Au vu des résultats, la source la plus bruyante est le corps de la cloueuse, car les niveaux de puissance acoustique obtenus sont similaires à ceux émis par la cloueuse non encoffrée. Les niveaux de puissance obtenus pour l'échappement d'air se situent entre le bruit de la cloueuse et le bruit résiduel. L'encoffrement ajoute de la masse à la cloueuse, c'est la raison pour laquelle le niveau d'accélération efficace pondérée diminue par rapport à une cloueuse qui n'a pas été encoffrée.



**Figure 22** Accélération efficace pondérée en fonction du niveau de puissance acoustique

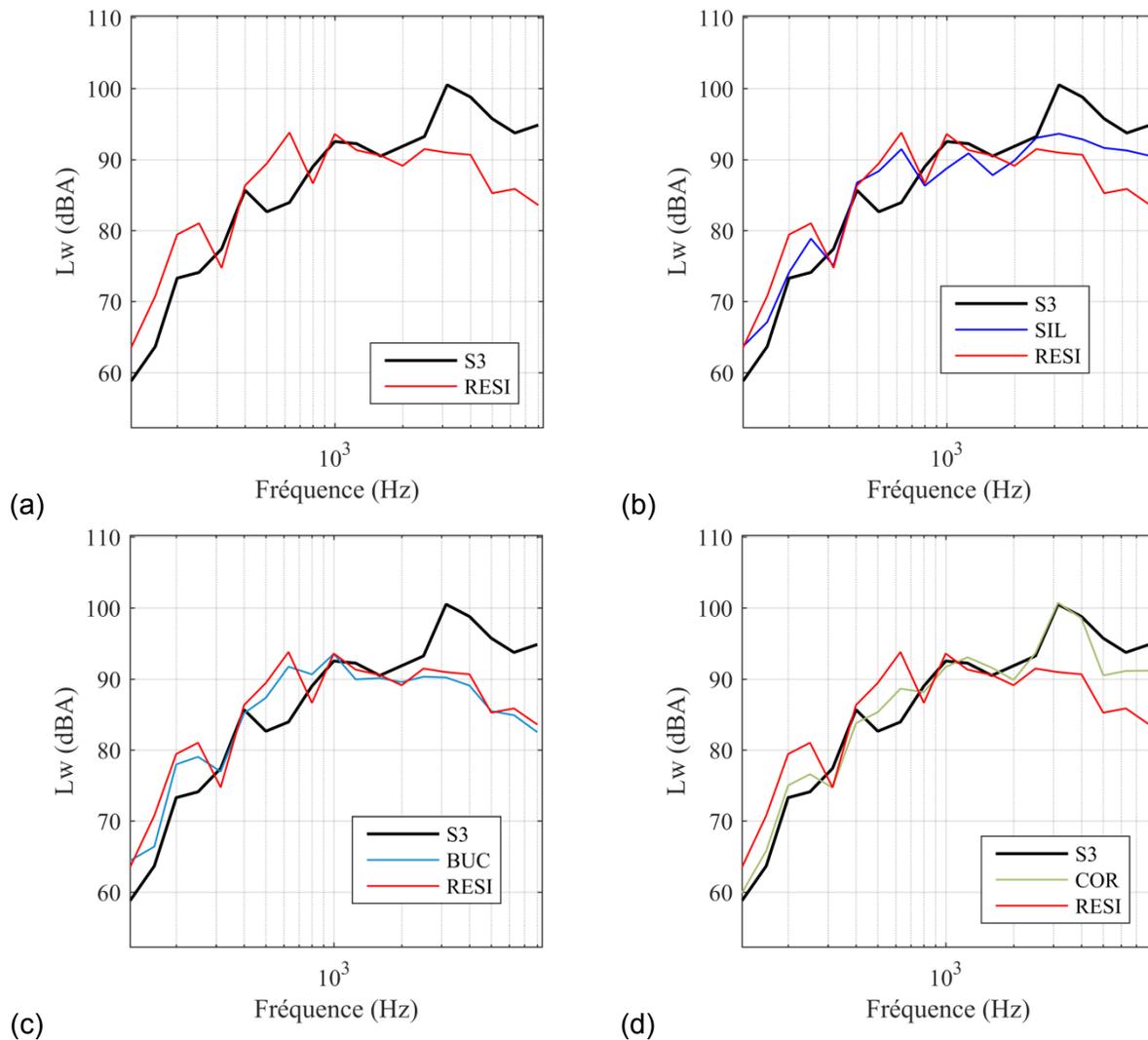
Cette première analyse a mis en évidence le rôle important du rayonnement du corps de la cloueuse et de l'échappement d'air. Pour approfondir cette analyse, les spectres de puissance acoustique en tiers d'octave ont été tracés à la Figure 23. Dix clous ont été enfoncés pour chaque cas, les spectres de puissance acoustique ont donc été moyennés sur ces 10 essais; les valeurs minimum et maximum sont également présentées. Pour le bruit total de la cloueuse (sans traitement), la variation de la moyenne entre le minimum et le maximum est très faible, de l'ordre de quelques dBA (Figure 23a). Le même résultat est observé pour le bruit du corps de la cloueuse (Figure 23e). Les trois autres configurations affichent des variations pouvant presque atteindre 10 dBA, notamment pour les hautes fréquences.



**Figure 23** Spectre de puissance acoustique en tiers d'octave pour la clouuse PB3 : (a) sans traitement, (b) bruit résiduel, (c) bruit de l'échappement d'air, (d) bruit de la pièce travaillée et (e) bruit du corps de la clouuse

Ces résultats indiquent que la technique d'encoffrement du corps de la cloueuse ne présente pas une répétabilité aussi bonne que les autres techniques (silencieux et Barymat sur la pièce travaillée). Ainsi, il est aisé de comprendre que le défi de cette méthode réside dans la qualité de l'installation des encoffrements.

Finalement le spectre de la puissance acoustique de la cloueuse sans aucun encoffrement est comparé avec le spectre de la puissance acoustique obtenu pour chaque type d'encoffrement (Figure 24). Le spectre du bruit résiduel montre clairement l'efficacité des différents encoffrements; le niveau acoustique est clairement réduit pour les hautes fréquences. Le niveau de puissance acoustique diminue de 10 dBA au-delà de 3 kHz. Le spectre du bruit de la pièce travaillée suit la même tendance avec une forte diminution du niveau de puissance pour les hautes fréquences. Le bruit de l'échappement d'air émet également des hautes fréquences, mais la diminution du niveau est moindre. Finalement, le spectre du bruit du corps de la cloueuse est quasi similaire à celui de la cloueuse seule, alors que seules les très hautes fréquences sont réduites. D'un point de vue global, les encoffrements n'influencent pas le niveau des basses fréquences (en dessous de 1 kHz). Toutefois, un pic apparaît à 600 Hz dès que le corps de la cloueuse est encoffré.



**Figure 24** Comparaison des spectres de puissance acoustique de la cloueuse PB3 (S3) par rapport au (a) bruit résiduel (RESI), (b) bruit de l'échappement d'air (SIL), (c) bruit de la pièce travaillée (BUC) et (d) bruit du corps de la cloueuse (COR)

## 8.2 Imagerie acoustique

Une méthode alternative pour identifier les sources acoustiques de la cloueuse est l'imagerie acoustique. Contrairement à l'encoffrement, cette méthode n'est pas intrusive, c'est-à-dire que le fonctionnement de la cloueuse n'est pas altéré. Le principe est le suivant : un réseau de capteurs (microphones) est placé devant la cloueuse et enregistre le signal acoustique. Ce réseau est communément appelé antenne microphonique. Les positions spatiales des microphones étant différentes, chacun d'eux enregistre le signal avec un certain retard par rapport à ses voisins. Le but de l'imagerie acoustique est de compenser ces retards pour repérer la position de la source.

Différentes méthodes existent, soit dans le domaine fréquentiel ou dans le domaine temporel, ou encore en champ proche ou en champ lointain. Dans le contexte de ce projet, l'équipe de recherche a choisi d'utiliser une technique de formation de faisceaux temporelle. Cette méthode consiste à analyser des segments du signal temporel, ce qui facilite la différenciation des sources. Une méthode fréquentielle aurait nécessité de calculer la densité interspectrale pour chaque paire de microphones. Or, la transformée de Fourier d'une impulsion fournit un spectre large-bande, il aurait donc été difficile de choisir la bonne fréquence à analyser (Padois et Berry, 2015, 2017).

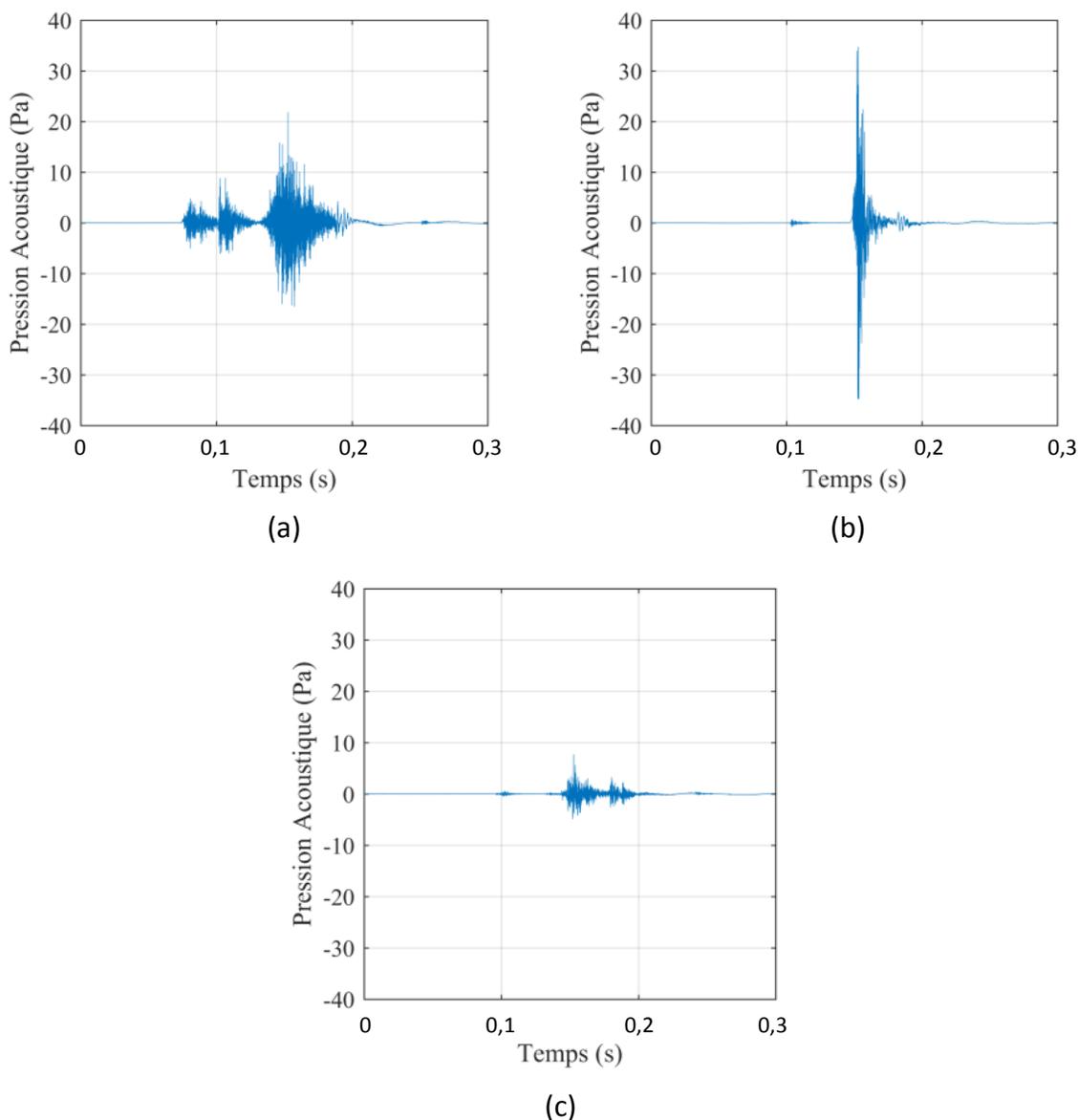
L'antenne utilisée comportait 41 microphones répartis sur 6 bras en spirale. La distance entre l'antenne et la cloueuse a été fixée à 1 m (Figure 25).



**Figure 25** (a) Antenne acoustique et (b) antenne positionnée devant la cloueuse

Pour cette campagne de mesures, trois clouuses ont été testées : PB3, GB1 et EB1. La première étape consistait à analyser les signaux temporels générés par les trois clouuses afin de déterminer quel segment serait utilisé dans le code d'imagerie. Tout d'abord, il est à noter que l'amplitude du signal temporel acoustique est totalement différente pour les trois clouuses (Figure 26). Avec la cloueuse à gaz, l'amplitude maximale du signal atteint plus de 30 Pa, alors qu'elle est inférieure à 10 Pa avec la cloueuse électrique. La cloueuse pneumatique se classe en second avec une amplitude maximale d'environ 20 Pa. La durée du signal est également

différente pour les trois cloueuses. Alors que l'impulsion est brève avec une forte amplitude pour la cloueuse à gaz, la durée du signal pour la cloueuse pneumatique est plus longue avec quatre segments temporels distincts. L'objectif consistait à découper le signal en segments afin de créer les images.

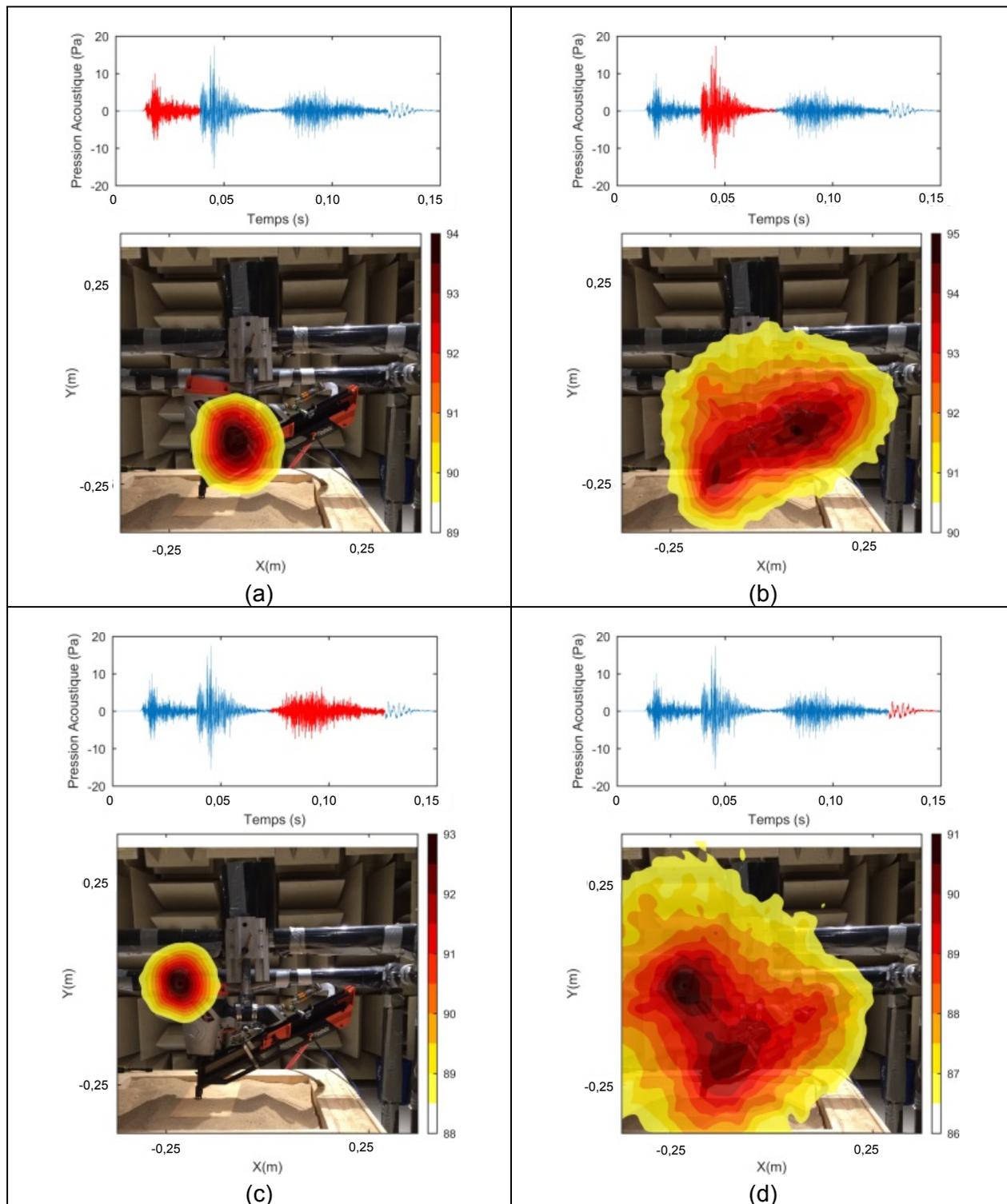


**Figure 26** Signaux temporels pour les cloueuses : a) PB3, b) GB1 et c) EB1

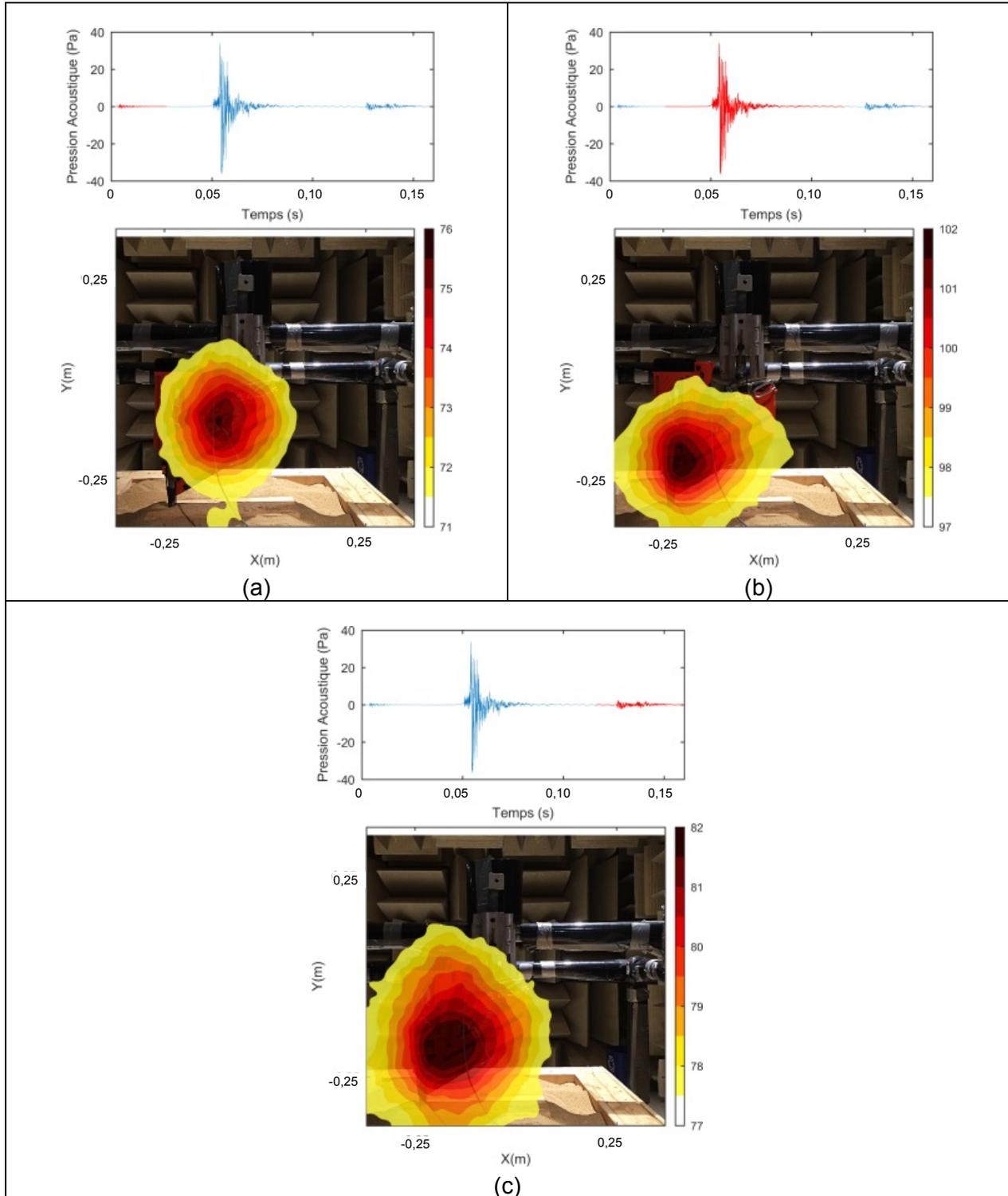
Les cartographies des sources acoustiques pour la cloueuse PB3 sont présentées à la Figure 27. Dans ce cas, quatre segments temporels sont clairement distincts et une image a été produite pour chacun d'eux. Le premier segment correspond au déclenchement de la gâchette et à l'ouverture du réseau d'air comprimé. Le second segment correspond à l'impact et au rayonnement du corps de la cloueuse. Finalement, les deux derniers segments correspondent à l'échappement d'air. Il est noté que la fin du signal temporel ressemble à une sinusoïde mettant en jeu la sortie d'air et le corps de la cloueuse. À ce moment-là, le piston remonte pour fermer le circuit d'air. Il est donc possible que la fermeture du circuit crée une vibration qui se propage dans la cloueuse.

Les cartographies des sources acoustiques de la cloueuse à gaz sont présentées à la Figure 28. Le signal temporel ne présente que trois parties distinctes, dont une avec une amplitude très grande. Le premier segment correspond au déclenchement de la gâchette. Il est noté que l'amplitude est inférieure à celle de la cloueuse pneumatique, car il n'y a pas d'ouverture de circuit d'air. Puis, le segment principal correspond à l'impact dont l'énergie est très grande. Finalement, le dernier segment semble correspondre à une vibration du corps de la cloueuse.

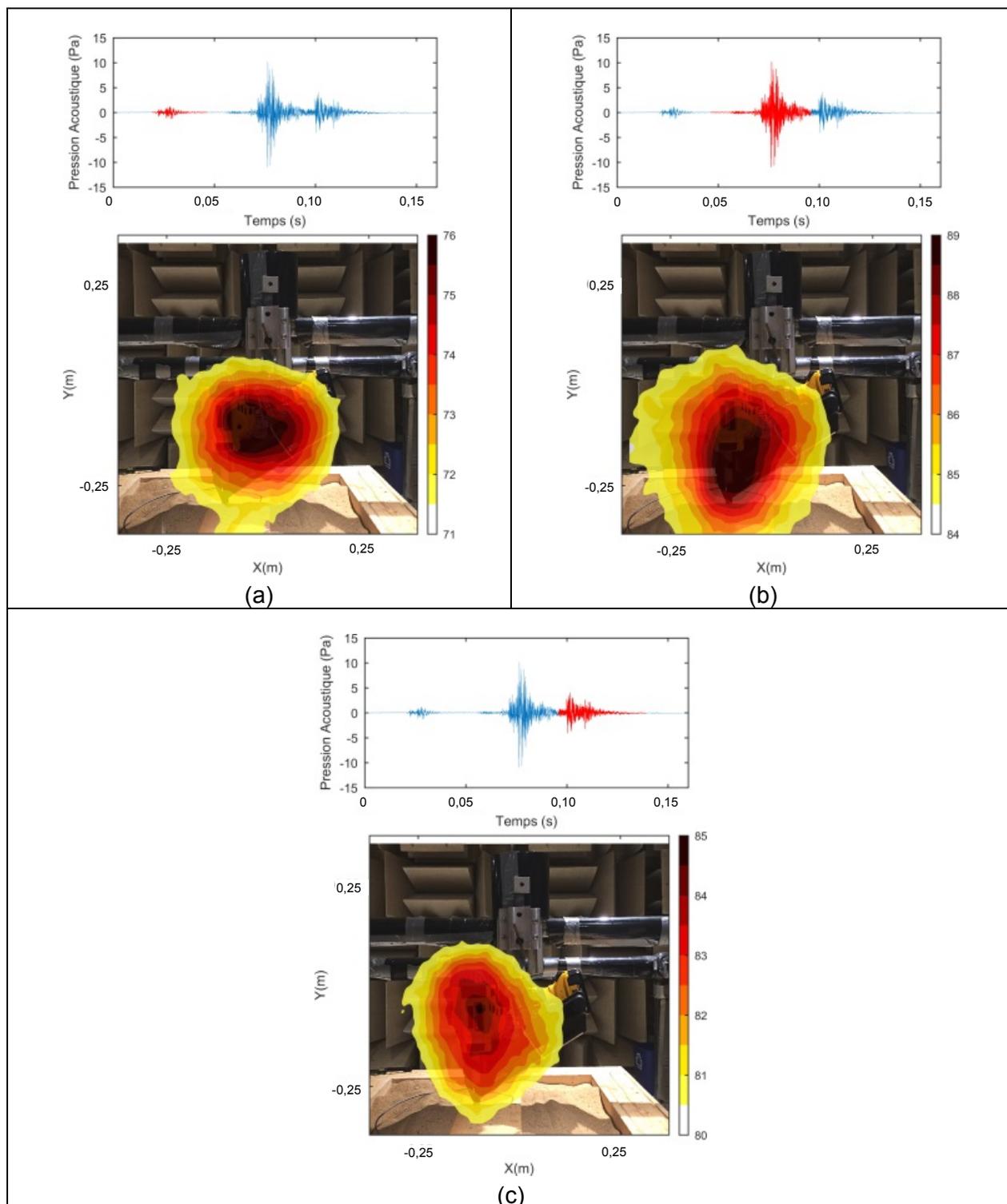
Les cartographies des sources acoustiques de la cloueuse électrique EB1 sont présentées à la Figure 29. Le signal temporel présente trois parties distinctes. La première partie correspond au déclenchement de la gâchette. Cependant, la tâche principale est plus étendue, car le volant d'inertie situé dans la tête de la cloueuse rayonne également. Puis, le second segment correspond à l'impact. La cartographie des sources montre clairement un rayonnement de tout le corps de la cloueuse. Finalement, le dernier segment correspond au volant d'inertie dans la tête de la cloueuse.



**Figure 27** Cartographie des sources acoustiques de la cloueuse pneumatique PB3 à 4 instants différents. Les barres de couleur représentent le niveau de pression acoustique en dBA



**Figure 28** Cartographie des sources acoustiques de la cloueuse à gaz GB1 à 3 instants différents. Les barres de couleur représentent le niveau de pression acoustique en dBA



**Figure 29** Cartographie des sources acoustiques de la cloueuse électrique EB1 à 3 instants différents. Les barres de couleur représentent le niveau de pression acoustique en dBA

Cette analyse de la cartographie des sources acoustiques a permis de mettre en évidence le fonctionnement des clouuses. De plus, il a été possible d'identifier les zones rayonnant le plus d'énergie acoustique. Ainsi, pour réduire le bruit de la clouuse pneumatique PB3, il suffirait d'ajouter un silencieux pour réduire l'amplitude du dernier segment temporel. L'impact créant également une vibration du corps de la clouuse, il serait intéressant de modifier cette partie de l'outil, en y ajoutant des matériaux absorbants, par exemple. La clouuse à gaz GB1 générant du bruit seulement lors de l'impact, il serait approprié de mieux encoffrer cette partie. La clouuse électrique EB1 génère du bruit à trois instants différents : mise en route de la roue d'inertie, impact et retour de la roue d'inertie. Outre l'encoffrement pour réduire le bruit d'impact, la réduction de la contribution de la roue d'inertie à l'émission du bruit serait une avenue intéressante à envisager.

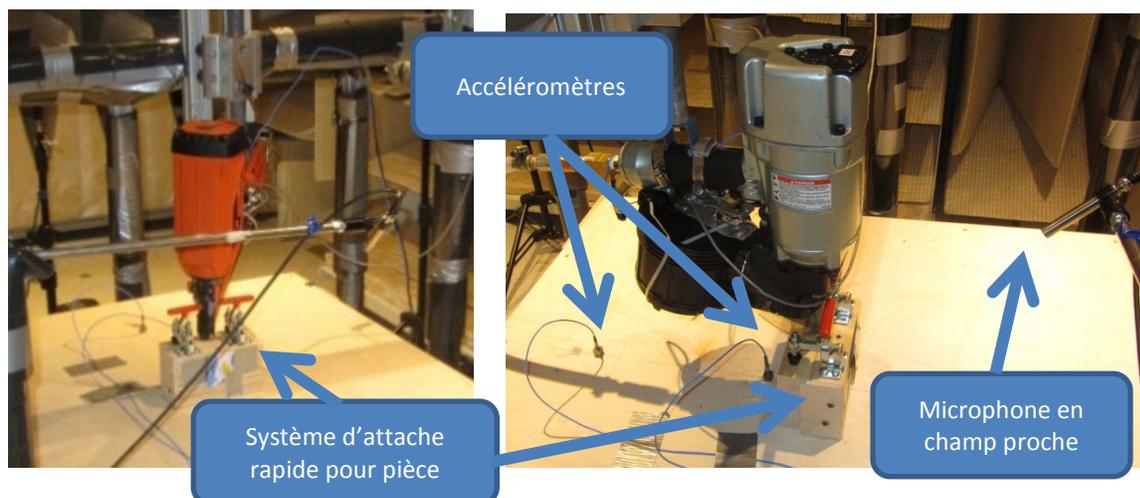
### **8.3 Influence du rayonnement de la pièce travaillée**

Comme les pièces travaillées qu'utilisent les travailleurs de la construction ne sont jamais isolées dans un bac de sable comme c'est le cas pour le banc de mesures normalisées (BMN), il est important de connaître la contribution du rayonnement de ces pièces sur le plan de la puissance sonore. Aussi, comme la pièce travaillée par un travailleur de la construction change constamment, l'approche utilisant un montage de type « pire cas » a été privilégiée. La présente section présente la description du banc de test appelé « banc rayonnant », suivi de la comparaison des accélérations et des puissances acoustiques avec les mesures du banc de sable (DSO). Finalement, une estimation du rayonnement du banc rayonnant est proposée ainsi qu'un retour sur les mesures terrains (celles présentées au chapitre 1), afin d'estimer le rayonnement de la structure travaillée lors des mesures en chantier.

#### **8.3.1 Description du banc de test rayonnant**

Le banc rayonnant (Figure 30) a été fabriqué de matériaux de construction usuels. La structure est inspirée des normes de construction nord-américaines et utilise un contreplaqué de 900 mm x 800 mm et de 12 mm d'épaisseur, dont le cadrage est en bois de charpente de 50 mm x 100 mm.

La pièce dans laquelle le clou est enfoncé est en bois de pin clair séché et sans nœud et de 50 mm x 100 mm x 150 mm qui est tenue en place par un système d'attache rapide constitué de deux pinces à bascule. Pour chaque clou enfoncé, une nouvelle pièce de bois a été utilisée afin d'être en mesure de toujours planter le clou au même endroit par rapport à la pièce, ainsi que par rapport au banc lui-même.



**Figure 30 Description des composantes du banc rayonnant**

L'excitation se produisant toujours au même endroit sur le banc d'essai, les vibrations auxquelles le contreplaqué a été exposé étaient comparables d'un impact à l'autre. Pour mesurer la vibration de la plaque, deux accéléromètres ont été installés sur le contreplaqué. Le premier a été fixé à 38 mm du bas de la pièce travaillée et centré sur la largeur du banc. Le deuxième accéléromètre a été placé à 229 mm du premier sur le même axe. Ces deux accéléromètres s'ajoutaient à l'accéléromètre triaxial de la cloueuse ainsi qu'aux 9 microphones, pour la mesure de puissance acoustique. Un microphone en champ proche a aussi été ajouté.

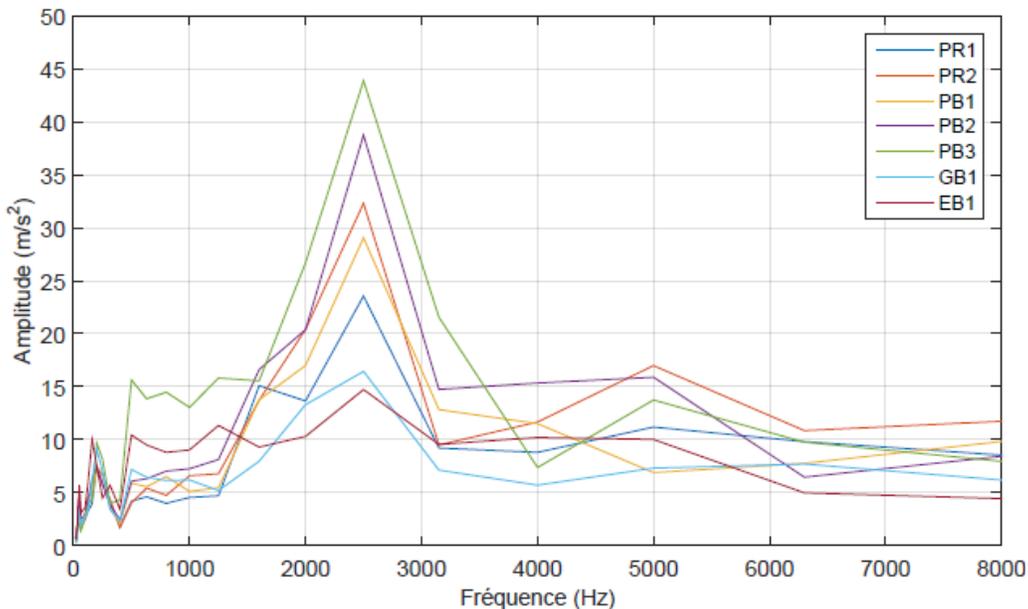
### **8.3.2 Comparaison des accélérations avec le banc de sable**

Le Tableau 16 est divisé en trois sections dont celles de gauche et du centre présentent le classement des cloueuses selon l'accélération globale pondérée pour des séries de mesures réalisées avec le DSO sur le banc rayonnant (gauche) et sur le banc de sable (centre). La section de droite présente, dans le même ordre de classement que le banc rayonnant, la différence arithmétique entre les résultats du banc rayonnant et ceux du banc de sable. On constate que l'accélération entre les 2 bancs ne varie que très peu ( $< 0,4 \text{ m/s}^2$ ). Ce résultat permet d'avancer l'hypothèse selon laquelle la cloueuse réagit de la même manière sur le banc rayonnant que sur le banc de sable. En d'autres mots, le travailleur ne peut ressentir, avec sa main, la différence de vibrations entre une pièce très rayonnante et une qui l'est moins.

**Tableau 16** Comparaison des accélérations pondérées pour le DSO, par ordre croissant, entre les mesures sur le banc rayonnant et celles sur le banc de sable

Accélération banc rayonnant		Accélération banc de sable		Différence $a_{hw,3s}$ (rayonnant - sable)	
Cloueuse	$a_{hw,3s}$ (m/s <sup>2</sup> )	Cloueuse	$a_{hw,3s}$ (m/s <sup>2</sup> )	Cloueuse	$a_{hw,3s}$ (m/s <sup>2</sup> )
EB1	3,7	PB3	3,8	EB1	-0,3
PB3	3,8	EB1	4,0	PB3	0,0
GB1	3,9	PR2	4,1	GB1	-0,4
PR2	4,1	GB1	4,3	PR2	0,1
PB2	4,2	PB2	4,5	PB2	-0,4
PR1	4,8	PR1	4,8	PR1	0,0
PB1	5,6	PB1	5,7	PB1	0,0

Si les accélérations ne changent pas selon le rayonnement de la pièce travaillée, le niveau de puissance acoustique, lui, augmentera nécessairement en fonction de la hausse de ce rayonnement. La Figure 31 présente le spectre de l'accélération mesurée avec le 2<sup>e</sup> accéléromètre (celui le plus loin de la pièce travaillée) sur le banc rayonnant. La vibration est largement dominée par un pic à 2500 Hz. Il est à noter que le niveau maximum de 2500 Hz est plus dominant sur l'accéléromètre loin de la pièce que sur celui près de la pièce (1<sup>er</sup> accéléromètre, non illustré). Cela pourrait présumer que la fréquence critique de la table est inférieure à 2500 Hz et ainsi expliquer un rayonnement acoustique élevé à cette fréquence de résonance de la table.

**Figure 31** Spectre de l'accélération mesurée (accéléromètre 2) sur la table du banc rayonnant

### 8.3.3 Comparaison des puissances acoustiques avec le banc de sable

Le Tableau 17 compare les niveaux de puissance acoustique entre le banc rayonnant et le banc de sable. On remarque que toutes les valeurs dans la section des différences (colonne de droite) entre le banc rayonnant et le banc de sable sont positives. Cela signifie que le niveau de puissance acoustique total du banc rayonnant était toujours plus élevé que les mesures prises avec le banc de sable. Ce résultat est cohérent puisqu'en ayant ajouté une source importante comme le rayonnement de la table provenant du banc rayonnant, le niveau global a nécessairement augmenté.

**Tableau 17 Classement des cloueuses selon le niveau de puissance acoustique pour les mesures avec le DSO sur le banc rayonnant et sur le banc de sable**

L <sub>w</sub> avec le banc rayonnant		L <sub>w</sub> avec le banc de sable		Différence L <sub>w</sub> (rayonnant - sable)	
Cloueuse	L <sub>w</sub> (dBA)	Cloueuse	L <sub>w</sub> (dBA)	Cloueuse	L <sub>w</sub> (dBA)
EB1	104,9	EB1	95,5	EB1	9,3
PR2	105,9	PR2	100,9	PR2	5,0
PB2	106,6	PB2	101,8	PB2	4,7
PB1	106,7	PB3	102,2	PB1	2,6
PR1	107,0	PR1	104,0	PR1	3,1
PB3	108,5	PB1	104,1	PB3	6,3
GB1	109,4	GB1	106,5	GB1	2,9

### 8.3.4 Estimation de la puissance acoustique rayonnée par la table

En se basant sur le fait que l'accélération ne varie que très peu en fonction du rayonnement de la pièce travaillée (sous-section 8.3.2) et que le rayonnement de la pièce dans le bac de sable est négligeable (section 8.1), l'hypothèse suivante est formulée :

$$L'w_{table\ banc\ rayonnant} = 10 \log_{10} \left( \frac{W_{banc\ rayonnant} - W_{banc\ de\ sable}}{10^{-12}} \right) \quad (12)$$

où l'apostrophe (') indique qu'il s'agit d'une estimation (par exemple :  $L'w$  renvoie une valeur estimée de  $L_w$ ) et  $W$  désigne la puissance (en Watts),

avec :

$$Lw_{banc\ de\ sable} = 10 \log_{10} \left( \frac{W_{banc\ de\ sable}}{10^{-12}} \right) \quad (13)$$

et :

$$Lw_{banc\ rayonnant} = 10 \log_{10} \left( \frac{W_{banc\ rayonnant}}{10^{-12}} \right) \quad (14)$$

Le Tableau 18 présente les valeurs estimées du rayonnement provenant de la table du banc rayonnant en utilisant la soustraction énergétique (équation 12). La cloueuse électrique ainsi que toutes les cloueuses pneumatiques, sauf la PB3, affichent des valeurs très semblables (allant de 103,2 à 104,8 dBA). Seules les cloueuses PB3 (pneumatique) et GB1 (au gaz) ont des valeurs de 2-3 dBA au-dessus des valeurs des autres cloueuses.

**Tableau 18 Valeurs estimées du niveau de la puissance acoustique du rayonnement de la table du banc rayonnant ( $L'_w$  table), par soustraction énergétique**

Cloueuse	$L_w$ rayonnant (dBA) (puissance du banc rayonnant)	$L_w$ sable (dBA) (puissance du banc de sable)	Différence (dBA) ( $L_w$ rayonnant - $L_w$ sable)	$L'_w$ table (dBA) (estimation de $L_w$ par soustraction énergétique)	$L'_w$ table MAX ( $\pm 1$ ) (dBA) ( $L_w$ rayon. +1) et ( $L_w$ sable -1)	$L'_w$ table MIN ( $\pm 1$ ) (dBA) ( $L_w$ rayon. -1) et ( $L_w$ sable +1)	$L'_w$ table MAX - $L'_w$ table MIN (dBA)
EB1	104,9	95,5	9,3	104,3	105,6	103,0	-2,6
PR2	105,9	100,9	5,0	104,2	105,9	101,8	-4,1
PB2	106,6	101,8	4,7	104,8	106,5	102,2	-4,3
PB1	106,7	104,1	2,6	103,2	105,8	96,6	-9,2
PR1	107,0	104,0	3,1	104,1	106,4	99,4	-7,0
PB3	108,5	102,2	6,3	107,3	108,8	105,5	-3,3
GB1	109,4	106,5	2,9	106,3	108,7	101,3	-7,4

Pour utiliser la soustraction énergétique, il est d'usage d'avoir au moins 3 dBA de différence entre le signal total et le signal soustrait. Ce résultat figure dans la 4<sup>e</sup> colonne du tableau et les différences varient entre 2,6 et 9,3 dBA. Trois cloueuses présentent des différences inférieures ou proches de 3 dBA, soit la PB1 (2,6 dBA), GB1 (2,9 dBA) et PR1 (3,1 dBA). Il est donc attendu que la valeur estimée de ces 3 cloueuses soit moins fiable que la valeur des cloueuses dont la différence est plus grande. Pour évaluer la fiabilité des mesures, une analyse de sensibilité utilisant une variabilité de  $\pm 1$  dBA a été réalisée sur la moyenne des impacts. La variabilité de  $\pm 1$  dBA équivaut aux valeurs établies lors de l'analyse de variabilité du DSO. Les résultats montrent que pour ces trois cloueuses, la différence entre le minimum et le maximum de  $L'_w$  table est beaucoup plus grand que pour les autres cloueuses. Les résultats montrent que des valeurs atteignant 107 dBA pour la cloueuse PB3 sont probables [105,5 – 108,8 dBA], même si elles sont plus élevées que la moyenne des autres cloueuses, qui se situe plus autour de 104,5 dBA. Enfin, ces résultats indiquent que toutes les cloueuses testées excitent la pièce travaillée de la même façon.

En conclusion, la différenciation des cloueuses ne vient pas de la pièce travaillée, mais du bruit généré par la cloueuse elle-même. Pour l'instant, les résultats confirment que le DSO avec le bac de sable permet de qualifier les cloueuses. Par contre, advenant l'avènement de nouvelles technologies qui changeraient la réponse vibratoire de la pièce travaillée, l'évaluation des cloueuses devrait alors passer par un test qui inclurait le rayonnement de cette pièce.

### 8.3.5 Estimation de la puissance acoustique rayonnée par les structures terrains

Dans la section 5.4, le Tableau 3 présente les résultats du niveau d'exposition ( $L_p$ ) mesuré lors des tests terrains effectués dans le cadre du projet. Ces mesures n'étant pas directement comparables avec les mesures de puissance acoustique ( $L_w$ ) réalisées en laboratoire, les niveaux de puissance acoustique ont été estimés à partir des niveaux de bruit du Tableau 3 en utilisant l'approche décrite au 1<sup>er</sup> paragraphe de la section 6.2. Le Tableau 19 présente les valeurs de puissance acoustique estimées pour les mesures terrains prises avec les cloueuses de charpentes, tandis que le Tableau 20 présente ces mêmes valeurs pour les cloueuses de toitures.

**Tableau 19 Valeurs estimées de la puissance acoustique du rayonnement de la charpente ( $L'_w$  charpente), par soustraction énergétique ( $W_{terrain} - W_{BMN}$ )**

Cloueuse	$L'_w$ terrain (dBA) (estimée à partir du niveau d'exposition)	$L_w$ BMN (dBA)	Différence (dBA) ( $L'_w$ terrain - $L_w$ BMN)	$L'_w$ charpente (dBA) (estimation du $L_w$ de la pièce travaillée)	$L'_w$ charpente MAX ( $\pm 1$ ) (dBA) ( $L'_w$ terrain +1) et ( $L_w$ BMN -1)	$L'_w$ charpente MIN ( $\pm 1$ ) (dBA) ( $L'_w$ terrain -1) et ( $L_w$ BMN+1)	$L'_w$ charpente MAX - $L'_w$ charpente MIN (dBA)
PR1	104,2	105,1	-0,9		98,7		
PR2	104,4	101,7	2,7	101,1	103,6	95,2	8,4
PB2	106,1	102,6	3,5	103,5	105,7	99,8	5,9
PB3	104,7	103,0	1,6	99,6	103,2		
GB1	105,7	107,1	-1,4		97,8		
EB1	97,7	95,6	2,1	93,5	96,5	80,1	16,4

**Tableau 20 Valeurs estimées de la puissance acoustique du rayonnement de la toiture ( $L'_w$  toiture), par soustraction énergétique ( $W_{terrain} - W_{BMN}$ )**

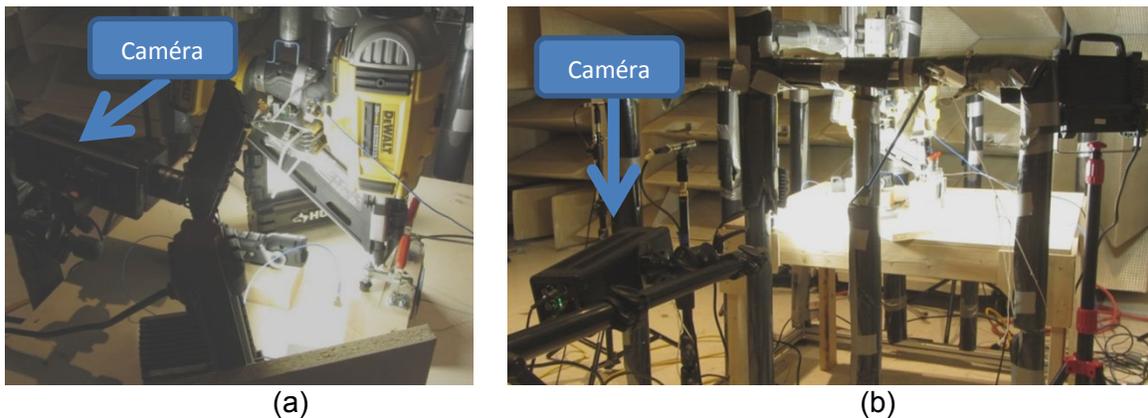
Cloueuse	$L'_w$ terrain (dBA) (estimée à partir du niveau d'exposition)	$L_w$ BMN (dBA)	Différence (dBA) ( $L'_w$ terrain - $L_w$ BMN)	$L'_w$ toiture (dBA) (estimation du $L_w$ de la pièce travaillée)	$L'_w$ toiture MAX ( $\pm 1$ ) (dBA) ( $L'_w$ terrain +1) et ( $L_w$ BMN -1)	$L'_w$ toiture MIN ( $\pm 1$ ) (dBA) ( $L'_w$ terrain -1) et ( $L_w$ BMN +1)	$L'_w$ toiture MAX - $L'_w$ toiture MIN (dBA)
PB1	101,3	99,7	1,6	96,2	99,8		
PB2	99,5	97,9	1,6	94,4	98,0		

La forme des Tableaux 19 et 20 du Tableau 20 est identique à celle du Tableau 18. La 4<sup>e</sup> colonne indique la différence arithmétique entre le niveau de puissance acoustique estimé sur le terrain (2<sup>e</sup> colonne) et le niveau de puissance acoustique du BMN (3<sup>e</sup> colonne). Lorsque les différences (4<sup>e</sup> colonne) sont inférieures à 2 dBA, il ne peut y avoir de valeur minimum (7<sup>e</sup> colonne) de l'analyse de variabilité. Lorsque le niveau estimé sur le terrain est plus faible que le niveau en laboratoire (BMN), la différence est aussi négative et il devient impossible de calculer une valeur estimée du rayonnement de la pièce travaillée. Les cases des valeurs impossibles à établir sont grisées.

Comme il a été démontré que le rayonnement provenant de la cloueuse ne varie pas ou peu en fonction du rayonnement de la pièce travaillée et que le niveau de puissance acoustique obtenu avec le banc rayonnant représente un cas extrême de rayonnement de la pièce travaillée, la valeur estimée de la puissance acoustique lors des mesures terrains (2<sup>e</sup> colonne) devrait être au minimum celle du BMN et au maximum celle de la valeur de puissance obtenue avec le banc rayonnant. Les valeurs négatives des niveaux de puissance entre les mesures terrains et en laboratoire obtenues pour les clouuses PR1 et GB1 ne font que démontrer l'importance de l'incertitude dans l'estimation de la puissance acoustique des mesures prises sur le terrain ( $L'_w$  terrain). Pour les autres clouuses, incluant celles de toiture, la différence est suffisamment petite ( $< 3,5$  dBA) pour indiquer que le rayonnement de la pièce travaillée (charpente et toiture) est moins important que celui du banc rayonnant. En somme, bien que les mesures terrains soient imprécises, on peut conclure que le rayonnement des pièces travaillées contribue à la puissance acoustique totale, mais qu'il n'est pas dominant.

#### 8.4 Caméra haute vitesse

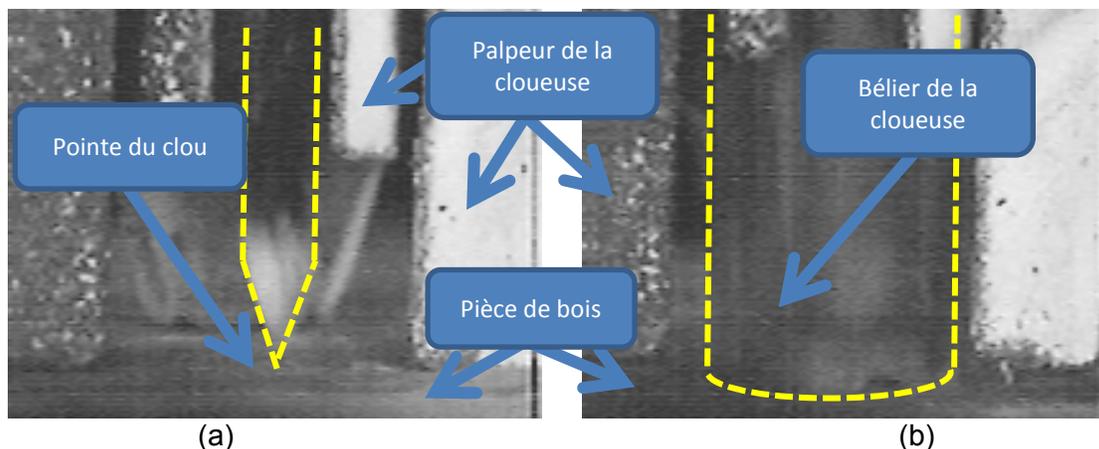
Afin de mieux visualiser les mécanismes liés à l'enfoncement d'un clou, des images ont été échantillonnées avec une caméra haute vitesse (Y5, Integrated Design Tool®). Ces acquisitions ont été réalisées avec le banc rayonnant. La caméra a été utilisée dans 2 positions (Figure 32). La position rapprochée a été utilisée pour bien voir l'enfoncement d'un clou et en mesurer le temps d'enfoncement. Ces résultats sont présentés dans la sous-section 8.4.1. La deuxième position permet de visualiser l'ensemble du mouvement et fait l'objet d'une discussion à la sous-section 8.4.2. Finalement, un travail de synchronisation entre les images de la caméra et les signaux vibratoires a permis de mieux comprendre l'influence de l'enfoncement du clou sur la réponse vibratoire du système (sous-section 8.4.3).



**Figure 32** Caméra haute vitesse : (a) vue rapprochée pour mesurer l'enfoncement d'un clou et (b) vue éloignée pour mesurer le mouvement global de la cloueuse

### 8.4.1 Durée de l'enfoncement d'un clou

Les images échantillonnées avec la caméra rapprochée n'ont été prises qu'avec 2 cloueuses (PB3 et EB1), puisque la plupart d'entre elles n'offrent pas une fenêtre assez grande pour permettre l'observation du clou qui est expulsé par la cloueuse. Il est à noter que le palpeur (pièce mobile qui fait le contact entre la cloueuse et la pièce travaillée) sert aussi à protéger l'utilisateur contre la projection d'un clou qui dévierait de sa trajectoire.



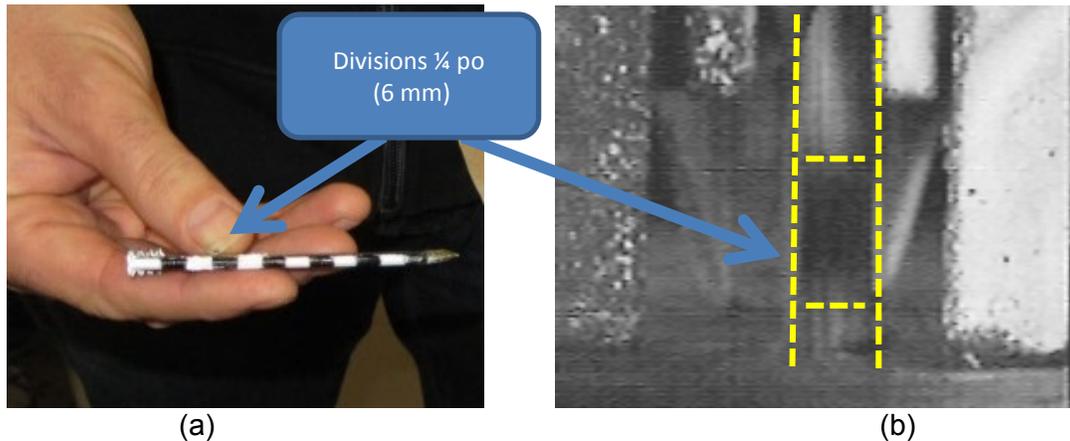
**Figure 33** Caméra haute vitesse (6000 Hz) utilisée pour visualiser l'enfoncement d'un clou de charpente avec la cloueuse PB3 : (a) début et (b) fin

La vitesse d'échantillonnage de la caméra pour ces mesures est de 6000 images par seconde, avec une résolution permettant de bien visualiser le clou dans son environnement. À ces vitesses, la quantité de lumière requise est énorme. Afin d'améliorer le contraste, l'intérieur des palpeurs a été peint en blanc luisant. La fenêtre de vision pour les 2 cloueuses utilisées pour ces mesures se situait à l'arrière de la cloueuse.

Comme présenté sur la Figure 33, il a été possible de déterminer la différence de temps entre l'instant où la pointe du clou touchait la pièce travaillée et l'instant où la tête du clou disparaissait sous le béliet de la cloueuse. Le temps d'enfoncement d'un clou était, pour les 2 cloueuses testées, d'une valeur se situant autour de 4 ms.

Les images échantillonnées avec la caméra haute vitesse ont aussi permis de vérifier si l'enfoncement se faisait à vitesse constante ou si une variation importante de la vitesse était observable. Afin de pouvoir mesurer la distance parcourue entre 2 images ( $1/6000$  s), des clous ont été peints avec des lignes noires et blanches espacées de  $\frac{1}{4}$  po (Figure 34a).

Pour les deux cloueuses, les vitesses, compte tenu de la précision des mesures, peuvent être considérées comme constantes du début à la fin de l'enfoncement. Ainsi, la force requise pour l'enfoncement, qui doit augmenter au fur et à mesure que le clou s'enfonce, ne semble pas agir pour ralentir le mouvement du béliet.



**Figure 34** Caméra haute vitesse (6000 Hz) utilisée pour calculer la vitesse d'enfoncement avec (a) des clous peints par espacements de  $\frac{1}{4}$  po (6 mm) en noir et blanc et (b) une image de la cloueuse PB3 montrant le clou en train de s'enfoncer

#### 8.4.2 Mesures avec vue d'ensemble

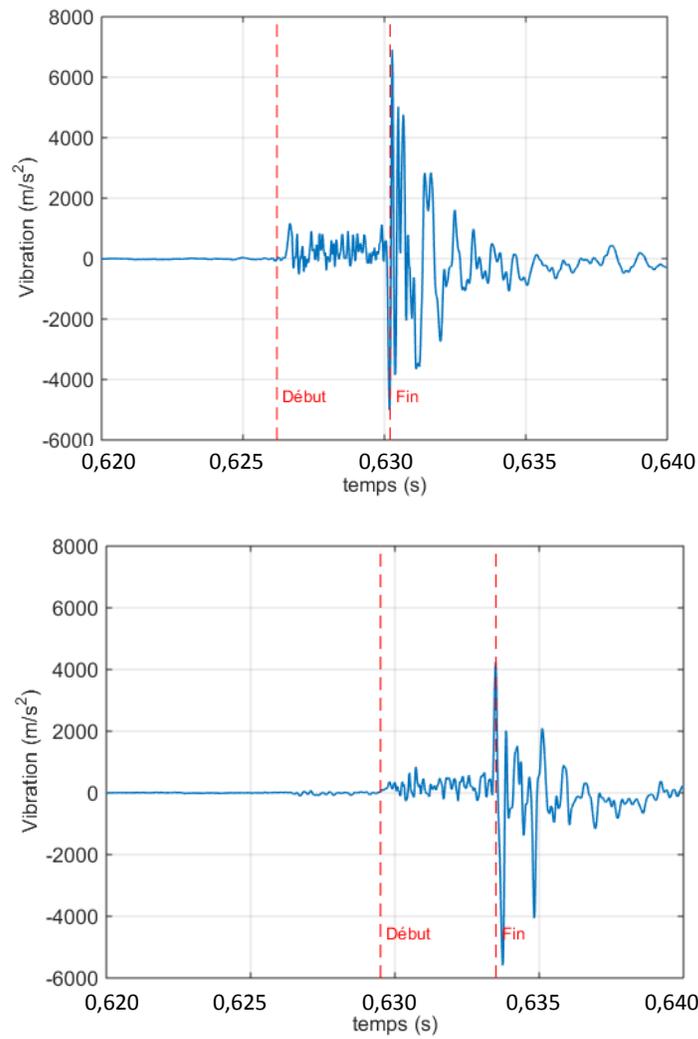
Les images prises avec la caméra en vue éloignée ont permis d'observer l'amplitude de l'effet de recul ainsi que la rotation de la cloueuse. Pour ces acquisitions, afin d'avoir une fenêtre qui inclut l'ensemble de la cloueuse, la vitesse de la caméra avait été fixée à 1000 images par seconde.

A ces vitesses, il était possible de bien visualiser le mouvement de la cloueuse ainsi que celui de la pièce travaillée. De plus, ces observations ont permis de valider que la cloueuse, dans son mouvement de recul, ne venait pas en contact avec la structure du DSO et que les plots n'étaient pas complètement écrasés sous l'effet de la rotation de la cloueuse. Aussi, il a été possible de constater que le système de retenue (main) de la cloueuse se déformait sous la force de l'impact.

#### 8.4.3 Synchronisation des images avec les signaux vibratoires du banc rayonnant

Bien que les processus d'acquisition des signaux vibratoires et des images de la caméra aient été synchronisés, un travail supplémentaire de synchronisation des signaux a dû être effectué en raison du fait que la vitesse de la lumière et celle du son ne sont pas les mêmes. Les deux images de la Figure 35, pour les clouuses EB1 et PB3, montrent, pour des signaux synchronisés, le début et la fin de l'enfoncement (lignes verticales rouges) ainsi que le signal vibratoire de l'accéléromètre 1 (celui le plus près de la pièce travaillée) sur le banc rayonnant.

Le résultat le plus important de cette analyse est de constater à quel point l'enfoncement du clou (durée 4 ms) n'excite que très peu la structure du banc, mais que le niveau de crête des vibrations vient plutôt de l'instant où le bélier arrive en bout de course.



**Figure 35** Synchronisation de la caméra haute vitesse avec le signal vibratoire du banc rayonnant pour les cloueuses EB1 (haut) et PB3 (bas)



## 9. SYNTHÈSE DES SOURCES ET PISTES DE SOLUTION

Le présent chapitre vise à résumer les résultats obtenus au chapitre précédent sur le diagnostic des sources de bruit et de vibration des cloueuses et de présenter des pistes de solution pour la réduction du bruit et des vibrations. Ce chapitre est subdivisé en cinq sections, les trois principales sources de bruit soient le bruit d'échappement (section 9.1), le rayonnement du corps de la cloueuse (section 9.2) et le rayonnement de la pièce travaillée (section 9.3), et deux forces excitatrices que sont le choc du bélier en fin de course (section 9.4) et la quantité d'énergie excédentaire par rapport à celle que nécessite l'enfoncement du clou (section 9.5).

### 9.1 Le bruit d'échappement

Pour les cloueuses pneumatiques, tant pour les mesures d'enclassement que pour celles d'antenne acoustique, il a été démontré que le bruit d'échappement est une des sources principales du bruit. Pour les mesures d'enclassement de la cloueuse PB3, il a été démontré que l'échappement contribuait presque autant à l'émission sonore que le corps de la cloueuse, ces deux sources étant dominantes au niveau du bruit émis par la cloueuse. Ce résultat montre que si le bruit généré par l'échappement était éliminé, cela permettrait de réduire d'environ 3 dBA le rayonnement acoustique de la cloueuse. Or, dans leur version actuelle, les cloueuses pneumatiques utilisées ne possèdent aucun dispositif de réduction des bruits d'échappement.

En ce qui concerne la cloueuse électrique, le fait qu'il n'y ait pas de bruit d'échappement explique le fait que son niveau de bruit est moins élevé que les autres types de cloueuses. Étant donné que la différence avec les autres cloueuses est d'environ 10 dB, soit plus que les 3 dB de la réduction anticipée par l'ajout d'un silencieux efficace, le principe de fonctionnement est certainement aussi à l'origine de sa plus faible émission acoustique et vibratoire. Pour la cloueuse à gaz, le bruit d'échappement n'a pas été identifié comme un contributeur significatif.

Pistes de solution pour les cloueuses pneumatiques :

- (i) Une piste plus complexe, soit une nouvelle conception du mécanisme d'échappement de l'air du cylindre lors de son retour en position haute. Cela nécessiterait une étude du processus de génération du bruit par l'écoulement pour déterminer comment il serait possible de minimiser le rayonnement en modifiant la géométrie du circuit d'échappement de l'air, sans ralentir la remontée du piston;
- (ii) Une piste plus simple, soit l'utilisation d'un silencieux sur l'échappement, piste qui a déjà été explorée dans deux articles (Jayakumar *et al.*, 2015; Tisserand et Triomphe, 2011), mais qui ne semble pas être offerte sur le marché. Cela pourrait être fait soit lors de la conception de la cloueuse, soit sous la forme d'un kit de réduction du bruit adaptable pour chaque modèle de cloueuse.

### 9.2 Le rayonnement du corps de la cloueuse

L'antenne acoustique a permis d'identifier des actions précises qui caractérisent le fonctionnement de la cloueuse et qui sont génératrices de bruit. Ces sources de bruit sont, par exemple, l'entrée d'air dans la cloueuse ou le déplacement du piston, en particulier lors des fins de course. Ces sources de bruit dues aux mécanismes internes de la cloueuse sont transmises

par le rayonnement du corps de la cloueuse. Une stratégie de réduction du bruit consisterait à diminuer le rayonnement acoustique de la surface extérieure de la cloueuse.

Pistes de solutions :

- (i) Pour réduire le bruit, une piste assez complexe consiste à repenser la conception de la cloueuse en y découplant le corps du mécanisme d'enfoncement du clou (piston/bélier);
- (ii) Pour réduire le bruit, une barrière acoustique pourrait être ajoutée pour recouvrir le corps. Cette solution pourrait être installée par le fabricant ou offerte dans un kit de réduction de bruit qui inclurait un silencieux;
- (iii) Pour réduire les vibrations, une poignée qui serait découplée du reste de la cloueuse éviterait de transmettre les vibrations au système main/bras de l'opérateur.

Cependant, il n'existe pas, à notre connaissance, de solution qui n'affecte pas deux autres paramètres très importants de la fonctionnalité d'une cloueuse, soit la masse et la grosseur de la cloueuse.

### **9.3 La pièce travaillée**

Les mesures en laboratoire ont permis de quantifier la contribution acoustique de la pièce travaillée. En fonction du niveau de bruit produit par les clouuses, le rayonnement de la pièce travaillée peut être contributif ou non. Selon les résultats de la présente étude, toutes les clouuses testées excitent la pièce travaillée de la même façon.

Piste de solution :

- (i) Pour réduire le rayonnement de la pièce travaillée, la façon dont la pièce est excitée lors de l'enfoncement du clou doit être modifiée. Cette piste de solution passe par une modification du principe de fonctionnement des clouuses. Un paramètre qui semble intéressant à étudier est la durée de l'enfoncement. Si l'enfoncement se fait sur une période plus longue et que le mécanisme d'impact est transformé, non seulement le rayonnement de la pièce travaillé en sera réduit, mais aussi celui du corps de la cloueuse.

### **9.4 Le choc du bélier (fin de course)**

Parmi les sources spécifiques qui viennent exciter le corps de la cloueuse et qui ont été décelées lors des mesures, une source dominante semble l'arrivée en fin de course (basse et haute) du bélier. Comme présenté dans la section des mesures avec la caméra haute vitesse, un des événements dominants lors d'un impact n'est pas l'enfoncement du clou lui-même, mais bien l'arrivée en position basse du bélier de la cloueuse.

Pistes de solutions :

- (i) Bien que des butées en élastomère existent déjà sur les cloueuses pour réduire l'impact de fin de course, il semble qu'une optimisation des paramètres des butées permettrait de réduire l'effet de l'arrivée en bout de course du bélier;
- (ii) Une solution plus complexe, nécessitant une nouvelle conception du mécanisme d'enfoncement du clou, serait de changer le mécanisme actuel qui consiste à faire absorber l'énergie du bélier par les butées. Cela pourrait être réalisé avec un mécanisme qui contrôlerait les déplacements, vitesses et accélérations en tout point du bélier. Ou encore en réduisant la masse ou même la géométrie du bélier lui-même.

### **9.5 La quantité d'énergie constante**

Autre constat issu des mesures, les vibrations mesurées à la poignée ne changent pas ou peu selon le type de structure cloué. Ce résultat montre que, peu importe l'énergie nécessaire pour enfoncer un clou, la cloueuse déploie systématiquement la même quantité d'énergie (énergie maximale). Il s'agit donc d'un système qui n'est pas optimisé d'un point de vue du coût énergétique et qui doit donc disperser ce surplus énergétique en le transformant en mouvement et en chaleur, en vibrations et donc aussi en bruit.

Pistes de solutions :

- (i) Un meilleur contrôle de l'énergie afin d'utiliser seulement la quantité requise pour répondre aux besoins réels permettrait de réduire la quantité d'énergie à dissiper. Or, une nouvelle version de la cloueuse électrique (EB1) existe qui dispose de 2 vitesses différentes pour faire tourner la roue d'inertie et donc de la vitesse d'enfoncement. Cette modification est fort probablement attribuable aux commentaires formulés par des usagers qui trouvaient que la durée de vie de la batterie n'était pas suffisante. Il serait donc intéressant de soumettre cette nouvelle cloueuse à des tests afin d'étudier l'effet de la vitesse d'enfoncement sur l'excitation de la pièce travaillée et du corps de la cloueuse.



## 10. CONCLUSION

L'utilisation des cloueuses dans l'industrie de la construction expose les travailleurs à des bruits et à des vibrations de nature impulsionnelle. En fonction de la durée et du niveau d'exposition, ces agresseurs physiques soumettent les travailleurs exposés à un risque de développer des maladies professionnelles. Afin d'éventuellement permettre la réduction de l'exposition des travailleurs à ces agresseurs physiques, le projet était motivé par trois objectifs spécifiques : (1) comparer les mesures normalisées en laboratoire à celles prises sur le terrain afin de voir si celles en laboratoire permettent réellement de bien évaluer le bruit et les vibrations des cloueuses; (2) développer des méthodes de diagnostic des sources de bruit et de vibrations des cloueuses; et (3) suggérer des pistes de solutions.

Afin de répondre à l'objectif 1, une campagne de mesures en laboratoire, basée sur les normes actuelles d'évaluation du bruit et des vibrations, ainsi que des mesures terrains en utilisant des équipements adaptés, ont été réalisées. Les résultats montrent que les niveaux de vibrations entre les mesures terrains et en laboratoire sont comparables. En ce qui concerne le bruit, il appert que le rayonnement acoustique de la cloueuse varie très peu, étant donné que l'émission vibratoire de la cloueuse est semblable, peu importe le médium cloué. La différence de niveau de puissance acoustique provient du rayonnement de la pièce travaillée. Pour les milieux évalués, la différence attribuable au rayonnement de la pièce travaillée est au maximum de 3 dBA, laissant croire que dans les environnements de travail visités (terrains), la pièce travaillée rayonnait une énergie inférieure ou égale à celle de la cloueuse elle-même. Il est noté que le classement des cloueuses, tant pour les vibrations que pour le bruit, reste sensiblement le même, avec ou sans la contribution du rayonnement de la pièce travaillée. Cela permet de conclure que, comme les cloueuses excitent la pièce travaillée de la même façon, les mesures en laboratoire sur le banc normalisé constituent une façon adéquate de qualifier les cloueuses et de les comparer. Par contre, advenant la conception d'une cloueuse utilisant une technologie différente que celles utilisées actuellement, il se pourrait que la contribution de l'excitation de la pièce travaillée soit différente et que l'usage d'un banc de mesures générant un rayonnement acoustique de la pièce travaillée soit nécessaire pour différencier cette cloueuse des modèles déjà existants.

Le deuxième objectif visait à développer des méthodes de diagnostic des sources de bruit et de vibrations. Afin de pouvoir réaliser les multiples essais nécessaires à la réalisation de cet objectif, un dispositif de substitution de l'opérateur (DSO) a été élaboré. Le DSO permet d'obtenir une variabilité équivalente aux mesures normalisées qui en nécessitent plus de 150, cela avec seulement 10 clous. Les valeurs moyennes obtenues avec le DSO sont, pour la puissance acoustique, environ 1 dB moins élevées que les mesures normalisées en laboratoire, et pour les vibrations, environ 0,5 m/s<sup>2</sup> plus élevées. Plusieurs modifications pourraient être apportées au DSO afin d'obtenir des résultats similaires aux valeurs obtenues avec les mesures normalisées, mais aussi pour en faciliter l'utilisation et en simplifier la conception.

Par ailleurs, les méthodes utilisées pour déterminer les sources de bruit et de vibrations sont : (i) le masquage des sources, (ii) l'imagerie acoustique, (iii) l'usage d'un banc rayonnant et (iv) l'usage d'une caméra haute vitesse. Ces méthodes ont permis de déterminer les sources dominantes de bruit qui sont : le rayonnement du corps, le bruit d'échappement et le rayonnement de la pièce travaillée. Si les deux premières sources sont pratiquement constantes, la troisième varie selon le travail effectué. Fait intéressant, les cloueuses actuelles

semblent exciter la pièce travaillée de la même façon, cela ayant pour effet de permettre un bon classement des cloueuses, en négligeant le rayonnement de la pièce travaillée (en utilisant le banc normalisé avec la pièce travaillée enfouie dans le sable).

Les pistes de solution liées au troisième objectif s'appliquent aux trois principales sources de bruit (corps de la cloueuse, pièce travaillée et échappement) ainsi qu'à deux mécanismes internes de la cloueuse générant du bruit et des vibrations, soit les fins de course (basse et haute) du bélier et la quantité d'énergie excédentaire à celle nécessaire à l'enfoncement du clou. Une solution qui serait facile à mettre en œuvre serait la constitution d'un kit contenant un silencieux pour l'échappement et une barrière acoustique pour le corps de la cloueuse. Les autres solutions sont plus complexes et interpellent directement les fabricants, comme, par exemple, le découplage de la poignée afin de réduire les vibrations à la main de l'opérateur. Enfin, les deux mécanismes internes de la cloueuse générant du bruit et des vibrations mis en relief dans cette étude mériteraient d'être explorés davantage. Dans un premier temps, il serait nécessaire de déterminer la quantité d'énergie minimale nécessaire pour enfoncer un clou dans une situation donnée et d'évaluer la contribution de l'énergie excédentaire de la situation actuelle aux émissions vibratoires et sonores. Cette énergie pourrait être réduite si la quantité utilisée pour l'enfoncement d'un clou était réglable.

Finalement, grâce à une caméra haute vitesse, il a été possible d'étudier l'effet de l'arrivée en fin de course du bélier. À cet égard, une conception améliorée des butées de fin de course (basse et haute) pourrait avoir un effet important pour réduire les émissions sonores et vibratoires d'une cloueuse.

En somme, tous les objectifs de la présente étude ont été atteints. Cette étude a permis de déterminer et de quantifier plusieurs sources de vibrations et de bruit produits par les cloueuses utilisées dans l'industrie de la construction. Elle a aussi permis le développement d'un dispositif de substitution de l'opérateur. Ce dispositif nécessite davantage de développement pour permettre de mieux approximer les valeurs obtenues avec un opérateur, mais sa faible variabilité permet de qualifier une cloueuse avec seulement 10 clous. Un DSO optimisé permettrait de ne plus recourir aux trois opérateurs qui doivent enfoncer 50 clous chacun, comme requis par les normes actuelles. Ainsi, l'évaluation d'une cloueuse serait grandement simplifiée et les fabricants pourraient facilement utiliser le dispositif pour déterminer les émissions sonores et vibratoires de leurs cloueuses en fonction des normes.

## BIBLIOGRAPHIE

- Adelberg, J., Anderson, R., Kuykendall, B., Schwartz, T. et Vu, K. (2002). *Study of Noise Transmission from a Pneumatic Nail Gun* (Project report for MTU course ME4704 Acoustics and Noise Control). National Institute of Occupational Safety and Health (NIOSH) and Michigan Technological University (MTU).
- AFNOR. (2008). Acoustics. Noise test code for fastener driving tools. Engineering method. *EN 12549+A1*.
- Ahmadabadi, Z. N., Laville, F. et Guilbault, R. (2016). Time domain identification and ranking of noise sources in a pneumatic nail gun. *Applied Acoustics*, 114, 191-202.  
doi:10.1016/j.apacoust.2016.07.030
- Amrein, B. E. et Letowski, T. R. (2012). *High Level Impulse Sounds and Human Hearing: Standards, Physiology, Quantification* (n° ARL-TR-6017). U.S. Army Research Laboratory ATTN: RDRL-HRS-D Aberdeen Proving Ground, MD 21005-5425. Repéré à <http://www.dtic.mil/docs/citations/ADA573840>
- Boutin, J., Marcotte, P. et Jasinski, J. (2007). *Détermination de l'émission vibratoire d'outils manuels percutants - Faisabilité d'un système mécanique de substitution de personnes* (Rapport n° R-486). Montréal: IRSST.
- Bovenzi, M, Apostoli, P., Alessandro, G. et Vanoni, O. (1997). Changes over a workshift in aesthesiometric and vibrotactile perception thresholds of workers exposed to intermittent hand transmitted vibration from impact wrenches. *Occupational and Environmental Medicine*, 54(8), 577-587.
- Bovenzi, M., Pinto, I., Picciolo, F., Mauro, M. et Ronchese, F. (2011). Frequency weightings of hand-transmitted vibration for predicting vibration-induced white finger. *Scandinavian Journal of Work, Environment & Health*, 37(3), 244-252.
- Burdorf, A. et Monster, A. (1991). Exposure to vibration and self-reported health complaints of riveters in the aircraft industry. *The Annals of Occupational Hygiene*, 35(3), 287-298.
- Conseil de l'Union Européenne. (2002). Directive 2002/44/CE du Parlement européen et du Conseil du 25 juin 2002 concernant les prescriptions minimales de sécurité et de santé relatives à l'exposition des travailleurs aux risques dus aux agents physiques (vibrations). *Journal officiel des Communautés européennes*, L 177, 13-19.
- Davis, R. R. et Clavier, O. (2016). Impulsive noise: A brief review. *Hearing Research*.  
doi:10.1016/j.heares.2016.10.020
- Gaudreau, M.-A., Sgard, F., Laville, F. et Nélisse, H. (2017). A finite element model to improve noise reduction based attenuation measurement of earmuffs in a directional sound field. *Applied Acoustics*, 119, 66-77. doi:10.1016/j.apacoust.2016.12.003
- Heaton, R., Hewitt, S. et Yeomans, L. (2007). *Correlation between vibration emission and vibration during real use: Fastener driving tools* (Rapport n° RR591). Prepared by the Health and Safety Laboratory for the Health and Safety Executive. Tiré de <http://www.hse.gov.uk/research/rrhtm/rr591.htm>
- Irle, H., Hesse, J. M. et Strasser, H. (1998). Physiological cost of energy-equivalent noise exposures with a rating level of 85 dB (A): Hearing threshold shifts associated with energetically

negligible continuous and impulse noise. *International journal of industrial ergonomics*, 21(6), 451–463.

Organisation internationale de normalisation. (1999). *Hand-held portable power tools. Measurement of vibrations at the handle – Part 11: Fastener driving tools*. Norme ISO 8662-11.

Organisation internationale de normalisation. (2001). *Vibrations mécaniques -- Mesurage et évaluation de l'exposition des individus aux vibrations transmises par la main – Partie 1 : Exigences générales*. Organisation internationale de normalisation. Norme ISO 5349-1:2001.

Organisation internationale de normalisation. (2004). *Vibrations et chocs mécaniques -- Mesurage et évaluation des chocs simples transmis par les machines portatives et guidées à la main au système main bras*. Norme ISO/TS 15694:2004(F).

Organisation internationale de normalisation. (2010a). *Acoustique -- Bruit émis par les machines et équipements -- Détermination des niveaux de pression acoustique d'émission au poste de travail et en d'autres positions spécifiées dans des conditions approchant celles du champ libre sur plan réfléchissant avec des corrections d'environnement négligeables*. Norme Norme ISO 11201:2010.

Organisation internationale de normalisation. (2010b). *Acoustique -- Détermination des niveaux de puissance acoustique et des niveaux d'énergie acoustique émis par les sources de bruit à partir de la pression acoustique -- Méthodes d'expertise pour des conditions approchant celles du champ libre sur plan réfléchissant*. Norme ISO 3744:2010.

Jayakumar, V., Kim, J. et Zechmann, E. (2015). Identification of Noise Sources and Design of Noise Reduction Measures for a Pneumatic Nail Gun. *Noise Control Engineering Journal*, 63(2), 159-168.

Kihlberg, S. et Hagberg, M. (1997). Hand-arm symptoms related to impact and nonimpact hand-held power tools. *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 69(4), 282-288.

Marcotte, P., Boutin, J. et Jasinski, J. (2010). Development of a hand-arm mechanical analogue for evaluating chipping hammer vibration emission values. *Journal of Sound Vibration*, 329, 1968-1980. doi:10.1016/j.jsv.2009.10.042

Padois, T. et Berry, A. (2015). Orthogonal matching pursuit applied to the deconvolution approach for the mapping of acoustic sources inverse problem. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 138(6), 3678-3685. doi:10.1121/1.4937609

Padois, T. et Berry, A. (2017). Application of acoustic imaging techniques on snowmobile pass-by noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 141(2), EL134-EL139. doi:10.1121/1.4976138

Pelmear, P. L., Kusiak, R. et Leong, D. (1995). Hand-arm vibration syndrome associated with impact vibration. *Journal of Low Frequency Noise & Vibration*, 14(2), 73-79.

Québec, P. Loi sur la santé et la sécurité du travail (L.R.Q., s-2.1,r. 13). Règlement sur la santé et la sécurité au travail (D. 885-2001), articles 130 à 141). , n° § Section XV (2015). Tiré de [http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=3&file=/S\\_2\\_1/S2\\_1R13.HTM](http://www2.publicationsduquebec.gouv.qc.ca/dynamicSearch/telecharge.php?type=3&file=/S_2_1/S2_1R13.HTM)

Shanks, E. (2008). *Noise emission from fastener driving tools* (Rapport n° RR625). Prepared by the Health and Safety Laboratory for the Health and Safety Executive. Tiré de <http://www.hse.gov.uk/research/rrhtm/rr625.htm>

Tisserand, J.-X. et Triomphe, S. (2011). Fabrication de palettes : Réduction du bruit de l'échappement de cloueurs pneumatiques. Dans *Bruit et vibrations au travail*. Paris, France.



## **ANNEXE A :      SONDAGE EFFECTUÉ AUPRÈS D'ENTREPRISES DE LA CONSTRUCTION**

**Questionnaire sur l'utilisation de vos guns à clous (modèle de cloueuse)**

**S'adresse à qui :   Travailleurs de la construction (charpentiers-menuisiers et/ou couvreurs)**

**But : Déterminer les meilleurs guns à clous disponibles sur le marché et fournir un classement aux travailleurs**

**Objectifs:** Ce questionnaire fait partie d'un projet de recherche visant à évaluer les niveaux de bruit et de vibrations émis par les modèles de cloueuse les plus couramment utilisés dans l'industrie de la construction par les charpentiers-menuisiers et les couvreurs.

Les résultats de ce questionnaire permettront d'orienter le choix des outils à évaluer afin qu'ils soient représentatifs de ceux utilisés en milieu de travail. Par la suite, des mesures de bruit et de vibrations seront réalisées sur quelques chantiers afin de caractériser les niveaux de bruit et de vibrations des outils sélectionnés dans des conditions réelles de travail. Des bancs d'essai seront également mis au point afin de caractériser le bruit et les vibrations dans des conditions contrôlées de laboratoire.

Les résultats de ce projet de recherche permettront de formuler des recommandations quant au choix des outils permettant de minimiser l'exposition au bruit ainsi qu'aux vibrations main-bras, ainsi que d'identifier des améliorations à apporter aux outils existants afin de réduire leurs niveaux de bruit et de vibration.

**Personnes ressources :** Frédéric Laville, Professeur, École de technologie supérieure (ÉTS)  
Tél. : 514-396-8662      Courriel : [Frederic.Laville@etsmtl.ca](mailto:Frederic.Laville@etsmtl.ca)

Pierre Marcotte, Chercheur, IRSST  
Tél. : 514-288-1551 ext. 251   Courriel : [marcotte.pierre@irsst.qc.ca](mailto:marcotte.pierre@irsst.qc.ca)

**Question 1. Quelle est la cloueuse que vous utilisez le plus pour votre travail ?**

<b>Photo de l'outil (si possible)</b>
<b>Marque et modèle :</b> <i>(exemple : DeWalt D51855)</i>
<b>Combien il y a-t-il de cloueuses de ce modèle dans votre entreprise (si connu) ?</b>
<b>Quel est le type d'alimentation de l'outil ? (pneumatique, électrique, batteries, gaz, etc.)</b>
<b>Tâche la plus courante pour cet outil :</b> <i>(exemple : monter une charpente)</i>
<b>Nombre d'heures d'utilisation par semaine :</b> <i>(exemple : 3 heures/semaine)</i>
<b>Fournisseur de l'outil, si connu :</b> <i>(exemple : Canadian Tire)</i>
<b>Qu'est-ce que vous aimez le plus avec cet outil ?</b> <i>(exemple : puissance, rapidité d'exécution, poignée, etc.)</i>
<b>Qu'est-ce que vous aimez le moins avec cet outil ?</b> <i>(exemple : lourd et encombrant, bruit, vibration, etc.)</i>

**Question 2. Quel type de clous utilisez-vous le plus fréquemment ?**

1. 3 1/4" en bandes
2. 3 1/4" en rouleaux
3. 1 1/4" à bardeaux en rouleaux
4. 2 3/8" en bandes
4. 2 3/8" en rouleaux
5. autres : \_\_\_\_\_

**Question 3. Quel est votre corps de métier (exemple : charpentier-menuisier, couvreur) :**

\_\_\_\_\_

**Question 4. Nom de l'entreprise pour lequel vous travaillez, adresse et numéro de téléphone :**

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

**Question 5. Seriez-vous intéressé à participer aux mesures de bruit et vibrations en milieu de travail (oui / non). Si oui, laissez-le savoir à votre superviseur ou contacter par téléphone ou par courriel une des deux personnes ressources.**

Nous vous remercions d'avoir répondu à ce questionnaire.

Les informations ainsi recueillies nous permettront de mieux cibler les outils à évaluer dans le cadre de notre projet de recherche.